



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

FRANCISCO EUDES DO AMARAL

USO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO NA OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO
E NA MELHORIA OPERACIONAL DE SISTEMAS ADUTORES DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Recife

2017

FRANCISCO EUDES DO AMARAL

USO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO NA OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO
E NA MELHORIA OPERACIONAL DE SISTEMAS ADUTORES DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito parcial a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Coorientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.

Recife

2017

A485u Amaral, Francisco Eudes do.
 Uso de técnicas de geoprocessamento na otimização do traçado e na melhoria operacional de sistemas adutores de abastecimento de água / Francisco Eudes do Amaral. - 2017.
 141 folhas, il., gráfs., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.
 Coorientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.
 Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017.

 Inclui Referências, Apêndices e Anexos.

 1. Engenharia Civil. 2. Adutoras. 3. Otimização de rotas. 4. SIG. 5. Análise de rede. I. Cirilo, José Almir. (Orientador). II. Ribeiro Neto, Alfredo. (Coorientador). Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2018-98



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**USO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO NA OTIMIZAÇÃO
DO TRAÇADO E NA MELHORIA OPERACIONAL DE SISTEMAS
ADUTORES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

defendida por

Francisco Eudes do Amaral

Considera o candidato APROVADO

Recife, 31 de janeiro de 2017

Prof. Dr. José Almir Cirilo – Orientador

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Almir Cirilo – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho – UFPE
(examinador externo)

Prof.^a Dr.^a Leijdane Maria Maciel de Oliveira – UFPE
(examinadora externa)

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(examinador interno)

Prof.^a Dr.^a Sylvana Melo dos Santos – UFPE
(examinadora interna)

A minha mãe Enilda Teixeira do Amaral.

A meu pai José Amaral, in memoriam.

A meu filho Ian Ribeiro do Amaral.

AGRADECIMENTOS

Aos meus Pais, exemplos de perseverança e sabedoria;

Aos meus Orientadores Prof. Dr. José Almir Cirilo e Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto pela confiança, seriedade, disponibilidade e principalmente pelo enorme conhecimento e experiência que compartilharam comigo;

À Aline Pereira de Souza Alves pelo apoio e compreensão;

Ao IFPI – Instituto Federal do Piauí, pelo apoio durante a execução do trabalho;

À Felipe Monteiro e Natanael pelo apoio com os softwares utilizados no trabalho;

Aos colegas de trabalho Marcos Diniz, Giselda Costa, Antônio Alves Júnior e Kelson Leite pelo apoio e amizade;

À minha irmã Jayra e toda família Amaral pelo apoio durante toda minha vida;

À Fellipe Alves e Moura Neto pelas considerações valiosas;

À SEMAR - Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí;

A todos os companheiros do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE;

Aos amigos que souberam principalmente entender as minhas ausências e por terem colaborado ao longo deste trabalho;

Finalmente e, sobretudo, a Deus essência de tudo.

“Uma das principais prioridades das populações é o atendimento por de sistema de abastecimento de água em quantidade e qualidade adequadas, para atendimento às suas necessidades relacionadas à saúde e ao desenvolvimento industrial.”

(Tsutiya, 2006)

RESUMO

Considerando as necessidades atuais de gestão de recursos hídricos e a necessidade de sistemas de informações que permitam tratar a informação em todo o seu ciclo de vida – da coleta ao processamento - auxiliando assim o processo de tomada de decisão gerencial, discute-se neste trabalho um modelo de otimização multicritério baseado em SIG, que tem como finalidade a realização de uma análise espacial para a determinação do melhor caminho (menor custo) na implantação de uma rota (traçado) e para a solução de problemas de rede em adutoras. Em decorrência disso foi possível simular rotas para o traçado da adutora, considerando critérios relacionados com: as declividades e altitudes da área, as distâncias de rios e áreas alagadas e a proximidade de rodovias. Faz parte da pesquisa uma abordagem sobre a resolução espacial no que refere aos ganhos de qualidade e dificuldades de processamento decorrentes do uso de base de dados com maior resolução. Foram utilizadas as bases de dados SRTM 90 e o Pernambuco Tridimensional, mapeamento a laser do estado de Pernambuco. A análise leva em consideração a importância (peso) de cada critério no modelo. Para minimizar a subjetividade na escolha dos valores desses pesos, buscou-se a opinião de especialistas com relação aos critérios analisados. O método AHP (Análise Hierárquica de Pesos) foi utilizado para a ponderação dos critérios. Para aplicação da metodologia, foram utilizadas como áreas de estudo as adutoras de Bocaina e do Pajeú, respectivamente, nos estados do Piauí e de Pernambuco. Os resultados obtidos através de SIG permitiram identificar as áreas consideradas como de maior aptidão para a locação do traçado da adutora e determinar uma rota otimizada para esse traçado, possibilitando assim fazer uma comparação com o traçado de Projeto da Adutora. Na prática significou na determinação de uma rota para implantação da tubulação da adutora, o que sugere que a utilização de SIG e técnicas de otimização podem auxiliar a tomada de decisão, pois a rota otimizada além de possuir comprimento inferior ao que tem sido atualmente planejado, estar localizada, de acordo com a simulação, em uma região que potencialmente oferece uma diminuição de custos com a implantação, operação e manutenção da adutora. Adicionalmente, o modelo permitiu a estruturação e análise da rede de transporte formada pelas instalações e pelas rodovias da área de abrangência da Adutora de Bocaina. Na análise da rede, foram usadas ferramentas para solucionar o problema do cálculo de percursos ótimos entre as instalações do sistema, o problema de percursos de veículos, bem como para resolver problemas relacionados à determinação de instalações nas proximidades de um dado ponto do sistema adutor. Com isso buscou-se apresentar o potencial de ferramentas SIG para auxiliar ações operacionais, para aumentar a eficiência do sistema pós-construído em termos de manutenção, monitoramento e logística em geral.

Palavras-chave: Adutoras. Otimização de rotas. SIG. Análise de rede.

ABSTRACT

Considering the current needs of water resources management through Efficient and reliable information systems, and enabling to treat the information throughout its life cycle - from collection to manipulation - Assisting the process of managerial decision making, We discuss in this work a multicriteria optimization model based on GIS, whose purpose is to perform a spatial analysis to determine the best path (least cost) in the implementation of a route (alignment) and to solve network problems In Pipelines. As a result, it was possible to simulate routes of minimum cost for the pipeline alignment, considering exclusively technical criteria related to: the slopes and altitudes of the area, the distances of rivers and flooded areas and the proximity of highways. The research focuses on spatial resolution in terms of quality gains and processing difficulties due to the use of higher resolution databases. We used the SRTM 90 and Pernambuco Tridimensional databases, laser mapping of the state of Pernambuco. The analysis takes into account the importance (weight) of each criterion in the model. To minimize the subjectivity in the choice of values of these weights, we sought the opinion of experts regarding the analyzed criteria. The AHP (Hierarchical Analysis of Weights) method was used to weigh the criteria. In order to apply the methodology, the Bocaina and Pajeú pipelines were used as study areas, respectively, in the states of Piauí and Pernambuco. The results obtained through GIS allowed to identify the areas considered as being of greater aptitude for the location of the alignment of the adductor and to determine an optimized route for this alignment, thus allowing a comparison with the alignment of the project of the pipeline. In practice, it meant in determining a route for the implementation of the pipeline, which suggests that the use of GIS and optimization techniques can aid in decision making, since the optimized route, besides having a shorter length than what has been currently planned, Be located, according to the simulation, in a region that potentially offers a reduction of costs with the implantation, operation and maintenance of the pipeline. Additionally, the model allowed the structuring and analysis of the transportation network formed by the facilities and the highways of the area covered by the Bocaina pipeline. In the analysis of the network, tools were used to solve the problem of calculating optimum paths between the system (pipeline) installations, the problem of vehicle paths, as well as to solve problems related to the determination of facilities in the vicinity of a given point of the system. The aim was to present the potential of GIS tools to support operational actions to increase the efficiency of the post-built system in terms of maintenance, monitoring and logistics in general.

Keywords: Pipeline. Route optimization. SIG. Network analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Estrutura de um sistema de abastecimento de água	24
Figura 2.2 – Arquitetura de sistemas de informações geográfica.....	33
Figura 2.3 – Distribuição de áreas com produtos disponíveis em agosto de 2015 .	44
Figura 2.4 – As sete pontes de Königsberg e o grafo equivalente	45
Figura 2.5 – Exemplo de grafo	46
Figura 2.6 – Exemplo de árvore	47
Figura 2.7 – Grafo direcionado	47
Figura 2.8 – Exemplo de Grafo da e correspondente matriz de adjacências M	49
Figura 2.9 – Grafo direcionado e correspondente matriz de adjacências M	50
Figura 2.10 – Estrutura da lista de adjacências do grafo da Fig. 2.8.....	51
Figura 2.11 – Grafo G para matriz de incidência	51
Figura 2.12 – Matriz de incidência para o Grafo G da Figura 2.10	51
Figura 3.1 – Área de estudo com o traçado projetado para a adutora de Bocaina .	58
Figura 3.2 – Área de estudo com o traçado projetado para a adutora do Pajeú	58
Figura 3.3 – Traçado Previsto para a Adutora do Pajeú	61
Figura 3.4 – Fluxograma da metodologia para determinação do melhor caminho para locação do traçado da adutora	64
Figura 3.5 – Imagem matricial do buffer de rodovias (a) Imagem matricial de Distância Euclidiana (b)	69
Figura 3.6 – Distância de custo do pixel adjacente (a) distância de custo do pixel em diagonal (b)	76
Figura 3.7 – Imagem matricial de origem (a) e de custo (b) para geração da imagem matricial de distância de custo	77
Figura 3.8 – Direção e código a ser atribuído à imagem matricial de direção custo	78
Figura 3.9 – Imagem matricial de direção custo	79

Figura 3.10 – Fluxograma da Metodologia para Estruturação e Análise da Rede do Sistema Adutor Bocaina - Picos	82
Quadro 3.1 – Atributos da Rede de Rodovias	85
Figura 3.11 – Atributos da Rede de Rodovias	86
Quadro 3.2 – Descrição, reparo e exemplo de regras topológicas	87
Figura 3.12 – Cruzamento de duas linhas que não representa conectividade	88
Figura 3.13 - Conectividade em qualquer vértice	89
Figura 3.14 – Exemplo de definição de conectividade com dois grupos	90
Figura 3.15 – Atributos de rede configurados automaticamente pelo <i>Network Analyst</i> para Rodovias_ND mais o atributo ConversoesProibidas	92
Figura 3.16 – Criação do atributo ConversoesProibidas	94
Figura 3.17 – Configurações de Direção para o <i>Network Dataset</i>	95
Figura 3.18 – Propriedades da <i>layer Route</i>	98
Figura 4.1 – Limites de estudo e os pontos de Origem e Destino (Adutora de Bocaina)	101
Figura 4.2 – Limites de estudo e os pontos de Origem e Destino (Adutora do Pajeú)	102
Figura 4.3 – Hidrografia da área de estudo (Adutora de Bocaina)	103
Figura 4.4 – Rodovias da área de estudo (Adutora de Bocaina).....	103
Figura 4.5 – Imagem Matricial de Declividade (Adutora de Bocaina)	104
Figura 4.6 – Buffer de Rios da área de estudo (Adutora de Bocaina)	104
Figura 4.7 – Buffer de Estradas da área de estudo (Adutora de Bocaina)	105
Figura 4.8 – Reclassificação da Imagem Matricial de Declividade (Adutora de Bocaina)	105
Figura 4.9 – Reclassificação da Distância Euclidiana para Rios (Adutora de Bocaina)	105
Figura 4.10 – Reclassificação da Distância Euclidiana para Rodovias (Adutora de Bocaina)	106
Figura 4.12 – Reclassificação da Imagem matricial de Altitude_P_Carga	107

Figura 4.13 – Resultado das áreas mais adequadas para traçado da adutora de Bocaina e traçado proposto no projeto do Sistema Adutor de Bocaina	111
Figura 4.14 – Resultado das áreas mais adequadas para o traçado da adutora e traçado proposto no projeto básico do Sistema Adutor do Pajeú.....	112
Figura 4.15 – Rota otimizada e traçado proposto no projeto básico do Sistema Adutor de Bocaina	115
Figura 4.16 – Rota otimizada e traçado proposto no projeto básico do Sistema Adutor do Pajeú	117
Figura 4.17 – Rotas simuladas para o traçado da Adutora do Pajeú	118
Figura 4.18 – Rede de rodovias com suas arestas e nós	119
Figura 4.19 – Melhor rota (melhor caminho) entre os pontos RAD e o Ramal de Derivação1	120
Figura 4.20 – Uso da ferramenta <i>Directions Window</i> : RAD até a DERIV1	121
Figura 4.21 – Melhor rota (melhor caminho) entre os pontos RAD e o Ramal de Derivação 2	122
Figura 4.22 – Uso da ferramenta <i>Directions Window (Route)</i> : RAD até a DERIV2.	123
Figura 4.23 – Resultado gráfico da solução Instalação mais Próxima	124
Figura 4.24 – Uso da ferramenta <i>Directions Window (Closest Facility)</i>	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Ponderação e padronização na avaliação de riscos à inundação	38
Tabela 2.2 – Escala de Comparação	39
Tabela 2.3 – Matriz de comparação par a par	40
Tabela 3.1– População e vazões de projeto (Adutora do Pajeú)	62
Tabela 3.2 – Classes de Declividade, seus novos valores após reclassificação e custos	70
Tabela 3.3 – Classes de Distâncias dos Rios, seus novos valores após reclassificação e custos	71
Tabela 3.4 – Classes de Distâncias das Rodovias, seus novos valores após reclassificação e custos	71
Tabela 3.5 – Classes de Altitude, seus novos valores após reclassificação e custos (Adutora de Bocaina)	72
Tabela 3.6 – Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n, de acordo com o Laboratório Nacional de Oak Ridge, EUA	75
Tabela 4.1 – Matriz de comparação par a par (Resultados)	107
Tabela 4.2 – Determinação dos pesos para cada variável	108
Tabela 4.3 – Valores obtidos pela ponderação e padronização dos planos de informação (Adutora de Bocaina)	109
Tabela 4.4 – Classes de Altitude, seus novos valores após reclassificação e custos (Adutora do Pajeú)	109
Tabela 4.5 – Bases de dados e comprimento dos traçados (Adutora do Pajeú)	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP – Análise Hierárquica de Pesos

CCA – Centro de Comando e Automação do Sistema

Deriv1 – Ramal de Derivação 1

Deriv2 – Ramal de Derivação 2

EB – Estação de Bombeamento

ESRI – *Environmental Systems Research*

ETA – Estação de Tratamento de Água

IBGE – Instituto brasileiro de Geografia e Estatística

LiDAR – *Light Detection And Ranging*

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital do Terreno

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

OMT – *Object Modeling Technique*

PE3D – Programa Pernambuco Tridimensional

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

RAD – Reservatório Apoiado de Distribuição

SEMAR – Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

SIG-T – Sistemas de Informações Geográficas Aplicados a Problemas Específicos de Transporte

SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission*

TIN – *Triangular Irregular Network*

VRP – Problema de Percursos de Veículos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	21
2.1.1	Definição e descrição	21
2.1.2	Sistema adutor.....	22
2.1.2.1	Otimização de rotas	23
2.1.2.1.1	<i>Problemas de otimização</i>	<i>23</i>
2.1.2.1.2	<i>Otimização do traçado em sistemas adutores</i>	<i>25</i>
2.2	GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE ESPACIAL	29
2.2.1	Definição e conceitos básicos.....	29
2.2.2	Modelagem e representação de dados geográficos.....	31
2.2.3	SIG e a gestão de recursos hídricos.....	32
2.2.3.1	O software ArcGis	34
2.2.4	Modelos de análise multicritério	35
2.2.5	Uso de bases de dados espaciais.....	39
2.2.5.1	Base de dados SRTM/TOPODATA.....	39
2.2.5.2	Base de dados de alta resolução (O programa Pernambuco tridimensional)	40
2.3	A TEORIA DOS GRAFOS E A ANÁLISE DE REDE.....	42
2.3.1	Teoria dos grafos.....	42
2.3.1.1	Conceitos básicos e definições	44
2.3.1.2	Representação computacional de grafos	47
2.3.2	Análise de rede e problemas de transporte	50
3	METODOLOGIA	52
3.1	A UTILIZAÇÃO DE SIG NA CONSTRUÇÃO DO MODELO	52

3.2	O MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO PARA LOCAÇÃO DO TRAÇADO DA ADUTORA	53
3.2.1	Critérios utilizados	53
3.2.2	Área de estudo	55
3.2.2.1	O Sistema adutor de Bocaina	57
3.2.2.2	O Sistema adutor do Pajeú	58
3.2.3	Construção do modelo	61
3.2.3.1	Desenvolvimento da base de dados em SIG	62
3.2.3.1.1	<i>Preparação dos shapefiles</i>	63
3.2.3.1.2	<i>Geração do MDT (Modelo Digital do Terreno)</i>	63
3.2.3.2	Geração das imagens matriciais para locação do traçado da adutora.....	63
3.2.3.3	Reclassificação das imagens matriciais para locação do traçado da adutora	67
3.2.3.4	Determinação dos locais mais adequados para locação do traçado da adutora	70
3.2.3.4.1	Demonstração do método AHP	72
3.2.3.5	Determinação do melhor caminho para locação do traçado da adutora ..	74
3.3	ESTRUTURAÇÃO DA REDE DO SISTEMA ADUTOR	78
3.3.1	Elementos e atributos da rede	80
3.3.2	Digitalização da rede	82
3.3.3	Criação da <i>feature dataset</i>	84
3.3.4	Topologia e validação da rede	84
3.3.5	Construção do <i>network dataset</i>	85
3.3.5.1	Denominação do <i>network dataset</i> e seleção das <i>feature class</i>	86
3.3.5.2	Definição das políticas de conectividade e de elevação	86
3.3.5.3	Configuração, verificação, renomeação e criação de atributos de rede ...	89
3.3.5.4	Configuração de direções	92
3.3.6	Localizações na rede (<i>network locations</i>)	93
3.3.7	Aplicações do <i>network analyst</i>	95
3.3.7.1	Otimização de percursos (<i>route</i>)	95
3.3.7.2	Instalação mais próxima (<i>closest facility</i>)	97
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
4.1	MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA LOCAÇÃO DO TRAÇADO DE ADUTORAS	99

4.1.1	Determinação dos locais com potencial para a locação do traçado das adutoras	105
4.1.1.1	Adutora de Bocaina	108
4.1.1.2	Adutora do Pajeú.....	110
4.1.2	Determinação do melhor caminho para locação do traçado da adutora	111
4.1.2.1	Adutora de Bocaina	112
4.1.2.2	Adutora do Pajeú	113
4.2	RESULTADOS DA ANÁLISE DE REDE	116
4.2.1	Network dataset: rede_adutora_ND	117
4.2.2	Aplicação <i>route</i> (otimização de percursos) entre instalações da adutora	118
4.2.3	Aplicação <i>closest facility</i> (instalação mais próxima) para instalações da adutora	122
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
5.1	TRABALHOS FUTUROS	125
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DELPHI	133
	APÊNDICE B – FERRAMENTAS DO SPATIAL ANALYST E NETWORK ANALYST	135
	B.1 FERRAMENTA <i>COST DISTANCE</i> (SPATIAL ANALYST)	135
	B.2 FERRAMENTA <i>COST PATH</i> (SPATIAL ANALYST)	135
	ANEXO A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E UNIDADES DE RESERVAÇÃO (ADUTORA DE BOCAINA)	136
	ANEXO B – DADOS CENSITÁRIOS DOS MUNICÍPIOS (ADUTORA DE BOCAINA)	138
	ANEXO C – DEMANDA HÍDRICA DAS CIDADES ATENDIDAS PELO SISTEMA ADUTOR DE BOCAINA	139

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Muitos municípios brasileiros, como os aqueles da Microrregião Homogênea de Picos, Estado do Piauí, estão enfrentando aumentos populacionais e uma consequência disso é uma pressão maior sobre os recursos hídricos dessas cidades. Uma das preocupações mais prementes é a disponibilidade de água potável já que muitas dessas cidades dependem fortemente de reservas de águas subterrâneas que estão se esgotando de forma acelerada (SEMAR, 2011).

As estratégias para atender essa crescente demanda urbana por água passam pelos sistemas de abastecimento. O dimensionamento, a implantação do projeto, a operação e a manutenção de um sistema de abastecimento de água envolvem custos bastante elevados, impactos ambientais, sociais e econômicos, e merecem análises hidrológica, hidráulica e operacional consistente (LACERDA, 2009). Isto significa que as unidades que compõem esses sistemas devem ser cuidadosamente dimensionadas de maneira que os custos delas sejam otimizados. Dentre as unidades de um sistema de abastecimento de água, dependendo do seu porte, a adução segundo Cordão (2012) é uma das unidades que representa maior custo de implantação. As principais variáveis que mais influenciam no custo de uma adutora são: a tubulação, que depende do diâmetro e do seu material; a escavação para sua implantação, que depende principalmente do tipo de solo e a extensão dos tubos que depende fundamentalmente do traçado adotado para a adutora.

Os Sistemas de Informações Geográficas - SIG consistem em ferramentas capazes de tratar a informação em todo o seu ciclo de vida. Segundo Elmasri (2004), esses sistemas são utilizados para coletar, modelar, armazenar e analisar informações que descrevem propriedades físicas do mundo geográfico, permitindo assim gerenciar e manipular informações geográficas.

Nesse sentido, os SIGs são ferramentas que podem ser utilizadas como instrumento de apoio à tomada de decisão quanto ao traçado de adutoras, pois muitos dos critérios utilizados estão relacionados com variáveis espaciais. Estudos cujo objetivo é a seleção de rotas (traçados) através de metodologias baseadas em SIG podem ser vistos em (LUETTINGER e CLARK, 2005; CROSS, 2007; HARDIN, 2008; SALAH e ATWOOD, 2011).

Vários pacotes de software de engenharia competem hoje no mercado no desenvolvimento de ferramentas que ajudam os projetistas, os quais se utilizam do geoprocessamento para melhorar e poupar tempo no processo de seleção de rota, como o caso do traçado de adutoras. Como exemplos, temos o *Geomedia Transportation Manager da Intergraph* (www.hexagongeospatial.com) e o ArcGIS da ESRI (www.esri.com).

Considerando então as alternativas de processo de seleção de rotas, discute-se neste trabalho um modelo de otimização baseado em SIG, que tem por finalidade a determinação dos locais mais adequados para locação do traçado de adutoras através da utilização de imagens matriciais de custo (planos de informação), bem como do melhor caminho para esse traçado. Em decorrência disso é possível simular rotas de custo mínimo para o traçado de adutoras, considerando critérios exclusivamente técnicos relacionados com as declividades e altitudes da área, as distâncias de rios/áreas alagadas e, a proximidade de rodovias.

Outra questão relacionada aos sistemas adutores diz respeito às instalações (ETA, reservatórios, etc.) e as rodovias na área de abrangência da adutora, as quais formam uma rede. Uma representação dessa rede, por sua vez, resulta em um grafo, que segundo Gersting (2004), é uma representação gráfica de elementos de dados e das conexões entre alguns desses itens.

Para a formulação adequada do modelo, diversos desafios precisariam ser superados, tais como: o problema do cálculo de percursos ótimos entre as instalações do sistema, o problema de percursos de veículos e os problemas relacionados à determinação de instalações nas proximidades de um dado ponto do sistema adutor. Como consequência disso, adicionalmente o modelo, através do uso de SIG, deve permitir que se faça a estruturação e análise de redes, de maneira que possam ser utilizadas ferramentas para solucionar esses problemas, conhecidos como problemas de rede de transporte. Em (LUETTINGER e CLARK, 2005; HARDIN, 2008; SALAH e ATWOOD, 2011) são desenvolvidos Modelos de otimização baseadas em SIG Para estruturação e análise de redes de tubos em adutoras de água.

A maioria das ferramentas atuais usam processos manuais e não permitem a integração direta e automática com outros pacotes de software. A geração manual de rotas envolve a interação direta do projetista tornando o processo relativamente demorado. Nesse sentido, o uso de SIG e de ferramentas e aplicações que

permitam a automação desse processo, bem como a solução de problemas de rede de transporte, traz uma diminuição de custos de construção e manutenção e reduz consideravelmente o tempo na tomada de decisão.

Considerando o fato de que atualmente estão em execução os projetos dos Sistemas Adutores de Bocaina e do Pajeú, respectivamente nos estados do Piauí e de Pernambuco, e a importância desses sistemas no que se refere ao abastecimento de água para as regiões onde estão localizados, é de suma importância que sejam propostas soluções que visam à otimização desses projetos, através da locação de traçados (rotas) de custo mínimo e da análise da rede formada pelas instalações (localizações na rede) da adutora e pelas principais rodovias em torno do sistema adutor, de maneira que possibilite uma diminuição de custos com a tubulação e uma melhoria operacional.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo de otimização baseado em SIG, que realiza uma análise espacial para a determinação do melhor caminho (menor custo) na implantação de uma rota (traçado) e para a solução de problemas de rede em adutoras.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo de otimização baseado em SIG para a locação do traçado de adutoras com base nos custos associados à sua construção e manutenção;
- Avaliar a influência da densidade espacial de informações sobre o terreno sob os aspectos de ganhos de qualidade na otimização e eficiência computacional;
- Aplicar o modelo desenvolvido, aos projetos dos Sistemas Adutores de Bocaina e do Pajeú e identificar uma rota (traçado) de menor custo;
- Criar um banco de dados georreferenciado da rede de transporte correspondente ao Sistema Adutor de Bocaina, formada pelas instalações

(localizações na rede) da adutora e pelas principais rodovias em torno do sistema adutor;

- Fazer uma análise de rede para solucionar o problema do cálculo de percursos entre as instalações do sistema, determinar o caminho (rota) de custo mínimo, bem como resolver problemas relacionados à determinação de instalações nas proximidades de um dado ponto do sistema adutor.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além desta introdução, o presente trabalho está dividido em mais quatro capítulos.

O Capítulo 2 contém uma Revisão Bibliográfica. Inicialmente apresenta uma definição e conceitos para os sistemas de abastecimento de água com uma ênfase no sistema adutor. É feita também uma descrição sucinta do projeto do Sistema Adutor de Bocaina e do sistema Adutor do Pajeú, atualmente em implantação nos estados do Piauí e de Pernambuco, respectivamente, e uma abordagem sobre a otimização do traçado em sistemas adutores.

Na sequência é apresentada definições e conceitos básicos dos SIGs, Geoprocessamento e Análise Espacial. Faz-se uma descrição do processo de modelagem e representação de dados de SIG. Adicionalmente, são apresentados exemplos de SIG aplicados a problemas de transporte, nos quais se enfatiza a importância desses sistemas na gestão de recursos hídricos, ao tempo em que se discute a importância dos modelos de análise multicritério.

Finalizando o Capítulo 2 são apresentados conceitos básicos e definições da teoria dos grafos e da representação computacional de grafos. Ainda neste capítulo, associa-se a análise de redes com as soluções de problemas de transporte e os algoritmos utilizados.

Em seguida, no Capítulo 3, é descrita a metodologia para obtenção do modelo de otimização. Na sequência, são apresentados e discutidos os resultados obtidos (Capítulo 4).

Por fim, no Capítulo 5, são destacadas as principais conclusões do estudo e contribuições, bem como suas limitações, além das sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.1.1 Definição e descrição

Uma rede de abastecimento de água é um sistema de engenharia e componentes hidráulicos que incluem fontes de captação, estações de bombeamento, estações de tratamento de água, reservatórios, adutora, rede de distribuição, que inclui tubos e junções, e outros equipamentos para a gestão e manutenção (ZHANG, 2006). Esses sistemas de abastecimento de água devem permitir que comunidades, indústrias, empresas públicas e privadas de modo geral consumam água de forma confiável, eficiente e segura (FURUSAWA, 2011).

De um modo geral um sistema de abastecimento de água, segundo Tsutiya (2006) é composto de:

- Manancial: corpo de água superficial ou subterrâneo com quantidade e qualidade adequadas para captação de água para o abastecimento da população;
- Captação: conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados junto ao manancial, para retirada de água destinada ao sistema de abastecimento;
- Estação elevatória: conjunto de obras e equipamentos destinados a recalcar a água a unidade seguinte ou para pressurização em adutoras ou redes de distribuição;
- Adutora: canalizações que se destinam a conduzir água entre unidades que precedem a rede de distribuição;
- Estação de tratamento de água: conjunto de unidades destinado a tratar a água de modo a adequar as suas características aos padrões de potabilidade;
- Reservatório: é o elemento do sistema de distribuição de água destinado a regularizar as variações das vazões de adução e distribuição e condicionar as pressões de rede de distribuição;
- Rede de distribuição: parte do sistema de abastecimento de água formada

por tubulações e acessórios destinados a colocar água potável a disposição dos consumidores de forma contínua em quantidade e pressão adequadas.

A estrutura de um sistema de abastecimento de água é demonstrada na figura 2.1.

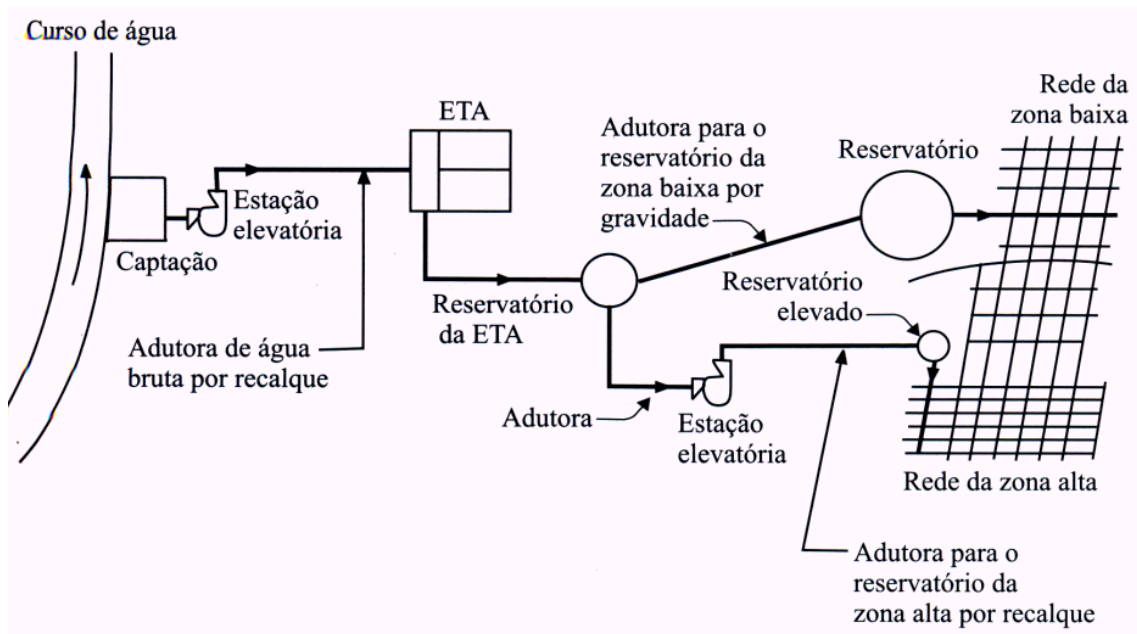


Figura 2.1. Estrutura de um sistema de abastecimento de água
Fonte: Tsutiya (2006)

2.1.2 Sistema adutor

Um Sistema Adutor (SAZERDAS, 2009) consiste de componentes que são projetados para transportar uma grande quantidade de água ao longo de distâncias consideráveis, geralmente entre as principais instalações do sistema de abastecimento de água. Nesse sistema ocorre a condução de água desde a captação até à rede de distribuição, passando pela estação de tratamento e pelo(s) reservatório(s). Essas estruturas interligam captação, estação de tratamento e reservatórios, no entanto não distribuem água aos consumidores (BARDALES, 2007).

Segundo Bahia (1998), considerando a energia utilizada, as adutoras podem ser classificadas em:

- Adutora por gravidade: dispensa o bombeamento de água, tornando-se energeticamente mais econômica, porém, depende das características topográficas locais. Esses tipos de adutoras são favoráveis energeticamente, pois não necessitam de energia elétrica para sua operação.
- Adutora por recalque ou através de bombeamento: exige um conjunto elevatório ou estação de bombeamento. A água é conduzida sob pressão de um ponto a outro mais elevado através de um conjunto motor-bomba e, conseqüentemente, com um consumo de energia associado.
- Adutora mista: é a associação das duas anteriores (gravidade e recalque). Combina trechos de escoamento por gravidade com trechos de escoamento por recalque, aproveitando, assim, os desníveis favoráveis do percurso e reduzindo o consumo de energia necessária para o bombeamento da água.

2.1.2.1 Otimização de rotas

Nessa seção faz-se uma abordagem sucinta sobre problemas de otimização ao tempo em que são descritos estudos a cerca da otimização do traçado em sistemas adutores.

2.1.2.1.1 *Problemas de otimização*

Vários problemas de estrutura similar podem ser formulados como problemas de otimização, como: o problema do menor caminho, o problema do caixeiro viajante, o problema de roteamento de veículos e o problema de localização – alocação de instalações.

O Problema do Caixeiro Viajante consiste em encontrar um roteiro ou sequência de pontos (cidades ou locais) a serem visitados exatamente uma vez, minimizando a distância total percorrida e regressando em seguida ao ponto inicial.

O problema do menor caminho é um subproblema do problema do Caixeiro Viajante. O menor caminho (ou caminho mínimo) pode não somente representar caminhos de distâncias mínimas, que é o mais comumente entendido, mas também

podem representar caminhos de tempos mínimos, custos mínimos, entre outras formas de medição de percurso.

O problema de roteamento de veículos tem como objetivo encontrar as melhores rotas (percursos) para uma frota de veículos atendendo vários pontos de visita de forma a minimizar o custo operacional global da frota (SILVA, 2009).

O problema de Localização – Alocação de instalações tem como objetivo resolver um duplo problema que é o de localizar simultaneamente instalações e atribuir pontos de demanda para essas instalações de uma forma mais eficiente (ESRI, 2012a).

Métodos de otimização são maneiras de resolver problemas caracterizados pela minimização ou maximização de uma ou mais funções objetivos em termos de uma ou mais variáveis de decisão num determinado domínio, geralmente, relacionadas a um conjunto de restrições (MARTINHAGO, 2012). Matematicamente, isto significa encontrar o valor mínimo ou máximo de uma função de n variáveis, digamos $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, onde n pode ser qualquer inteiro maior que zero, e ela pode ser irrestrita ou estar sujeita a certas restrições sobre as variáveis que a compõem (RODELLA, 2014). Um levantamento geral sobre problemas e métodos de otimização pode ser visto em Oliveira (2008) e Martinhago (2012).

Considerando a otimização de traçados e rotas, o Algoritmo de Dijkstra, desenvolvido em 1959, segundo Barroso (2014), é utilizado para a determinação de um caminho mínimo entre dois nós n_1 e n_2 de um grafo, cujos arcos têm valores (pesos) positivos. Esse algoritmo estabelece um equilíbrio através do cálculo de um trajeto que é muito próximo do caminho ótimo, computacionalmente possível de ser calculado, partindo a rede em nós e os trajetos entre esses nós sendo representados pelos arcos (SILVA, 2009).

Esse algoritmo consiste basicamente em fazer uma visita por todos os nós do grafo, iniciando no nó fixo dado e encontrando sucessivamente o nó mais próximo, o segundo mais próximo, o terceiro mais próximo e assim por diante, um por vez, até que todos os nós do grafo tenham sido visitados.

2.1.2.1.2 Otimização do traçado de sistemas adutores

O traçado de uma adutora, segundo Cordão, Lacerda e Ribeiro Neto (2012), pode fazer diferença em diversos aspectos do projeto: comprimento final da linha,

acessibilidade para operação e manutenção, quantidade e tipos de elementos de proteção a serem instalados, altura manométrica das estações elevatórias existentes ao longo do sistema, entre outros. Isso pode implicar em diferenças significativas no custo final do projeto, considerando, além da implantação, a operação e a manutenção.

Os seguintes aspectos, de acordo com Tsutiya (2004), têm importância na determinação final de custo de construção, operação e manutenção de uma adutora: traçado mais direto; evitar ou procurar contornar acidentes geográficos ou obstáculos naturais mais críticos e de difícil travessia (rios, grotas ou grandes depressões, cumes de morros, etc.); aproximar-se de estradas que facilitem sua implantação e manutenção futura; procurar sempre terrenos com melhores condições de solo, evitar solos rochosos, alagadiços e de baixa resistência; evitar situações em que a linha de transmissão de energia corte a linha do terreno; procurar usar terrenos públicos para minimizar problemas com desapropriação.

Entre os diversos trabalhos pesquisados nesse estudo foram identificadas propostas de dimensionamento ótimo de linhas adutoras. A maioria deles tem como objetivo principal dimensionamento através de análises hidráulicas e não consideram o traçado, diferentemente dos propósitos desse estudo, como uma variável da função objetivo a ser otimizada. Exemplos dessas propostas estão presentes em Gomes (2004) e Silva, Vieira e Haie (2003).

No entanto, foram identificados alguns estudos cujo objetivo principal é a seleção de traçados (rotas) através de metodologias baseadas em SIG (LUETTINGER e CLARK, 2005; CROSS, MORAN e STAM, 2007; HARDIN, BRIDGES e RUNDELI, 2008; SALAH e ATWOOD, 2011).

No trabalho de Luettinger e Clark (2005), desenvolve-se um processo de seleção de rota baseado em SIG e análise de redes, dentre diversas alternativas particulares a uma região. Esse sistema liga as cidades americanas de *Salt Lake* e *Sandy* para a transmissão de água através de tubos de grande diâmetro (1524 mm). O processo de seleção de rota foi baseado em questões gerais relacionadas aos custos de construção, disponibilidade de terra e preocupações com as comunidades envolvidas, através de uma metodologia de exclusão de rotas em três níveis de acordo com os interesses particulares dessas comunidades e autoridades responsáveis. Segundo os autores, a tecnologia SIG é ideal para um estudo de seleção de rota de adutoras devido à quantidade extremamente grande de dados

que precisam ser gerenciados em um projeto dessa natureza. Ainda de acordo com esses autores, alguns dos dados usados no estudo se referem a estradas, canais, altitudes, parcelas de propriedade de terra, além de fotografias aéreas e informações de zonas sísmicas.

O SIG e as ferramentas de análise de rede, no trabalho de Luettinger e Clark (2005), foram usados para determinar as rotas (traçados) e para comparar o comprimento e os custos associados de cada rota de forma a permitir uma classificação das alternativas e, finalmente, reduzir o estudo a um traçado final para a adutora.

O trabalho de Cross, Moran e Stam (2007) apresenta um modelo baseado em SIG para auxiliar na identificação de uma rota adequada da adutora para conectar uma estação de bombeamento em Guelph para o Lago Erie, no Canadá. Utilizando a ferramenta *ArcMap* do software ArcGis, os autores desenvolvem uma avaliação multicritérios para gerar uma camada de custo, que foi então usada em uma análise de caminho de menor custo para identificar a rota (traçado) mais adequada para a adutora. A restrição neste modelo, segundo os autores, é o cruzamento de zonas úmidas. Os outros fatores (critérios) incluem a classificação de terras, declividade, profundidade de obstáculos e os cruzamentos de estradas, rios e linhas ferroviárias. Os resultados identificaram a rota mais adequada de Guelph para o Lago Erie. A metodologia usada neste trabalho levou em conta a dimensão espacial para avaliar os impactos na determinação da rota, permitindo assim uma análise espacial dos efeitos cumulativos e de distribuição espacial dos impactos. De forma análoga, no estudo aqui apresentado, será proposta uma metodologia para a construção de um modelo de otimização multicritério para locação do traçado de adutoras, considerando uma área de aptidão para esse traçado (camada de custo) baseada em critérios específicos estabelecidos neste estudo.

Em Hardin, Bridges e Rundeli (2008) apresenta-se estudo de caso de um processo de avaliação e seleção de rotas para uma adutora de água próxima a uma grande área metropolitana no centro do Texas, Estados Unidos. Um programa de análise de decisão foi usado na avaliação de quatro rotas alternativas, com comprimento variando de 8.500 a 12.800 metros aproximadamente. A metodologia, que também é baseada numa análise multicritério através de SIG, foi utilizada para estabelecer um sistema de classificação quantitativa de rotas e para desenvolver uma classificação imparcial da importância de cada critério. Entre os critérios estão:

passagem de rodovias, topografia, corredores de construção relativamente estreitos e congestionados, cruzamento de lago e bairros suburbanos.

O artigo discutido em Salah e Atwood (2011) trata de um aplicativo baseado em SIG e Análise de Redes para analisar e classificar um número de rotas potenciais para adutoras de água, canalizações para transporte de gás, óleo, ou outros fluídos, implementando assim um processo de otimização dessas rotas. O aplicativo usa uma linguagem de *script* chamada *Visual Basic para Aplicação* (VBA), a ferramenta ESRI *ArcObjects* e o módulo *Network Analyst* do ArcGis para estruturar e analisar a rede de tubos desses sistemas com base em pesos e custos acumulados de segmentos individuais de tubos, consistindo portanto numa análise vetorial. A aplicação foi usada em um caso de teste no oeste dos Estados Unidos. Segundo os autores, na metodologia aplicada, os fatores de influência usados para a seleção de uma rota estão relacionados a três critérios básicos cada um com uma importância em porcentagem: 1) restrições de projeto: como tempo de construção e conflitos; 2) restrições sócio-econômicas, como impactos residenciais e nos negócios; 3) custos com construção, materiais, aquisição de terrenos e de operação e manutenção. Cada um deles tem sua importância considerada por meio de porcentagens, e alguns com uma carga bastante subjetiva.

Pode-se perceber que no trabalho de Salah e Atwood (2011) a análise de rede desenvolvida também tem como objetivo a solução de um problema de rede que é a determinação de rotas (traçados) para comparar o comprimento e os custos associados de cada rota.

Ainda com relação aos trabalhos pesquisados, foi possível identificar outros estudos que se utilizam das ferramentas de SIG para a geração de rotas otimizadas através de análise espacial multicritério ou de analistas de rede, a exemplo do que é proposto neste trabalho. No entanto, nestes estudos as metodologias empregadas se destinam à otimização de rotas para o transporte de gás natural ou óleo. É de consenso geral que essas metodologias podem perfeitamente ser adaptadas para a determinação de rotas em outras estruturas lineares da engenharia como adutoras e canais, por exemplo, levando em consideração os critérios específicos para cada caso.

No trabalho de Yildirim e Yomralioglu (2011), que tem como Área de Estudo a região de desenvolvimento do Projeto Nabucco, é apresentado um modelo baseado em SIG para auxiliar na seleção de uma rota otimizada de um gasoduto para

transporte de gás natural. O Projeto da Linha de Transmissão de Gás Natural (*Natural Gas TransmissionLine Project – NGTP*), o Projeto Nabucco, é um novo gasoduto que começará na fronteira oriental da Turquia e conectará a região da oriente médio via Turquia, Bulgária, Romênia, com Hungria, Áustria e outros países com mercados de gás natural da Europa central e ocidental. Nessa implementação foi utilizado o módulo *Spatial Analyst do ArcGis* para o desenvolvimento da análise multicritério. Segundo os autores, os planos de informação gerados e integrados por técnicas de geoprocessamento e depois usados como variáveis consistem em: riscos de deslizamento de terra, declividade, geologia, rios, lagos, estradas de ferro, altitude, estradas, cultura e áreas protegidas. Em consequência disso foi possível gerar uma superfície de custo que leva em consideração todos os critérios associados a estas variáveis. Para efeitos de aplicação do modelo proposto considerou-se o trecho entre as cidades de Ancara e Canakkale na Turquia. A rota proposta no projeto tem uma extensão de 603 km de comprimento. Nesse estudo, o caminho encontrado usando técnicas de geoprocessamento e denominado como a melhor rota, apresentou um comprimento de apenas 557 km de comprimento, com uma diferença de 46 km em consideração à rota proposta. Para os autores o modelo permitiu calcular a rota mais curta possível considerando os custos associados e os critérios estabelecidos, o que, eventualmente, reduz o custo e o tempo de execução do projeto e, portanto, as despesas operacionais.

Foi possível perceber na descrição dos trabalhos citados acima, que eles realizam, de acordo com as metodologias aplicadas, uma análise espacial multicritério (com base em *pixel raster*), onde são geradas imagens matriciais, ou uma análise de rede (com base em análise vetorial para solução de problemas de rede).

É necessário ressaltar, a dificuldade quanto à pesquisa por trabalhos relacionados ao tema desse estudo, pois verificou-se que não são muitos os trabalhos publicados, e que não há uma grande variedade de estudos de caso. É importante dizer ainda que outros textos pesquisados não foram descritos por terem caráter análogo e metodologias semelhantes aos que foram acima descritos, embora tenham sido desenvolvidos para diferentes soluções de engenharia. Essas pesquisas podem ser vistas em (PRIMAHARDHIKA, 2007; BALOGUN, MATORI, LAWAL e IMTIAZ, 2012; BRUCE, 2013; HUSEYNLI, 2015; DRAGAN e JARRE, 2015).

Diante do exposto, conclui-se que, a seleção de rotas para o traçado de adutoras não pode ser desenvolvida apenas com base na opinião subjetiva dos projetistas, como aponta Rizkalla (2008), onde são considerados apenas os conhecimentos desses profissionais acerca das condições atuais e as restrições em uma determinada área. É necessário que se utilizem os avanços atuais das tecnologias de SIG, que estão permitindo que profissionais de engenharia possam determinar o caminho de menor custo entre os pontos de origem e destino do traçado de uma adutora.

O *Spatial Analyst*, que faz parte do software *ArcGis* da ESRI, por exemplo, é uma extensão que possibilita definir regiões de melhor caminho (menor custo) entre uma origem e um destino (que pode ter vários pontos), e consequentemente permite a construção de modelos de otimização capazes de determinar os locais mais adequados para locação do traçado de adutoras, apontando assim alternativas de projeto, através da simulação de rotas.

2.2 GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE ESPACIAL

2.2.1 Definições e conceitos básicos

Pode-se entender geoprocessamento como sendo um conjunto de ciências, técnicas e tecnologias utilizadas para aquisição, processamento, armazenamento e publicação de dados e informações espacialmente explícitas (ORNELAS, 2011). A análise espacial, de acordo com Câmara (1995), permite mensurar as propriedades e relacionamentos, levando em conta a localização espacial do fenômeno em estudo, de forma explícita.

Estudos baseados em geoprocessamento e análise espacial têm se tornados mais frequentes devido à disponibilidade e avanços dos SIGs. Esses sistemas permitem a visualização espacial de variáveis através de mapas.

Os SIGs, segundo Burrough (1986), correspondem a um conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real. Esses sistemas permitem que a informação utilizada seja confiável, íntegra e de fácil utilização em todos os seus níveis: inserção de dados pelos responsáveis pela coleta dos mesmos; armazenamento e gerenciamento dos dados pela equipe técnica competente; manipulação dos dados pelos gestores que

de fato utilizarão o sistema como ferramenta de apoio no processo de tomada de decisão gerencial. De acordo com Silberschatz et al. (2011), os SIGs, são bancos de dados com o propósito de armazenar dados geográficos, como por exemplo, mapas rodoviários, mapas topográficos de elevação, mapas de uso da terra, mapas políticos mostrando limites e mapas de propriedade da terra.

Bases de dados, tais como bases de dados de Informações meteorológicas, são tridimensionais, uma vez que as temperaturas e outras Informações estão relacionadas a pontos espaciais tridimensionais. Em geral, banco de dados espaciais armazenam objetos que possuem características espaciais que os descrevem e as relações espaciais entre eles (ELMASRI e NAVHATE, 2011).

Um SIG, segundo Ferreira (1997), pode ser considerado um instrumento que permite mapear e dar respostas às várias questões sobre planejamento urbano e regional, meio rural e levantamento dos recursos renováveis, descrevendo os mecanismos das mudanças que operam no meio ambiente, e auxiliando no planejamento e manejo dos recursos naturais de determinadas regiões. Os SIG são capazes de armazenar tanto os atributos descritivos como o aspecto geométrico dos dados geográficos (CÂMARA, 1995). Nesse sentido, uma estação de tratamento que compõe um sistema de abastecimento de água modelado através de um SIG, guarda, além das informações técnicas descritivas de sua operação, também a informação geográfica por meio de coordenadas.

A Figura 2.2 ilustra a arquitetura de SIGs que são compostos por vários subsistemas que possibilitam a inserção, integração e combinação de informações espaciais, bem como a consulta, recuperação e visualização do conteúdo da base de dados geográfica.

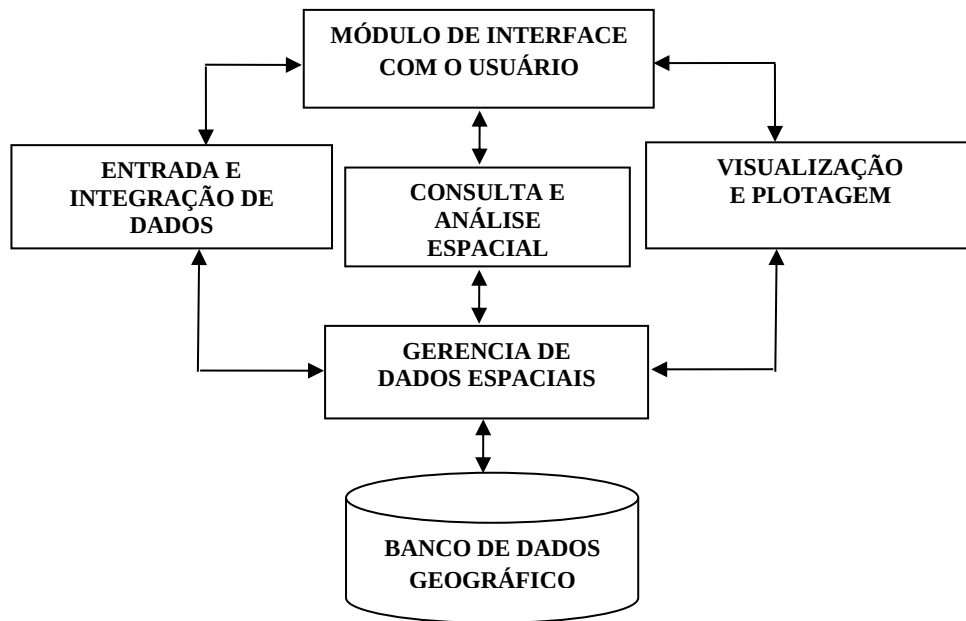


Figura 2.2 - Arquitetura de sistemas de informações geográficas.
Fonte: Druck et al. (2004).

2.2.2 Modelagem e representação de dados geográficos

A modelagem e representação de dados de SIG consistem em requisitos de bancos de dados que permitem representações computacionais do espaço geográfico. Esse processo se caracteriza como uma espécie de mapeamento da realidade para o computador. O paradigma dos quatro universos adaptado para a geoinformação por Casanova et al. (2005), é compreendido por um conjunto de quatro passos, segundo os quais ocorre uma tradução da informação geográfica para o computador:

- Universo ontológico: em que estão incluídos os conceitos da realidade a serem representados no computador. Exemplos: tipos de solo, elementos de cadastro urbano e caracterização das formas do terreno.
- Universo formal: inclui modelos lógicos ou construções matemáticas que generalizam os conceitos do universo ontológico. Essas abstrações incluem modelos de dados e álgebras computacionais. Exemplos: o modelo entidade-relacionamento e o modelo OMT (*Object Modeling Technique*) ou Técnica de Modelagem de Objetos.

- Universo estrutural: as entidades dos modelos formais são mapeadas para estruturas de dados geométricas e alfanuméricas, e algoritmos que realizam operações. Essas estruturas são divididas em vetoriais e matriciais (*raster*).
- Universo de implementação: é realizada a implementação dos sistemas, no quais arquiteturas, linguagens e paradigmas de programação são escolhidos. Algumas questões de implementação estão relacionadas à geometria computacional, métodos de acesso e processamento de consultas.

De acordo com o conjunto de passos descritos, o universo formal se situa entre o universo ontológico e o universo estrutural e inclui modelos formais de dados geográficos. Entre esses está o modelo em rede, no qual o espaço geográfico é compreendido como um conjunto de pontos no espaço (nós), conectados por linhas (arcos), onde tanto os nós quanto os arcos possuem atributos (CASANOVA et al., 2005). Esses modelos têm sido utilizados em grande escala e variadas situações: representação de dutos, sistemas de distribuição de água, programação de veículos, comunicação, eletricidade, aplicativos de mapas dentre outros (PALLAVICINE, 2001). Modelos de redes têm base matemática na Teoria dos Grafos, que será apresentada na Seção 2.3, momento em que será discutida também a Análise de Redes.

2.2.3 SIG e a gestão de recursos hídricos

As vantagens da utilização de um SIG, de um modo geral, são inúmeras, e vão desde o acesso fácil e ágil, até o cruzamento e centralização de informações em um único lugar garantindo assim a integridade, confiabilidade e disponibilidade da informação (SILBERSCHATZ et al., 2011). Para o gerenciamento de recursos hídricos não é diferente, embora a complexidade da informação nessa área seja bastante considerável, dado o seu caráter, envolvendo uma grande quantidade de sistemas físicos naturais ou criados e imensa quantidade de variáveis que precisam ser monitoradas, cadastradas e processadas.

Os SIGs têm sido bastante utilizados como ferramentas auxiliares no gerenciamento de recursos hídricos. Esses sistemas podem reunir dados e informações para auxiliar processos como:

- Cadastro de usuários de água;
- Situação de solicitações e concessões de outorga;
- Monitoramento da quantidade e da qualidade da água;
- Monitoramento hidrometeorológico, através de redes de coleta de dados;
- Mapas e cartogramas para auxiliar a gestão dos recursos hídricos;
- Diagnóstico da situação atual e geração de cenários dos recursos hídricos;
- Sistemas de alerta em situações de eventos extremos;
- Estudos, programas e projetos relacionados aos recursos hídricos, dentre outros.

Diante disso, um SIG, considerando que os dados e informações citados são de grande importância no gerenciamento de recursos hídricos, mostra-se como uma ferramenta que, se utilizada de forma adequada, pode ser de extrema utilidade na gestão desses recursos, proporcionando uma otimização no uso dos mesmos, e auxiliando na tomada de decisão gerencial.

A Lei 9433/97, a chamada Lei das Águas do Brasil (BRASIL, 1997), bem como as leis estaduais sobre o assunto têm capítulos que determinam a criação e manutenção dos Sistemas de Informações sobre os Recursos Hídricos (SIRH). Como não poderia deixar de ser, todo o desenvolvimento é estruturado a partir de SIG (ou deverá ser, visto que muitos estados ainda não desenvolveram essas ferramentas).

No que diz respeito a programas de geoprocessamento, duas plataformas se destacam mundialmente, uma de software proprietário, ArcGis, e outra enquadrada na categoria de software livre, o Quantum Gis ou QGIS. O QGIS é um Sistema de Informação Geográfica de Código Aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. O QGIS é um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Funciona em Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android e suporta inúmeros formatos de vetores, rasters e bases de dados e funcionalidades. O programa apresenta avanços constantes em suas funcionalidades, pela quantidade de pesquisadores que agregam produtos ao mesmo. Porém, quando comparado ao

principal concorrente, ainda existem funcionalidades importantes a preencher. Mais detalhes podem ser encontrados no website da comunidade de usuários QGIS Brasil (qgisbrasil.org).

2.2.3.1 O software ArcGis

O ArcGIS é um exemplo de software usado na gestão de recursos hídricos. Este *software* pertence à família ESRI (*Environmental Systems Research*) e inclui duas aplicações integradas que constituem um SIG: o *ArcCatalog* e o *ArcMap*. Por meio de qualquer uma dessas aplicações pode-se acessar o *ArcToolbox* e as interfaces de geoprocessamento.

O *ArcCatalog* permite acessar, organizar e gerenciar os dados geográficos. Possui ferramentas para explorar e pesquisar informação geográfica, gravar e visualizar metadados, bem como a visualização rápida de qualquer conjunto de dados (SANTOS, LOUZADA e EUGÊNIO, 2010).

O ArcMap de acordo com Cordão, Lacerda e Ribeiro Neto (2012) é um SIG vetorial não topológico, ou seja, manipula, exclusivamente, informação geográfica arquivada de acordo com o modelo de dados vetorial, embora possa suportar informação em formato matricial ou *raster*. O Spatial Analyst® é a extensão do ArcMap que o habilita como “SIG *raster*” e disponibiliza as funções específicas para tratamento de planos de informações neste formato (ESRI, 2012c). O 3D Analyst® segundo Cordão, Lacerda e Ribeiro Neto (2012) é a extensão do ArcGIS que realiza análises espaciais vetoriais, inclusive tridimensional e geração de grades irregulares (TIN - Triangular Irregular Network).

A extensão *Spatial Analyst* fornece uma gama ampla de capacidade de modelagem e análise espacial. Segundo Esri (2012c) é possível criar, consultar, mapear e analisar dados *raster* baseado em células; realizar a análise de *raster*/vetor integrado; derivar novas informações a partir de dados existentes; consultar informações através de múltiplas camadas de dados; e integrar plenamente dados matriciais baseados em células com fontes de dados tradicionais (vetores)..

O *Network Analyst* é a extensão do ArcGIS desenvolvida para criar, gerir e analisar redes de transportes (ESRI, 2012a). Essa extensão incorpora um modelo avançado de conectividade que representa com grande exatidão redes de transportes multimodais, permitindo simular percursos inteligentes em cenários tão

complexos como redes de transportes, onde se cruzam num mesmo ponto tubulações em uma adutora de água, por exemplo.

O *ArcGIS Network Analyst* permite, por exemplo, delinear percursos otimizados com base no tempo ou no espaço percorrido, indicar direções de percursos, fazer um levantamento das instalações e serviços mais próximos e definir áreas de serviço (SILVA, 2009).

2.2.4 Modelos de análise multicritério

Os modelos obtidos através da análise multicritério envolvem um grande número de variáveis que exigem um sistema de avaliação apropriado, de forma que seja possível analisar a influência e contribuição de cada uma dessas variáveis (GOMES, ALMEIDA e GOMES, 2002).

As variáveis relacionadas aos modelos podem ou não ser espacializáveis. No caso de variáveis espacializáveis, elas podem ser representadas e distribuídas no espaço geográfico. O modelo desenvolvido nesta pesquisa é necessariamente espacializável, ou seja, significa que sua caracterização se faz por planos de informação (variáveis) georeferenciados, representados na forma matricial (*raster*), na qual há um referencial geográfico (sistema de coordenadas) que define a localização de qualquer ponto na base de dados.

Segundo Ornelas (2011), as metodologias dos modelos de análise multicritério baseiam-se no cruzamento dos planos de informação através de *softwares* específicos que permitem a realização de procedimentos para a realização de diagnósticos e prognósticos. A influência ou grau de importância de um plano de informação é determinado através de um peso (percentual de influência) relativo ao fenômeno em estudo.

Alguns dentre os diversos métodos usados para atribuição de pesos às variáveis estudadas, são: o método Delphi (ORNELAS, 2011), o método de Análise Hierárquica de Pesos (AHP) (SANTOS, LOUZADA e SILVA, 2010) e os métodos baseados em análises estatísticas. A seguir, são apresentadas noções gerais dos métodos Delphi e AHP, por serem utilizados neste trabalho.

Segundo Linstone (2002, *apud* ORNELAS, 2011) o método Delphi procura buscar um consenso, o mais confiável possível, a partir das opiniões de um grupo de especialistas, por meio de uma série de questionários, entremeados por informações

sistematizadas que retroalimentam os especialistas. Uma vez que os questionários são respondidos, os dados são tabulados e analisados através de parâmetros estatísticos como a moda, média, mediana, entre outros, de forma que a análise deve identificar um grau satisfatório de convergência para as respostas.

Na Tabela 2.1 é apresentado um exemplo de ponderação e atribuição de graus de influência (pesos) para a “avaliação de riscos à inundação” num determinado local descrito em (SANTOS, LOUZADA e SILVA, 2010). As variáveis escolhidas foram: altitude, declividade, uso do solo e tipo de solo.

Tabela 2.1: Ponderação e padronização na avaliação de riscos à inundação.

Variáveis	Pesos	Componentes dos temas	Valores
Altitude	26%	800 – 820	10
		820 – 840	9
		840 – 860	8
		860 – 880	7
		880 – 900	6
		900 – 1000	5
		1000 – 1500	3
		1500 – 1900	2
Declividade(%)	56%	0% – 3%	10
		3% – 8%	9
		8% – 20%	5
		20% – 45%	3
		45% – 75%	1
		>75%	1
Uso do Solo	12%	Afloramento/Solo exposto	7
		Agricultura	8
		Floresta natural/Sombra	1
		Floresta natural primária ou secundária avançada ou média	1
		Floresta plantada em crescimento	2
		Pastagem	9
		Pastagem/Sombra	9
		Rios	10
Tipo de Solo	6%	Vegetação natural secundária	1
		Terra roxa	4
		Cambissolos	3
		Latossol	4
		Litólicos e rochas	10

Fonte: Adaptado de Santos, Louzada e Silva (2010).

O método de Análise Hierárquica de Pesos (AHP) é um método para auxiliar as pessoas na tomada de decisões complexas. Este método foi desenvolvido por Saaty (1977, *apud* LOPES, COELHO e LIBÂNEO, 2011) e constitui-se em uma

técnica de auxílio multicritério à decisão, utilizada na definição de prioridades e na escolha da melhor alternativa, podendo ser considerados aspectos quantitativos e qualitativos.

No método AHP, a estruturação do problema deve acontecer em uma hierarquia, que deve ser organizada de forma que no nível superior esteja o objetivo, e nos níveis seguintes os critérios, subcritérios e alternativas.

Os passos a serem trilhados para a aplicação do método, segundo Lopes, Coelho e Libâneo (2011) baseiam-se em:

- definir o problema e determinar o tipo de conhecimento pretendido;
- estruturar uma hierarquia;
- construir um conjunto de matrizes de comparação paritária;
- determinar a consistência dos julgamentos.

Este método utiliza uma matriz de comparação (matriz de decisão) par a par, que por sua vez se baseia na escala fundamental de Saaty (Tabela 2.2), na qual se pode definir linearmente a hierarquia de importância entre os critérios pré-definidos.

Tabela 2.2. Escala de Comparação.

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

Fonte: Saaty (1977, *apud* ROSOT, 2000).

A matriz de comparação da Tabela 2.3, baseada na escala de comparação (Tabela 2.2), foi construída de forma que cada elemento da matriz indica o quanto o fator da coluna da esquerda é mais importante, com relação a cada fator correspondente na linha superior. Um fator confrontado com ele mesmo tem valor 1 (um), pois tem a mesma importância. Como todos os fatores se entrecruzam uma vez, a matriz passa a ser apenas um espelho, ou inverso do procedimento inicial.

A matriz de comparação par a par mostrada na Tabela 2.3, se refere a um modelo para avaliação de risco de inundação em um determinado lugar (SANTOS, LOUZADA e SILVA, 2010).

Tabela 2.3 - Matriz de comparação par a par.

Critérios	Tipo de solo	Uso do solo	Altitude	Declividade
Tipo de solo	1	1/3	1/5	1/7
Uso do solo	3	1	1/3	1/5
Altitude	5	3	1	1/3
Declividade	7	5	3	1

Fonte: Santos, Louzada e Silva (2010).

Os pesos estatísticos para cada variável são calculados usando os valores da Tabela 2.3. Os valores dos pesos são calculados quando na Tabela 2.3 dividimos cada elemento da tabela pelo somatório dos elementos da coluna a que ele pertence. Na sequência calculamos a média aritmética entre as colunas, obtendo assim os pesos. Após a definição dos pesos, devemos determinar os índices de consistências das variáveis (Capítulo 3- Seção 3.2.3.4.1). Essas variáveis devem ser comparadas entre si utilizando-se lógicas de análise e integração. Em análise espacial as principais lógicas utilizadas são: a lógica booleana e a lógica *fuzzy* (ORNELAS, 2011).

A lógica booleana é aquela que atribui o valor 0 (falso) ou 1 (verdadeiro) para as respectivas variáveis em análise. Apesar de prático esse método normalmente não é o mais adequado, pois é esperado que as variáveis com influências relativas diferentes tenham pesos diferentes e não sejam tratadas de maneira igual (0 ou 1).

A outra forma é a lógica *fuzzi*, também chamada de lógica Nebulosa. Segundo Ornelas (2011) na lógica *fuzzi* os valores de uma determinada variável são

expressos em uma escala contínua dentro de um intervalo estabelecido (escala de avaliação), de 0 a 1, por exemplo. A lógica *fuzzy* é bastante utilizada para a normalização (padronização) de variáveis presentes num modelo multicritério. Esta padronização consiste na transformação de unidades de medidas diferentes numa única base de comparação, permitindo assim a comparação entre duas ou mais variáveis distintas (ESRI, 2012a).

Para ilustrar essa situação observemos a utilização da variável “Declividade”, apresentada na Tabela 2.1 e selecionada para a avaliação de “riscos à inundação”. Se fosse tomada uma decisão usando a lógica booleana a região estudada receberia a nota 10 (maior risco), caso esteja contida numa faixa de 0% a 45% previamente definida, e receberia a nota 0, caso não esteja inserida nessa faixa. Assim o risco para valores de declividade igual a 0% é o mesmo que para 45%. No entanto, é razoável a hipótese de que a região com declividades entre 0% e 3% possui maior risco à inundação do que uma com declividades superiores a 45%.

Levando em conta essa questão, se os valores fossem atribuídos continuamente num intervalo, através, por exemplo, de uma função linear do tipo $f(x) = mx + n$, seria garantida a coerência, considerando uma avaliação real de riscos à inundação. Funções como as descritas, quando utilizada para a normalização ou padronização de pesos atribuídos às variáveis, são chamadas de funções de pertinência. As funções de pertinência mais utilizadas em lógica fuzzy são: função sigmoidal decrescente, função sigmoidal crescente, função sigmoidal simétrica, função linear e funções em forma de J (*J Shapped*) (SAMIZAVA et al., 2008 *apud* ORNELAS, 2011).

2.2.5 O Uso de bases de bases de dados espaciais

Na sequência é feita uma descrição sucinta sobre as bases de dados espaciais usadas no desenvolvimento deste trabalho.

2.2.5.1 Base de dados SRTM/TOPODATA

A base de dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission* - Missão Topográfica Radar Shuttle) é resultado de uma cooperação, de diversas instituições

internacionais, entre elas, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), em fevereiro de 2000. Esse projeto, segundo Cirilo et al. (2014a) ocorreu pela necessidade de se obter uma base altimétrica global confiável.

Em decorrência da missão SRTM, foram disponibilizados publicamente para o caso do continente Sul Americano modelos tridimensionais com células de 90 metros (MICELI et al., 2010). Essa base de dados disponibilizada é conhecida como SRTM-90, pois os pontos cotados estão espaçados aproximadamente 90 m entre si. Considerando essa base, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do projeto TOPODATA, realizou um trabalho de preenchimento de falhas e interpolação, o que deu origem à base de dados espaciais de todo o território nacional equivalente, segundo os autores, à base de dados SRTM com pontos cotados a cada 30 m (VALERIANO, 2008).

Um dos produtos gerados a partir da base de dados SRTM/TOPODATA são os modelos digitais do terreno (MDT). Segundo Elmiro (2007), esses modelos são definidos como sendo a representação matemática da distribuição contínua do relevo dentro de um espaço de referência, armazenada em formato digital adequado para utilização em computadores. Uma variável que pode ser estimada a partir de modelos digitais de elevação é a declividade. Em modelos digitais de elevação, sua estimativa se baseia na análise dos desníveis entre *pixels* vizinhos (VALERIANO, 2008).

2.2.5.2 Bases de dados espaciais de alta definição (o programa Pernambuco tridimensional)

A precisão altimétrica da base global SRTM não atende aos requisitos de precisão demandadas para muitos estudos e projetos, como os destinados, por exemplo, à implantação de infraestrutura e ações de previsão e controle de inundações que necessitam do uso de bases de dados espaciais de alta definição (CIRILO, 2014a).

Bases de dados de alta definição podem ser obtidas através da tecnologia denominada LiDAR (*Light Detection And Ranging*) que se utiliza de sensores. Segundo Liu, Peterson e Zhang (2005), a aquisição de dados ocorre através de uma técnica que usa aeronaves para uma varredura a laser do terreno, onde sensores são capazes de estimar a distância dos objetos ao seu redor em diversas direções

(em duas ou três dimensões). O equipamento emite um feixe de luz laser que atinge um obstáculo e retorna ao sensor. O recobrimento laser gera uma nuvem de pontos com distribuição irregular que, após pós-processamento, permite a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT) e de Elevação (MDE).

O programa Pernambuco Tridimensional (SHRE - PE, 2014), desenvolvido pela Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco (e suas sucessoras Secretaria de Infraestrutura e Secretaria de Desenvolvimento Econômico) entre março de 2014 e dezembro de 2017 teve como objetivo maior gerar uma base de apoio às ações de gestão territorial. Este programa levantou, para todo o território pernambucano, pontos cotados e imagens aéreas de modo a produzir ortofotos na escala 1:5.000 e Modelos Digitais do Terreno e Elevação (MDT's e MDE's) obtidos por meio de perfilamento laser com erro altimétrico melhor que 25 cm (CIRILO et al., 2015) através da tecnologia LiDAR. Para as principais cidades do estado de Pernambuco foi realizado mapeamento mais preciso, equivalente à escala 1:1000. O resultado é uma base de dados com cerca de 80 bilhões de pontos cotados, que está sendo gradualmente disponibilizada pela internet na medida em que os dados são validados (www.pe3d.pe.gov.br).

A distribuição de áreas com produtos disponíveis pelo programa Pernambuco Tridimensional, em agosto de 2015 é demonstrada na Figura 2.3.

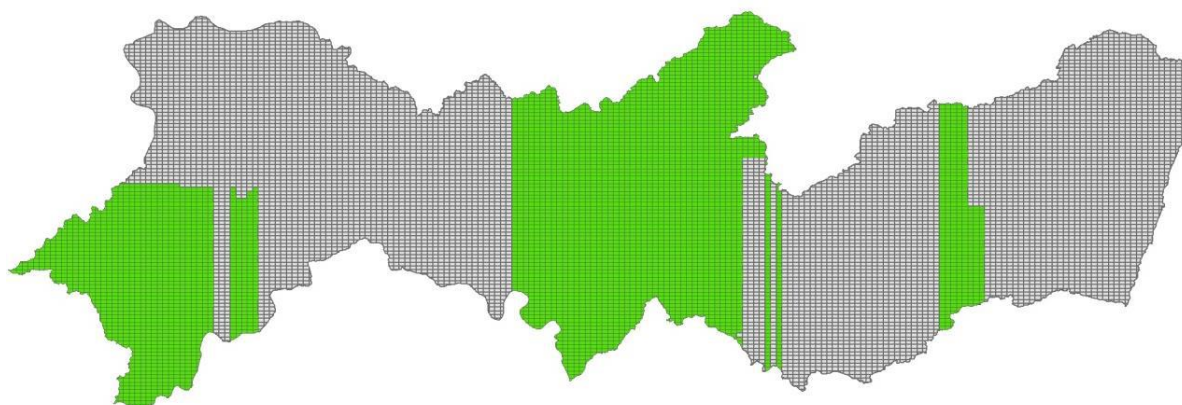


Figura 2.3 Distribuição de áreas com produtos disponíveis em agosto de 2015:



Produtos Disponíveis



Produtos Indisponíveis

Fonte: Cirilo et al. (2015).

Ainda segundo Cirilo et al. (2015), os produtos altimétricos do perfilamento laser devem ser analisados em duas condições:

- A primeira consiste na amostragem de todos os pontos que retornam após a emissão do feixe de luz. Esses pontos formam o MDE e são fornecidos num arquivo “.x,y,z,i” que contém três coordenadas e o percentual de intensidade do retorno de luz. Esse conjunto de pontos representa todos os alvos da superfície como edifícios, pontes, vegetação e corpos d’água.
- Na segunda situação é utilizado um algoritmo de classificação para filtrar os pontos correspondentes aos alvos citados. Esses pontos formam o MDT e são fornecidos num arquivo “.x,y,z” que contém apenas as três coordenadas dos pontos que representam efetivamente a superfície do terreno. Cabe salientar que os dados laser coletados não obtêm informações abaixo do nível d’água de rios e reservatórios, havendo baixa precisão da cota de qualquer lâmina de água.

A nuvem de pontos para representação de cada modelo é processada e convertida para arquivos de imagens *geotiff* com resolução espacial de 1 m.

2.3 A TEORIA DOS GRAFOS E A ANÁLISE DE REDES

Nesta seção são abordados conceitos e definições da Teoria dos Grafos e de Redes com o objetivo de apresentar um conjunto de termos que, devido à difusa literatura sobre as temáticas em vários domínios científicos e técnicos, resulta em falta de consenso no uso dos termos. Nesse sentido, pretende-se garantir coerência e evitar ambiguidades no que se refere aos termos que são usados e que são considerados indispensáveis para o correto entendimento deste texto.

2.3.1 Teoria dos grafos

A Teoria dos Grafos tem sua aplicação para além da matemática e da resolução de problemas como o do caixeiro-viajante e árvores geradoras mínimas. Diversas outras ciências e áreas do conhecimento, como Química, Informática, Economia, Geografia, Biologia e Engenharia têm usado essa teoria em seus estudos (MACKANESS e BEARD, 1993; SOUSA, 2010).

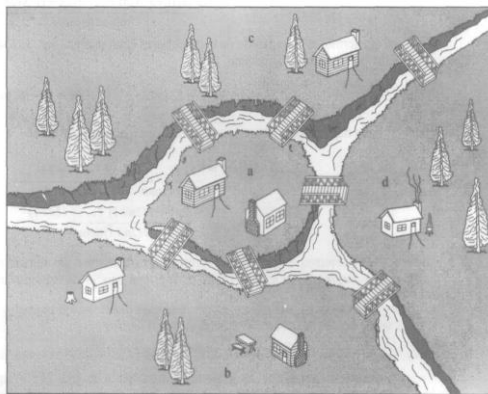
Uma representação de qualquer rede de transporte (como um mapa rodoviário), linhas de comunicação (uma rede de computadores, por exemplo), ou

rotas de distribuição de produtos ou serviços tal como dutos de transporte de gás natural ou água resulta em um grafo. A estrutura química de uma molécula é representada na forma de um grafo (GERSTING, 2004).

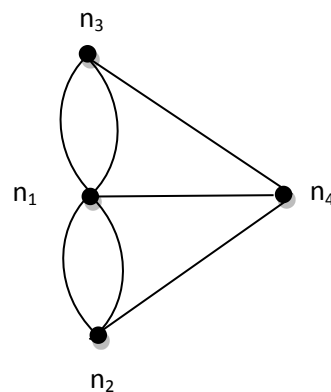
Os grafos têm desempenhado um papel importante nos SIG desde os primórdios. A razão era o grande interesse no armazenamento de dados de mapas (ou dados cartográficos). Estruturas de dados iniciais para a representação dos dados espaciais, predominantemente bidimensional, são baseadas quase que exclusivamente em grafos planares (KAINZ, 2010). As redes devem ser armazenadas como um grafo orientado (CÂMARA, 2005).

O problema que deu início à teoria dos grafos foi uma questão espacial, e está relacionado ao matemático suíço Leonard Euler (1736) e o Problema das 7 (sete) pontes de Königsberg (DEO, 1974; GERSTING, 2004; KAINZ, 2010; SOUSA, 2010; BUCKLEY e LEWINTER, 2013; RAY, 2013).

Na cidade de Königsberg havia duas ilhas próximas no meio da cidade, cruzadas por sete pontes (Figura 2.4a). Segundo Deo (1974) o matemático suíço Leonhard Euler (1707 – 1783), em 1736, se perguntou se havia uma maneira de fazer um circuito fechado (sair e voltar para um mesmo lugar), cruzando cada uma das pontes apenas uma vez. Ele construiu um grafo equivalente (Figura 2.4b) e demonstrou que o problema não tinha solução. Entretanto, trouxe uma contribuição ao determinar as condições necessárias para que um problema desse tipo tivesse solução.



(a)



(b)

Figura 2.4 – As sete pontes de Königsberg e o grafo equivalente.

Fonte: Adaptado de Gersting (2004).

2.3.1.1 Conceitos básicos e definições

Um grafo é uma tripla ordenada $(\mathbf{N}, \mathbf{A}, \mathbf{f})$ onde $\mathbf{N}$ é um conjunto não-vazio de nós (vértices ou nodos), $\mathbf{A}$ é um conjunto de arestas (arcos) e $\mathbf{f}$ uma função que associa a cada aresta $\mathbf{a}$ um par não-ordenado x - y de nós, chamados de extremos de $\mathbf{a}$. A Figura 2.5 ilustra isso.

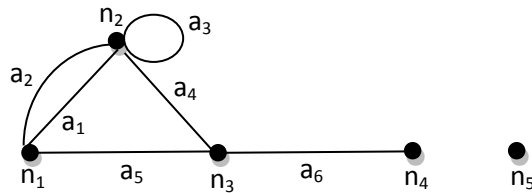


Figura 2.5 – Exemplo de grafo.

Fonte: Adaptada de Gersting (2004).

Analisando graficamente, um grafo é um diagrama representado por um conjunto de pontos (que neste trabalho serão chamados de nós) ligados por segmentos (que neste trabalho serão chamados de arcos).

Entende-se por um caminho de um nó n_0 a um nó n_k uma seqüência $n_0, a_0, n_1, a_1, \dots, n_{k-1}, a_{k-1}, n_k$ de nós e arcos onde, para cada i , os extremos do arco a_i são n_i — n_{i+1} . Na Figura 2.5, um caminho do nó 2 ao nó 4 consiste na seqüência n_2, a_4, n_3, a_6, n_4 .

Um grafo é chamado conexo quando houver um caminho entre quaisquer dois nós. O grafo da Figura 2.4 (pontes de Königsberg) é conexo, no entanto o grafo da Figura 2.5 é não-conexo.

Um ciclo em um grafo é um caminho de algum nó n_0 até n_0 de novo de forma que nenhum nó ocorra mais de uma vez no caminho, n_0 é o único nó que ocorre mais de uma vez e esse ocorre apenas nos extremos do caminho. No grafo da Figura 2.5, $n_1, a_1, n_2, a_4, n_3, a_5, n_1$ é um ciclo, onde n_1 ocorre mais de uma vez, pois representa os extremos do caminho. Um grafo sem ciclos é dito acíclico.

Os grafos podem ainda ser classificados como sendo grafos planares ou grafos não-planares. Um grafo planar é um grafo que pode ser desenhado em um plano de forma que seus arcos se interceptem apenas em nós. Os grafos das Figuras 2.4 e 2.5 são nitidamente planares. Quando é permitido o cruzamento de arcos sem que se constitua um nó no grafo, diz-se que este é não-planar. É exemplo

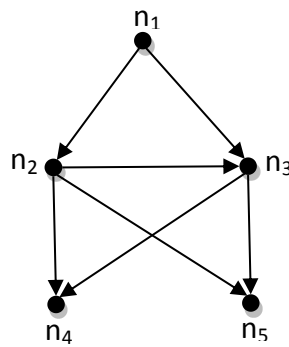


Figura 2.7 – Grafo direcionado.

É comum um tipo de aplicação de grafos onde os nós possuem informações de identificação, neste caso temos um grafo rotulado. Poderíamos usar também grafos ponderados, onde cada arco tenha um valor numérico, ou um peso, associado (GERSTING, 2004). Um exemplo disso, em uma rede de um sistema adutor, um nó pode indicar uma ETA (Estação de Tratamento de Água) ou um reservatório. Um arco pode conter o comprimento (peso) da rota entre dois nós (instalações) desse sistema. A Figura 2.5 mostra um exemplo de um grafo rotulado e ponderado ao mesmo tempo.

A seguir são apresentados outros conceitos da teoria dos grafos que são importantes para o tipo de análise desenvolvida neste trabalho.

- Distância topológica – distância medida entre dois ou mais nós, através do número de arcos que os separam.
- Conectividade – significa a existência ou não de ligação entre quaisquer locais. Na geografia dos transportes, é um indicador fundamental da estruturação e valorização do espaço.
- Acessibilidade – consiste na possibilidade de se poder chegar a um local, ou conjunto de locais, sendo fortemente dependente da conectividade.
- Ordem (de um grafo) – número total de nós.
- Dimensão (de um grafo) – número total de arcos.
- Caminho – percurso linear no qual nenhum nó aparece mais do que uma vez.
- Rede incoerente ou em árvore - rede em que não existem circuitos.
- Grafo conectado – grafo em que qualquer par de nós tem um arco a ligá-los.

- Multigrafo – é um grafo em que existem vários arcos a ligarem quaisquer pares de nós.
- Árvore – é um tipo de grafo, no qual existe um nó que é designado de raiz e a partir do qual só existe um único caminho para ir a qualquer outro nó do grafo. Se a árvore for um grafo não-direcionado, significa que qualquer um dos nós do grafo pode ser o nó chamado de raiz.
- Adjacência – diz-se que um nó x é adjacente de um nó y , se o par (x,y) for um arco, ou seja, se existir um arco direto a ligá-los. No caso de grafos direcionados, a adjacência não é uma propriedade simétrica. Normalmente, a adjacência é representada sob a forma de matriz de adjacências.
- Laço – em um grafo chama-se laço um arco com extremidades $n-n$ para algum nó n ; na Figura 2.5 o arco a_3 é um laço com extremidades $n_2 - n_2$.

2.3.1.2 Representação computacional de grafos

Para o armazenamento e manipulação de grafos por um computador, precisamos representá-los adequadamente. Estruturas de dados usadas nessas representações são: matriz de adjacências, lista de adjacências e matriz de incidência (GERSTING, 2004; BUCKLEY e LEWINTER, 2013; RAY, 2013).

Dado um grafo com n nós numerados $n_1, n_2, \dots, n_n$. Considerando esse conjunto de nós ordenados arbitrariamente, chamamos de matriz de adjacências do grafo com relação à ordenação, a matriz M , do tipo $n \times n$, onde o elemento m_{ij} é o número de arcos entre o nó n_i e n_j . A Figura 2.8 apresenta um grafo e a sua correspondente matriz de adjacências M .

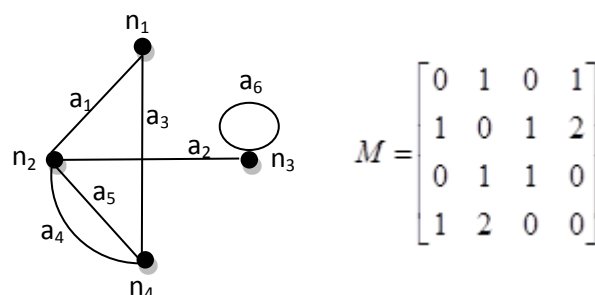


Figura 2.8 – Exemplo de Grafo e correspondente matriz de adjacências M .

A matriz de adjacências M para o grafo da Figura 2.8 com respeito à ordenação n_1, n_2, n_3, n_4 é uma matriz 4×4 . O elemento m_{33} é igual a 1 levando em conta que existe um laço em n_3 . Todos os demais elementos da diagonal principal são iguais a 0. O elemento m_{21} (segunda linha, primeira coluna) é igual a 1 porque existe apenas um arco entre os nós n_2 e n_1 , o que também indica que o elemento m_{12} vale 1, e assim por diante.

No caso de grafos direcionados, a matriz de adjacências M é uma consequência da direção dos arcos, e sendo assim nessa matriz direcionada $n \times n$ o elemento a_{ij} é igual ao número de arcos que se iniciam no nó n_i e terminam no nó n_j , como mostra a matriz a seguir, que representa a matriz de adjacências relativa ao grafo direcionado da Figura 2.7. Como podemos perceber todos os elementos da diagonal principal são iguais a 0, pois não existe nenhum laço.

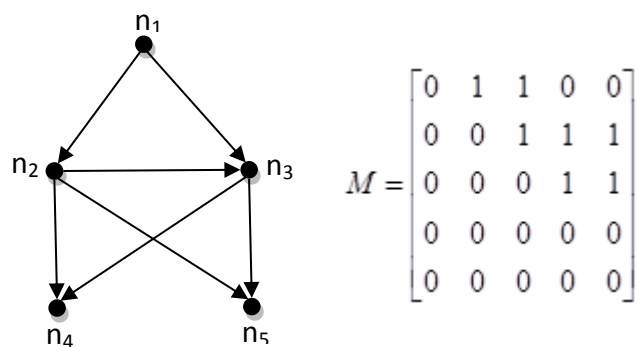


Figura 2.9 – Grafo direcionado e a sua correspondente matriz de adjacências M .

Existem grafos como o da Figura 2.7 em que suas matrizes de adjacências são esparsas (contêm muitos zeros). Um algoritmo segundo Ray (2013), o qual precise que todas as arestas do grafo sejam verificadas realizará comparações com todos os n^2 elementos da matriz, uma vez que não há outro meio de determinar quais os elementos que não são zero além de examiná-los. Para encontrar todos os vértices adjacentes ao vértice n_i , precisamos varrer toda a i -ésima linha da matriz de adjacências, o qual tem um total de n elementos.

Um grafo com relativamente poucos arcos pode ser representado mais eficientemente, se armazenarmos apenas os elementos não-nulos de sua matriz de adjacências. Esta representação consiste em uma lista para cada nó de todos os vértices adjacentes a ele. Usam-se ponteiros para permitir que caminhemos de um elemento da lista para o seguinte. Este tipo de estrutura de dados é chamado de lista encadeada ou lista de adjacências (BUCKLEY e LEWINTER, 2013).

A lista de adjacências para o grafo da Figura 2.8 contém um arranjo de ponteiros com quatro elementos, um para cada nó. O ponteiro de cada nó aponta para um nó adjacente, que aponta para outro nó adjacente, e assim por diante. A estrutura da lista de adjacências é mostrada na Figura 2.10.

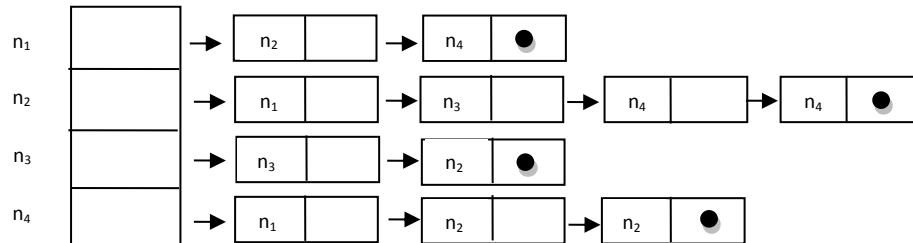


Figura 2.10 – Estrutura da lista de adjacências do grafo da Figura 2.8

Na Figura 2.10 os pontos indicam um ponteiro nulo, o que significa que não há mais nada a ser apontado e que se chegou ao final da lista. Para o caso dos arcos paralelos, os nós são listados mais de uma vez na lista de adjacências para n_i , caso exista mais de um arco entre n_i e esse nó. Em um grafo que representa uma rede de um sistema adutor, os arcos paralelos correspondem as diferentes rotas possíveis entre dois pontos (instalações).

Seja G um grafo com n nós e m arcos. A matriz de incidência para G é uma matriz bidimensional $n \times m$, que denotaremos por M , cujos elementos são $m_{ij} = 1$ se o arco j incide no nó i em G , e caso contrário $m_{ij} = 0$. O grafo G corresponde a Figura 2.11.

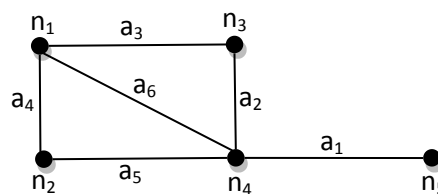


Figura 2.11 – Grafo G para matriz de incidência.

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 2.12 - Matriz de incidência para o grafo G da Figura 2.10

2.3.2 Análise de redes e problemas de transporte

Uma rede é uma estrutura geográfica que tem como suporte um grafo. As redes são compostas por arcos, representados por linhas, e nós, representados por pontos. Em uma rede de transportes, os produtos precisam ser levados de um local para outro. Os nós, numa rede de transportes, como a rede formada por rodovias e instalações de um sistema adutor, podem representar uma cidade, uma ETA, um reservatório, etc. Os arcos nessa rede podem representar as rotas entre duas instalações, por exemplo. A esses arcos podem ser atribuídos ou não pesos, dependendo da análise pretendida.

A análise de redes geralmente baseia-se numa estrutura matemática que representa relações espaciais entre entidades, associadas topologicamente à teoria dos grafos (COVAS, 2010).

O problema do caminho mínimo é frequente na otimização proporcionada pela modelagem de redes. Nesse caso, trata-se de um grafo simples, ponderado e conexo, onde os pesos são todos positivos (JUDITH, 2004). Um caminho entre quaisquer dois vértices x e y é sempre possível, podendo haver vários desses caminhos. Diante disso, a questão é como encontrar um desses caminhos o qual tenha o menor peso? Esse é um problema importante a ser resolvido para uma rede de transportes, onde os produtos são levados de um local para outro.

As soluções de problemas de transporte baseiam-se na análise de redes. Através da análise de redes, podemos fazer diversos cálculos, que resolvem problemas como o do percurso (caminho) mais curto, o do percurso mais rápido e o do percurso de custo mínimo (ESRI, 2012b). Uma análise de rede depende então da característica de ligação, ou seja, o custo. O custo pode ser da ordem da distância, do tempo, da velocidade possível de condução ou da velocidade de um pedestre (COVAS, 2010).

A ESRI fornece o *Network Analyst* em seu amplo conjunto de produtos SIG. O *Network Analyst* é a extensão da ESRI para análise espacial em redes lineares baseadas em grafos (ESRI, 2012b). É amplamente utilizado em numerosas aplicações em diferentes áreas para resolver uma infinidade de problemas de rede, como o caso de adutoras. Em específico, esse software pode ser utilizado para determinar a melhor rota entre dois pontos, encontrar a instalação mais próxima de uma dada localização, definir áreas de influência baseadas em tempos de viagem,

calcular matrizes de origem-destino para diversas localizações na rede (ESRI, 2012a).

As aplicações *Route* (melhor rota) *Closest Facility* (Instalação mais próxima), *OD Cost Matrix* (Matrizes de origem-destino) e *Service Area* (Áreas de influência) do *Network Analyst*, que permitem resolver problemas de rede de transporte, baseiam-se no Algoritmo de *Dijkstra* (ESRI, 2012a).

3 METODOLOGIA

3.1 A UTILIZAÇÃO DE SIG NA CONSTRUÇÃO DO MODELO

Neste trabalho, utilizou-se o *software ArcGis* através das aplicações *ArcCatalog* e *ArcMap*. Com o *ArcMap* foram usadas as extensões *Spatial Analyst* e *Network Analyst*.

Através das ferramentas do *ArcCatalog* foi possível acessar, organizar e gerenciar os dados geográficos que permitiram explorar e pesquisar informação geográfica.

O *Spatial Analyst* foi usado para calcular o custo de viagem através de uma superfície. A análise de custos de viagens envolveu a geração de uma superfície de custo e o cálculo de rotas otimizadas através da superfície.

A aplicação do *Network Analyst* neste estudo teve como objetivo solucionar diferentes tipos de problemas relativos a redes de transporte. Encontrar o melhor percurso (rota) entre dois locais, a solução do problema de percurso de veículos e encontrar a instalação mais próxima de uma dada localização.

Levando em conta a aplicabilidade das ferramentas da metodologia e considerando a necessidade de futuras implantações de adutoras, será desenvolvida uma aplicação da metodologia em que serão consideradas as variáveis que influenciam na construção do sistema adutor, como altitudes, declividades, hidrografia e rodovias.

Para definição do melhor caminho (rota) entre a origem e os pontos receptores, foi utilizada uma metodologia, que faz a combinação dessas variáveis segundo restrições e permissões, aplicada para locação do traçado de adutoras através da extensão *Spatial Analyst*. Com esse método, foi possível definir regiões de melhor caminho entre os pontos (nós) de origem, no caso captação da água, e os pontos (nós) de destino, como a recepção da água e pontos de passagem obrigatória (ETA, estações elevatórias, ramais de derivação e reservatórios). Adicionalmente, foi possível definir também uma simulação da rota para o traçado da adutora.

Na sequência, foi usado um analista de rede (*Network Analyst*) para a caracterização da rede formada pelas instalações da adutora e pelas rodovias que cortam a região definida para o estudo, bem como para a determinação da melhor

rota entre pontos localizados sobre ou juntos a rede, e para resolução de problemas relacionados à determinação de instalações nas proximidades de um dado ponto do sistema adutor. A estruturação da rede (Sistema Adutor de Bocaina) está descrita na Seção 3.3.

3.2 O MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIOS PARA LOCAÇÃO DO TRAÇADO DA ADUTORA

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo de otimização que busca minimizar parte significativa dos custos de implantação, operação e manutenção de uma adutora. A partir desse modelo, desenvolvido com parâmetros do Sistema Adutor de Bocaina, no Piauí, e da adutora do Pajeú, em Pernambuco, busca-se fornecer um instrumento de gestão para as empresas de abastecimento de água. O modelo elaborado é formulado a seguir, como um problema de otimização.

Para efeito do desenvolvimento do modelo de otimização multicritério para locação do traçado da adutora, será aplicado o problema do melhor caminho (menor custo) através de uma função para determinar uma rota de custo efetivo entre uma origem e um destino.

Como o processo de otimização decorre de resultados de diversos processos intermediários, não é possível estabelecer uma função-objetivo clássica representada por meio de expressões matemáticas plenamente explícitas. No caso, a otimização decorre da minimização de um conjunto de planos de custos ponderados, com as variáveis de decisão derivadas do traçado escolhido, devidamente sujeitas ao conjunto de restrições aqui apresentado.

Para determinação do caminho ótimo em cada caso foi utilizada a função *Custo_total* (Seção 3.2.3.4) e as funções *Cost Distance* (Distância de Custo), *Backlink Cost* (Custo de Direção) e *Cost Path* (Caminho de Custo) da extensão *Spatial Analyst do ArcGis* descritas na Seção 3.2.3.5.

3.2.1 Critérios utilizados

A seguir, encontra-se a descrição dos critérios e restrições utilizados para definir quais áreas são mais adequadas para locação da linha adutora e qual sua relação com as recomendações de projeto e informações disponíveis.

- *Declividade*: foi estabelecido que declividades inferiores a 20%, geradas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), são adequadas para locação de linhas adutoras (CORDÃO, LACERDA E RIBEIRO NETO, 2012). As altas declividades são inadequadas para caminhamento da adutora, pois indicam subidas e descidas acentuadas (obstáculos topográficos), impróprias para sua execução, manutenção e operação, bem como uma maior probabilidade de necessidade de uso de elementos de proteção contra efeitos transitórios (subpressão e sobrepressão) e formação de bolhas de ar no interior da tubulação. A Tabela 3.2 da seção 3.5.3 apresenta as classes de declividade utilizadas com seus respectivos custos.
- *Distância dos principais rios e áreas alagadas*: as áreas consideradas mais adequadas são aquelas que distam, no mínimo, 100 metros de rios (SEMAR, 2012). Áreas alagadas ou muito próximas às margens de rios são inadequadas para locação da adutora. Vale salientar que esse critério tem por objetivo evitar que a locação de uma adutora ocorra margeando um rio, o que é diferente da adutora cruzar um rio, ancorada em uma ponte ou envelopada com concreto e enterrada.
- *Distâncias de estradas*: foi estabelecido que áreas com distâncias inferiores a 30 metros (regiões dentro da faixa de domínio da rodovia que é de 30 metros) são adequadas para a análise (SEMAR, 2012). A proximidade da adutora de uma rodovia ou estradas vicinais é de grande importância para sua implantação, operação e principalmente manutenção (CORDÃO, LACERDA e RIBEIRO NETO 2012).
- *Altitude*: com o objetivo de diminuir custos de energia elétrica com bombeamento, devemos procurar sempre terrenos com menores altitudes. Neste trabalho, um dos critérios consiste em evitar as áreas com altitudes elevadas, considerando que as altitudes nas áreas de estudo variam de 153 a 561 metros (Adutora de Bocaina - Piauí) e de 558 a 1290 metros (Adutora do Pajeú - Pernambuco).

3.2.2 Áreas de estudo

Para aplicação da metodologia apresentada neste trabalho, utilizou-se como áreas de estudo um trecho da bacia hidrográfica do rio Guaribas, que drena suas águas para barragem Bocaina, no Estado do Piauí, e um trecho da bacia hidrográfica do rio Pajeú situado no estado de Pernambuco. O estudo busca definir quais áreas são mais apropriadas para o traçado de uma adutora para abastecimento das cidades de Bocaina, Picos e Sussuapara, todas localizadas no Estado do Piauí e para o traçado de uma adutora para abastecimento das cidades de Serra Talhada, Calumbi, Santa Cruz da Baixa Verde, Triunfo e Flores, em Pernambuco.

Efetivou-se uma comparação entre as áreas sugeridas como mais adequadas para o traçado de adutora, através da metodologia aplicada, com o traçado original da adutora proposto no Projeto do Sistema Adutor de Bocaína (SEMAR, 2012), solicitado pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMAR) do Piauí. Procedimento análogo foi feito com o traçado projetado para a adutora do Pajeú (Pernambuco). As áreas de estudo com as adutoras projetadas são demonstradas nas Figuras 3.1 e 3.2. Para o sistema de referência espacial foi adotado o Datum SAD 69 (*South American Datum 1969*) e o sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator).

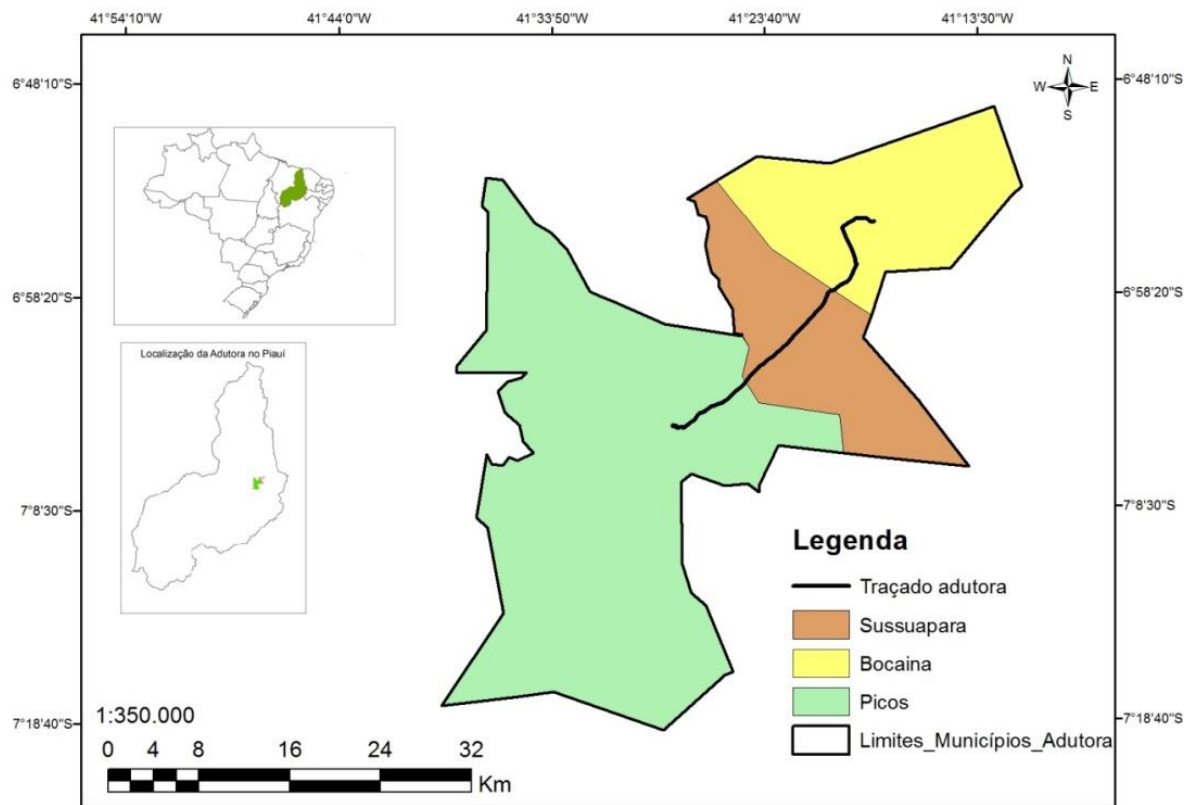


Figura 3.1 - Área de estudo com o traçado projetado para a adutora de Bocaina.

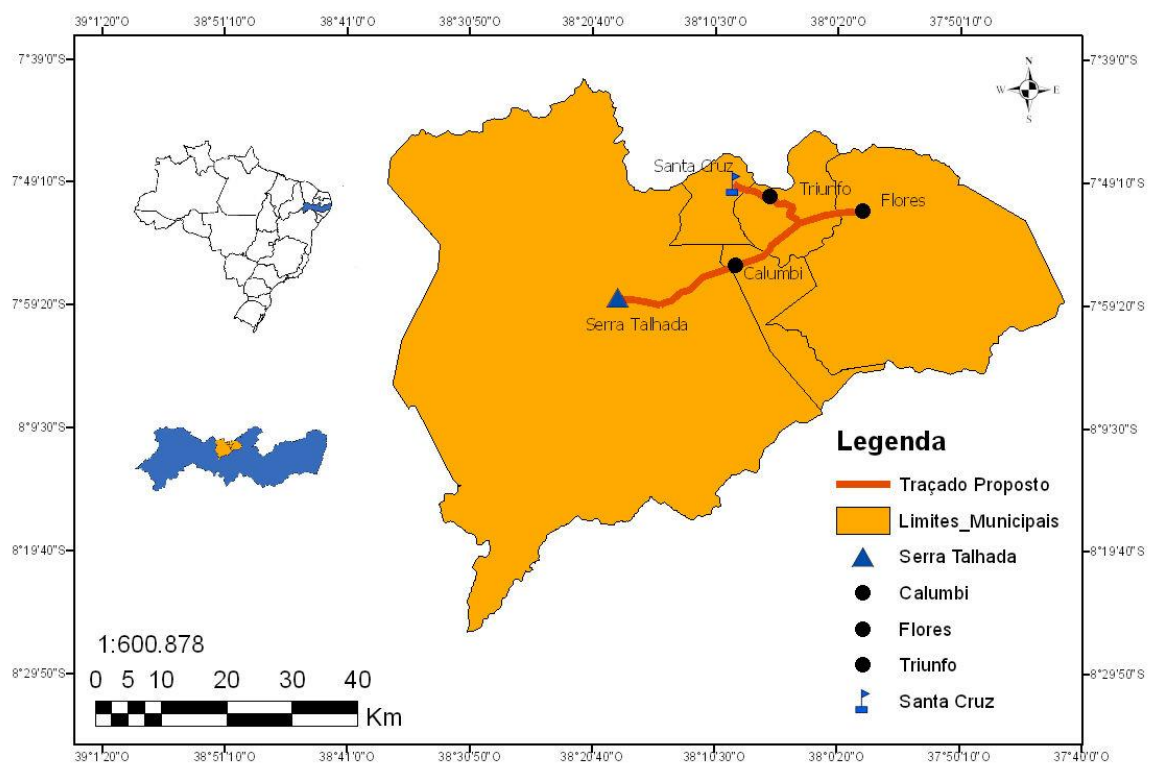


Figura 3.2 - Área de estudo com o traçado projetado para a adutora do Pajeú

Fonte: Adaptado de Cirilo (2008).

3.2.2.1 O sistema adutor de Bocaina

O sistema visa minimizar os efeitos produzidos pela falta de água de boa qualidade nas cidades abastecidas pela adutora, além da preservação do aquífero Serra Grande, que abastece atualmente as cidades da região. O projeto prevê a utilização do manancial do reservatório de Bocaina. O Projeto do Sistema Adutor de Bocaina foi solicitado pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMAR) do Governo do Estado do Piauí.

O Sistema Adutor de Bocaina visa o atendimento de um contingente populacional de aproximadamente 26.000 habitantes no seu horizonte de alcance (2041), aduzindo uma vazão de 300 L/s por gravidade (SEMAR, 2012).

Ainda de acordo com Semar (2012) o manancial hídrico desse sistema adutor será constituído pelo reservatório da barragem Bocaina, cuja obra, iniciada em 1981, foi concluída em março de 1985, sendo considerada uma das maiores obras hídrica construída pelo Exército brasileiro. Está localizada a aproximadamente 6 km da cidade de Bocaina e barra o Rio Guaribas. Sua bacia hidráulica conta com uma área de aproximadamente 11.000 m² e o reservatório formado tem a capacidade de acumulação máxima de 106.000.000 m³. A bacia hidrográfica abrange uma área de aproximadamente 1.000 km². A barragem, de terra compactada, tem uma altura máxima de 57,5 m e comprimento de 356 m. O sangradouro possui uma largura de 25 m. A capacidade de regularização do reservatório é de 341 L/s com uma garantia de abastecimento de 100%.

A adutora terá um comprimento total de 29634 m, divididos em trechos, nos quais estão presentes: uma ETA (Estação de Tratamento de Água), duas derivações, DER1 e DER2, para as cidades de Bocaina e Sussuapara, respectivamente, e um RAD (Reservatório Apoiado de Distribuição), sendo 28.822 m o comprimento que vai da Torre Piezométrica até o RAD em Picos (SEMAR, 2012).

- | | |
|--------------------------------------|-----------|
| • Trecho Captação Flutuante – ETA | 256 m; |
| • ETA – Torre Piezométrica | 556 m; |
| • Torre Piezométrica –DER1 (Bocaina) | 5.647 m; |
| • DER1 (Bocaina) – DER2 (Sussuapara) | 10.037 m; |
| • DER2 (Sussuapara) – RAD (Picos) | 13.138 m; |

Para Semar (2012) a captação de água bruta no reservatório de Bocaina será do tipo flutuante composta por dois conjuntos moto-bombas submersíveis, sendo um de reserva (1 + 1R), com capacidade para recalcar 300 L/s a uma altura manométrica de 29 m.c.a e potência instalada por conjunto de 200 CV. O acesso ao flutuante será feito mediante a instalação de uma passarela de 30,0 m de extensão com módulos articuláveis e flutuadores. As características técnicas do conjunto elevatório da Captação Flutuante estão na Tabela 1 do Anexo I.

No subtrecho entre o flutuante e a área alagável da bacia hidráulica da barragem a água será aduzida por tubos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com flanges, e diâmetro nominal DN 500 mm. Para complementar o restante de adução de água bruta será utilizada uma tubulação de F^oF^o (Ferro Fundido). As características técnicas da Adutora de Água Bruta são mostradas na Tabela 2 do Anexo I.

As águas captadas serão recalçadas diretamente para uma Estação de Tratamento de Água (ETA), que estará localizada entre o açude de Bocaina e a cidade homônima.

A Estação de Tratamento de Água será dotada de uma calha parshall para medir a vazão afluente, uma unidade de floculação, dois decantadores, dois pares de unidades de filtração rápida e um reservatório para água de lavagem. As águas tratadas na ETA serão conduzidas, através de uma estação de bombeamento a uma Torre Piezométrica com altura de 15 m, de onde a água será conduzida por gravidade até um reservatório apoiado de distribuição localizado na cidade de Picos. As Tabelas 3 e 4 do Anexo I contêm as características técnicas do conjunto elevatório da ETA e da Adutora de Água tratada, respectivamente.

3.2.2.2 O sistema adutor do Pajeú

A Adutora do Pajeú está destinada a transportar 830,7 L/s para vinte sedes municipais de Pernambuco, além de mais oito do Estado da Paraíba e distritos diversos próximos do traçado da adutora, tendo uma extensão aproximada de 600 km (CIRILO, 2008). A Figura 3.3 apresenta a Adutora do Pajeú cuja obra teve início em janeiro de 2009. Em 2016 encontram-se em obras os trechos da 2^a etapa, a serem supridos de água pelo Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco.

O Sistema Adutor do Pajeú visa o atendimento de um contingente populacional de aproximadamente 504 mil habitantes. A Tabela 3.1 a seguir contém as informações detalhadas da população e vazões de projeto.

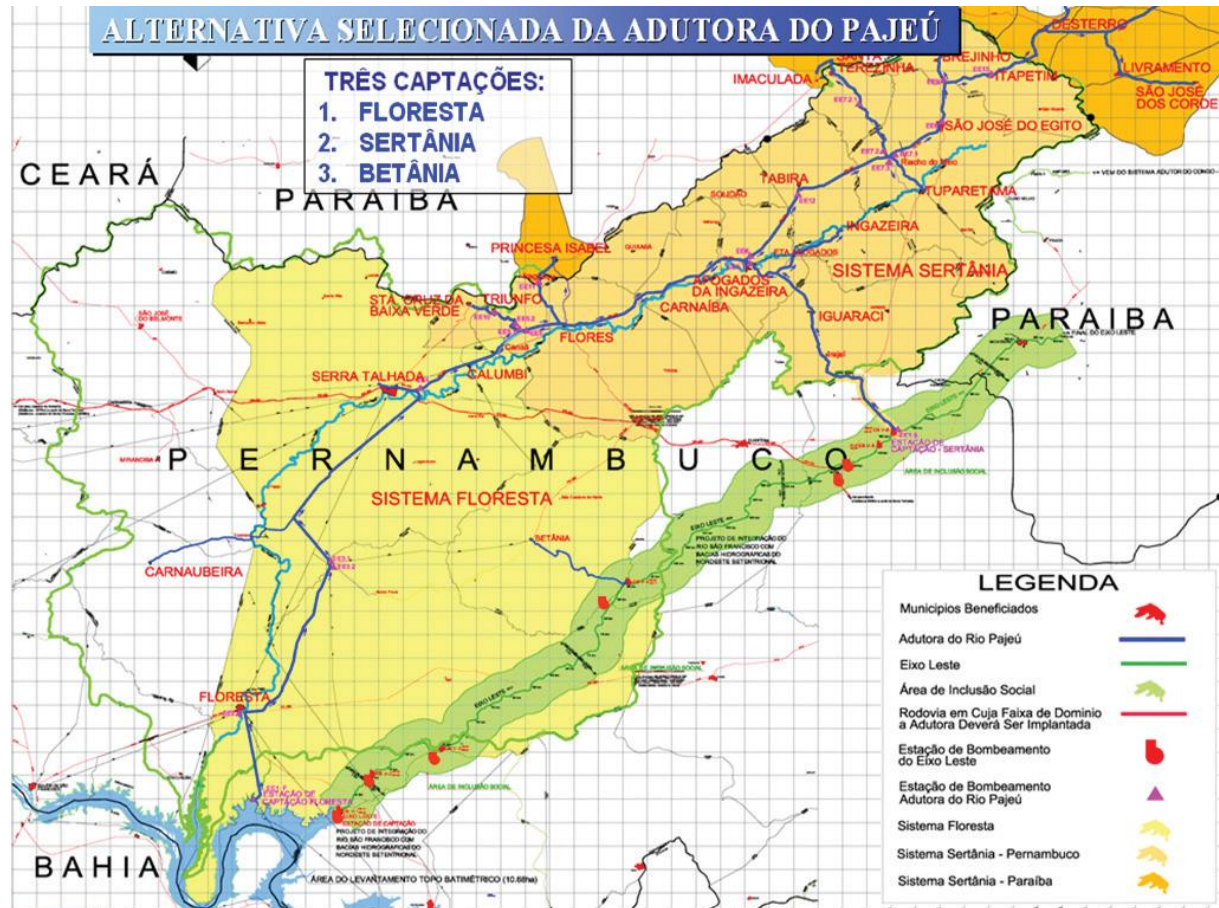


Figura 3.3 - Traçado previsto para a Adutora do Pajeú.

Fonte: Ministério da Integração / DENOCS (2008).

Tabela 3.1 – População e Vazões de Projeto (Adutora do Pajeú)

POPULAÇÃO E VAZÕES DE PROJETO					
Etapas / Localidades Atendidas-		Nº	Nomes	População de Projeto (hab)	Vazão de Projeto (l/s)
Estado de Pernambuco	Sede Municipal	1	Afogados da Ingazeira	48.175	40,1
		2	Betânia	6.842	14,3
		3	Brejinho	7.499	15,6
		4	Calumbi	8.146	17,0
		5	Carnaíba	12.754	10,6
		6	Carnaubeira da Penha	9.317	19,4
		7	Flores	12.717	18,6
		8	Floresta	34.209	57,0
		9	Iguaraci	7.241	15,1
		10	Ingazeira	5.547	11,6
		11	Itapetim	11.675	17,0
		12	Quixaba	6.548	13,6
		13	Santa Cruz da Baixa Verde	9.158	19,1
		14	Santa Terezinha	13.041	27,2
		15	São José do Egito	29.012	18,1
		16	Serra Talhada	53.337	66,7
		17	Solidão	5.511	11,5
		18	Tabira	30.006	62,5
		19	Triunfo	10.751	7,3
		20	Tuparetama	9.532	19,9
	Total Cidades (20)			331.018	482,1
	Distritos	1	Nazaré do Pico (Floresta)	1.970	3,3
		2	Riacho do Meio (São José do Egito)	5.024	10,5
		3	Canaã (Triunfo)	2.019	3,4
		4	Tupanaci (Mirandiba)	1.974	3,3
	Total Distritos (04)			10.987	20,4
Estado da Paraíba	Sede Municipal	1	Princesa Izabel	16.720	34,8
		2	Imaculada	6.145 12,8	6.145 12,8
		3	Desterro	6.092	12,7
		4	Livramento	4.782	10,0
		5	São José dos Cordeiros	1.917	4,0
		6	Taperoá	11.635	24,2
		7	Teixeira	11.656	24,3
		8	Cacimbas	2.198	4,6
	Total Cidades (08)			61.145	127,4
Sub-Total (1)				403.150	629,9
Estado de Pernambuco	Demais Localidades a Serem Beneficiadas: 23			101.780	200,8
Sub-Total (2)				101.780	200,8
TOTAL (1) + (2)				504.930	830,7

Fonte: Ministério da Integração / DNOCS (2007).

3.2.3 Construção do modelo de otimização

Os passos seguintes permitiram construir um modelo para encontrar os locais mais adequados para o traçado das adutoras de Bocaina como também do Pajeú, e como consequência determinar o melhor caminho para a locação desse traçado. Os conjuntos de dados de entrada MDT (Modelo Digital do Terreno), Altitudes e Áreas de Influência (Buffer de Rios e Buffer de Rodovias) geraram como resultados as imagens matriciais: Declividade, Altitude_Perda_Carga, Dist_Euc_Rios e Dist_Euc_Rodovias.

Essas imagens matriciais (Planos de informação) obtidas foram então reclassificadas de forma a atenderem aos requisitos da ferramenta Sobreposição Ponderada (*Weighted Overlay*) do *Spatial Analyst* que se utiliza da lógica **fuzzi**. Nessa ferramenta, é possível definir uma escala de medição comum, permitindo assim uma padronização das variáveis, e uma porcentagem de influência de cada plano de informação. Os planos de informação foram então combinados para produzir um mapa, mostrando os locais adequados para o traçado da adutora. A função-objetivo Caminho de Custo (*Cost Path*) foi utilizada para determinar o melhor caminho para a locação do traçado da adutora. Esses procedimentos são descritos em detalhes na sequência.

A metodologia utilizada para a determinação do melhor caminho para locação do traçado da adutora foi resumida no fluxograma da Figura 3.4.

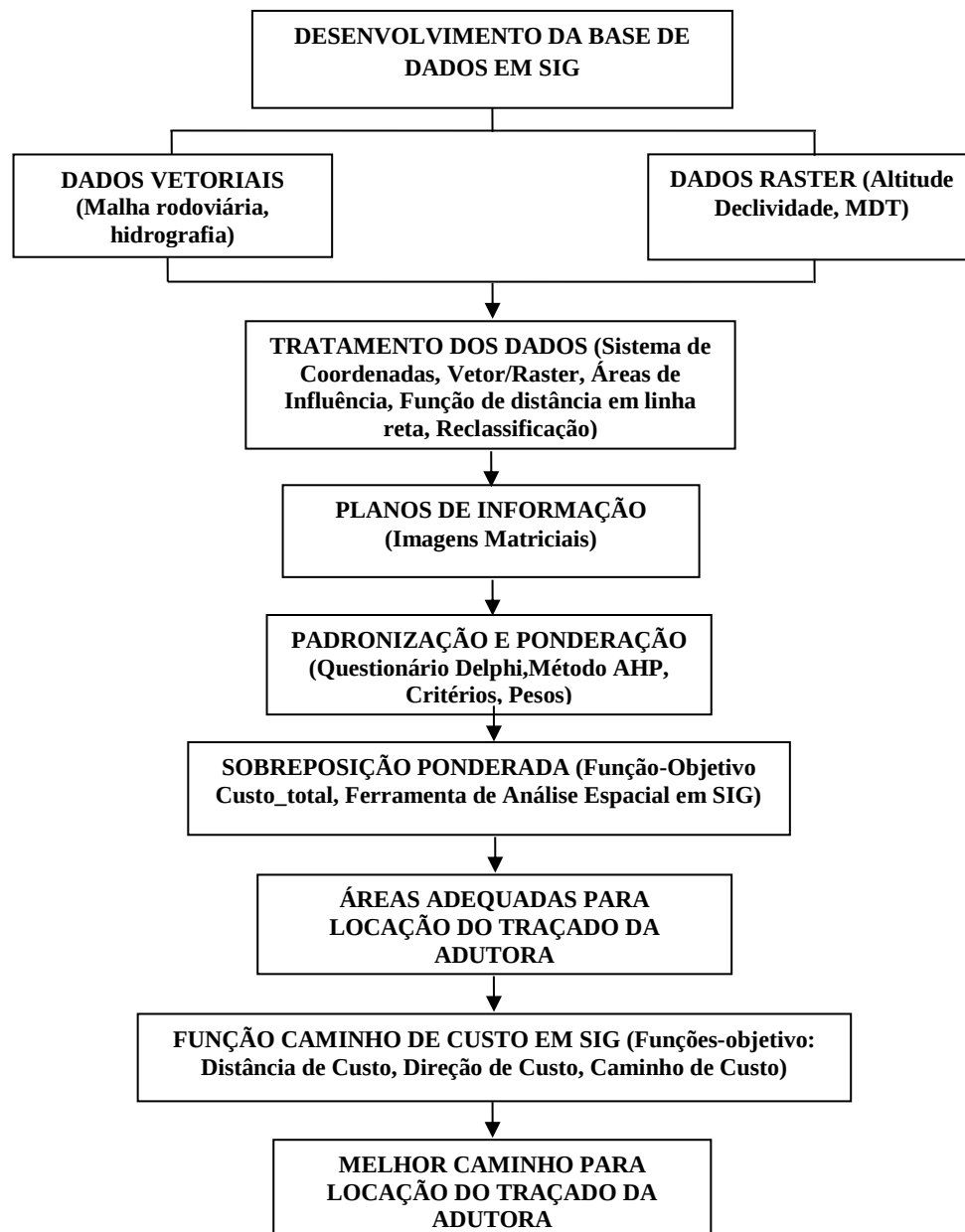


Figura 3.4 – Fluxograma da metodologia para determinação do melhor caminho para locação do traçado da adutora.

Fonte: Adaptado de ESRI (2012d)

3.2.3.1 Desenvolvimento da base de dados em SIG

Utilizaram-se a base de dados SRTM ajustada para 30 metros, disponível no INPE pela denominação Topodata, a base de dados do Programa PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL obtida através da Tecnologia LiDAR para a adutora do Pajeú, cartas topográficas do IBGE das regiões de estudo, os dados da Secretaria de Meio

Ambiente e Recursos Hídricos (SEMAR, 2012) e os dados do Projeto Executivo do Sistema Adutor do Rio Pajeú (DNOCS, 2007).

3.2.3.1.1 *Preparação dos shapefiles*

Para isso foi criado no ArcCatalog do ArcGis um *shapefile* tipo polígono de maneira que permitisse gerar um polígono único contornando a área de interesse. Os cálculos e tabelas apresentados para detalhar a metodologia se referem sempre ao sistema adutor de Bocaina (Piauí). Procedimento análogo foi feito para o caso da Adutora do Pajeú (Pernambuco), cujo detalhamento, não apresentado, é análogo.

No passo seguinte, estabeleceu-se a delimitação dos elementos restritivos. Nessa etapa, existem quatro elementos restritivos (rios, estradas, altitude e declividade). No caso de rios e rodovias, houve a necessidade da geração de novos *shapefiles* a fim de que fossem geradas as distâncias restritivas. No caso dos rios, foram capturadas as informações disponíveis na base cartográfica do IBGE - Instituto brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014) e, em seguida, foram reunidos todos os cursos d'água. Assim foi gerado o *shapefile* Hidrografia.shp. Para as estradas foi utilizado o *shapefile* Rodovias.shp, com o mesmo procedimento utilizado para gerar o *shapefile* Hidrografia.shp (IBGE, 2014).

3.2.3.1.2 *Geração do MDT (Modelo Digital do Terreno)*

Para determinação das informações de topografia, foram utilizados os dados da base de dados SRTM ajustada para 30 metros e a base de dados LiDAR do Programa PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL. Obteve-se assim o MDT para cada caso.

3.2.3.2 *Geração das imagens matriciais para locação do traçado da adutora*

A partir do MDT, foi gerada a informação de declividade em porcentagem. A declividade é uma forma de representação do relevo e é expressa como a variação de altitude entre dois pontos do terreno, em relação à distância que os separa.

De um modo geral, o custo total de implantação de uma adutora projetada para levar água de um ponto A para um ponto B é função dos custos fixos, que são

diretamente proporcionais ao comprimento L da tubulação, e dos custos variáveis, associados à energia elétrica, cujos gastos são proporcionais à potência necessária à elevação da água (SARMENTO, 2012).

Considerando a segunda questão acima (custos variáveis), e com o objetivo de diminuir custos de energia elétrica com bombeamento, foi gerada uma imagem matricial *Altitude_Perda_Carga*, obtida da imagem matricial *Altitudes*, através de Álgebra de Mapas.

Para os procedimentos seguintes foram usados os dados da Adutora de Bocaina. Analogamente esse procedimento foi aplicado à Adutora do Pajeú. Para isso, foi utilizada a Equação 3.1, onde o Ponto Origem representa o ponto de captação da água na barragem de Bocaina, e o Ponto Destino o ponto final do alinhamento principal da adutora no qual está localizado o Reservatório Apoiado de Picos (RAD) na cidade de Picos (SEMAR, 2012):

$$\text{Altitude_Perda_Carga} = (\text{Altitudes} - \Delta Z) + \Delta h \quad 3.1$$

Sendo:

- Altitudes: Imagem matricial de Altitudes
- ΔZ : diferença de altitudes (Ponto origem – Ponto destino)

$$\Delta Z = 259 - 218 = 41 \text{ m}$$

- Δh : perda de carga contínua

$$J = \Delta h / L \rightarrow \Delta h = J \times L$$

Onde:

- ✓ J: perda de carga unitária (gradiente ou a inclinação da linha de carga em m/m)
- ✓ L: Comprimento do conduto em metros (L = 28.882,00 m)

Pela fórmula de Hazen-Williams (CIRILO, 2011):

$$J = \frac{10,64}{C^{1,85}} \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} = 0,001695 \quad 3.2$$

Assim,

$$\Delta h = J \times L = 0,001695 \times 28882 = 49,00 \text{ m}$$

- C: coeficiente de perda de carga (C=130, ferro fundido)

- Q: vazão em m^3/s ($Q=300\text{l/s}=0,30 \text{ m}^3/\text{s}$)
- D: diâmetro em metros ($D=600\text{mm}=0,60\text{m}$)

No caso de tubulações muito longas, com vários quilômetros de extensão, como nas adutoras, a perda de carga localizada pode ser desprezada ou considerada artificialmente majorando-se o coeficiente C (CIRILO et al., 2011). Nesse sentido, para efeito de desenvolvimento do modelo deste trabalho, foram desprezadas as perdas de carga localizadas.

Já com relação ao comprimento da tubulação, sabe-se que este está diretamente relacionado com a melhor rota (caminho de menor custo) para o traçado da adutora. Para determinação desse caminho, foi utilizada a função de Caminho de Custo (*Cost Path*). As imagens matriciais obtidas de acordo com os procedimentos descritos anteriormente, consideram os quatro critérios e serão utilizadas pela função Caminho de Custo.

Em entrevista realizada com o gerente de projetos da SEMAR (Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí), responsável pela fiscalização das obras do Sistema Adutor Bocaina – Picos e dos Sistemas Adutores de Piaus I e II, todos no estado do Piauí, foi obtida a informação de que há um procedimento, considerando uma orientação advinda da prática nesse tipo de construção, que para todo alinhamento da adutora é conveniente, para efeito de facilidade na construção e manutenção de adutoras, a instalação das tubulações dentro de uma faixa de domínio de 30 metros para rodovias federais e 15 metros para as rodovias estaduais (SEMAR, 2012). Esse procedimento foi adotado, gerando-se um *buffer* (faixa) de 30 metros das rodovias. Ainda segundo o entrevistado, deve-se procurar manter uma distância mínima de 100 metros de todos os cursos d'água, de forma a evitar que as tubulações venham a ficar submersas e tenham seu funcionamento comprometido (SEMAR, 2012). Nesse sentido, foi gerado também um *buffer* (faixa) de 100 metros de todos os cursos d'água. Para a geração dos Buffers, foram utilizados os arquivos Hidrografia.shp e Rodovias.shp (IBGE, 2013).

Após a geração dos *buffers*, faz-se necessário aplicar a função de distância em linha reta (*Euclidean Distance*) para o preenchimento de áreas externas, com valores representativos de distância em relação a cada um dos *buffers*, pois para essas imagens, observou-se que os valores dos pixels na região correspondente ao *buffer* correspondem a 1 (indicação do *buffer*), enquanto que, para as áreas externas

ao buffer, os valores correspondem a nenhum dado (NoData). Para fazer o preenchimento dessas áreas deve-se fazer a aplicação da função *Euclidean Distance* para as imagens matriciais *buffer* de rodovias e *buffer* de rios.

A função de Distância em linha reta (Distância Euclidiana) é usada para determinar uma superfície de distância em linha reta e pode determinar a menor distância, uma linha reta, a partir de cada célula para a origem mais próxima. Uma demonstração matemática dessa função, desenvolvida por Santos, Louzada e Silva (2010) é descrita na sequência.

Na Figura 3.5 (a), 1 (um) corresponde ao valor dos pixels na região correspondente ao buffer, os pixels vazios correspondem a nenhum dado (*NoData*) e a resolução é igual a 30 m. Considerando a equação que determina a distância entre dois pontos, podemos determinar a distância de cada pixel (célula) da imagem a origem (pixel rio/rodovia) mais próxima. Assim, por exemplo:

$$D_{ij} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad 3.3$$

$$D_{42} = \sqrt{(30 - 0)^2 + (30 - 0)^2} = 42,4$$

$$D_{33} = \sqrt{(60 - 0)^2 + (60 - 0)^2} = 84,8$$

Onde:

- i: representa a linha para o pixel
- j: representa a coluna para o pixel

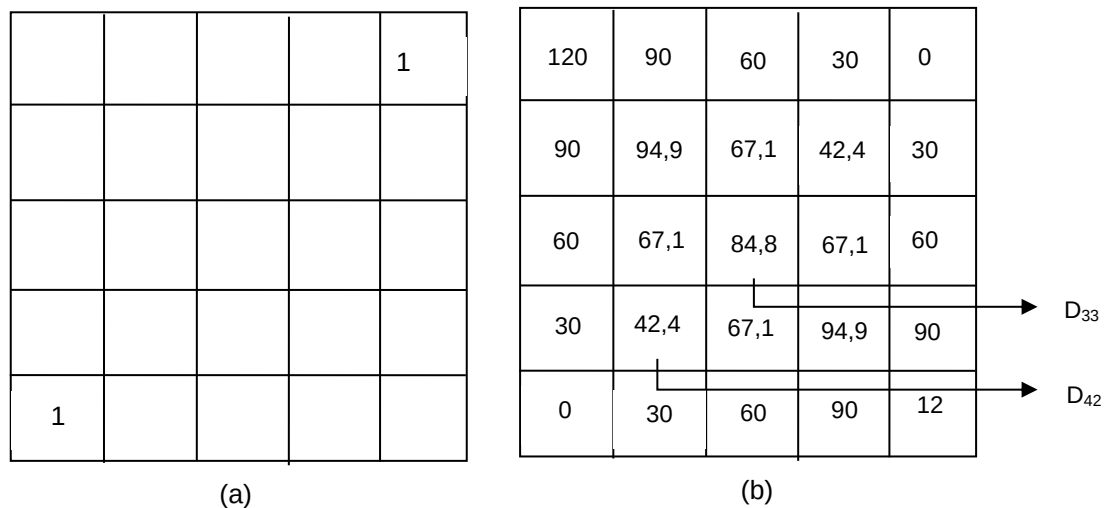


Figura 3.5 - Imagem matricial do buffer de rodovias (a) Imagem matricial de Distância Euclidiana (b)

Fonte: Adaptado de Santos, Louzada e Silva (2010).

3.2.3.3 Reclassificação das imagens matriciais para locação do traçado da adutora

Cada célula na área de estudo possui, com os procedimentos anteriores, um valor para cada um dos critérios de entrada. Fez-se necessário então combinar os conjuntos de dados derivados para que seja possível criar o mapa que irá identificar os locais potenciais para o traçado da adutora. No entanto, não é possível fazer essa combinação na presente forma, pois é preciso que se trabalhe com uma escala de medida comum, por exemplo, de 1 a 10 (escala aplicada nas tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 a seguir). Essa escala de medição comum é o que permite determinar se um dado local é adequado para o traçado da adutora.

A ferramenta Sobreposição Ponderada (*Weighted Overlay*) do *Spatial Analyst*, que é utilizada neste trabalho, permite ponderar os valores de cada plano de informação, e em seguida, combiná-los. No entanto, as entradas para essa ferramenta devem conter valores inteiros discretos. Os valores nos conjuntos de dados derivados nos passos anteriores são todos de ponto flutuante, conjuntos de dados contínuos, categorizadas em faixas, e eles devem primeiro ser reclassificados para que a cada intervalo de valores seja atribuído um valor inteiro discreto. Esse

processo é denominado padronização ou normalização, e consiste na ponderação das classes presentes em cada plano de informação (variáveis).

Neste trabalho, a padronização das variáveis foi realizada através da utilização de funções lineares do tipo $y = m x + n$. Foi utilizada uma função linear para cada variável. Para a variável declividade, por exemplo, a função encontrada foi $y = 0.3 x - 2$, onde a grandeza y corresponde aos custos e a grandeza x corresponde às declividades. Nesse caso, considerou-se um custo igual a 1 (um) para o maior valor de declividade da primeira classe, no caso 10%, e um custo igual 10 (dez) para uma declividade igual a 40%. Considerando que a quarta classe contém todas as declividades maiores que 30%, os custos associados correspondem ao custo máximo (valor 10).

Os novos valores para as declividades após reclassificação são apresentados na Tabela 3.2, bem como os custos atribuídos que deverão ser usadas quando da utilização da ferramenta Sobreposição Ponderada. As informações de declividades, geradas a partir do MDT, consistiram de uma representação em 9 (nove) classes com amplitudes de intervalo muito pequenas e irregulares. Optou-se, então, por uma representação em 4 (quatro) classes com amplitudes de intervalo, iguais e de maior valor, de maneira que os custos atribuídos em cada classe fossem melhor distribuídos.

Tabela 3.2 Classes de Declividade, seus novos valores após reclassificação e custos

Declividade em %	Novos Valores	Custos
0-10	1	1
10-20	2	4
20-30	3	7
> 30	4	10

Através da extensão *Spatial Analyst*, foi obtida a reclassificação da matriz espacial de Declividade usando os valores antigos e os novos valores das classes de declividade de acordo com a Tabela 3.2.

Com um procedimento análogo ao aplicado à imagem matricial de Declividade, foi feita a reclassificação das imagens matriciais Dist_Euc_Rios, Dist_Euc_Rodovias e de Altitudes, obedecendo aos novos valores mostrados, respectivamente, nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5.

A geração das imagens matriciais a partir da aplicação da função de Distância Euclidiana (*Euclidean Distance*) para os *buffers* de rodovias e rios, consistiram de uma representação em 9 (nove) classes com amplitudes de intervalo irregulares. Optou-se, então, por uma representação em 4 (quatro) classes com amplitudes de intervalos iguais, considerando a distância na qual esses *buffers* foram criados (30 m para rodovias e 100 m para rios), de maneira que os custos atribuídos em cada classe fossem melhor distribuídos.

Tabela 3.3. Classes de Distâncias dos Rios, seus novos valores após reclassificação e custos

Distância_Rios (em metros)	Novos Valores	Custos
0-100	1	10
100-200	2	7
200-300	3	4
>300	4	1

Tabela 3.4. Classes de Distâncias das Rodovias, seus novos valores após reclassificação e custos.

Distância_rodovias (em metros)	Novos Valores	Custos
0-30	1	1
30-60	2	4
60-90	3	7
>90	4	10

A Tabela 3.5 a seguir apresenta os novos valores para as altitudes após reclassificação, bem como os custos atribuídos que deverão ser usados quando da

utilização da ferramenta Sobreposição Ponderada. Optou-se então por uma representação em 6 (seis) classes com amplitudes de intervalo igual a 68 m, de maneira que se fizesse uma melhor distribuição das altitudes na área de estudo para atribuição dos custos.

Tabela 3.5. Classes de Altitude, seus novos valores após reclassificação e custos (Adutora de Bocaina).

Altitude_P_Carga (em metros)	Novos Valores	Custos
161-229	1	1
229-297	2	3
297-365	3	5
365-433	4	6
433-501	5	8
501-569	6	10

3.2.3.4 Determinação dos locais mais adequados para locação do traçado da adutora

Nesta etapa, foi obtida a ponderação e combinação dos conjuntos de dados reclassificados, no caso as imagens matriciais (Planos de informação) Altitude_P_Carga_Rec, Declividade_Rec, Dist_Rios_Rec e Dist_Rodovias_Rec para encontrar os locais mais adequados para a delimitação do traçado da adutora.

O método de ponderação utilizado foi baseado na comparação par a par. Conforme apresentado, esta técnica utiliza uma matriz quadrada $n \times n$ de comparação entre os n critérios, onde as linhas e as colunas correspondem aos critérios. Os critérios são comparados a partir da definição de uma escala destinada a orientar as comparações efetuadas, conforme proposto por Saaty (1980).

Os valores utilizados na comparação par a par, dos planos de informação, foram obtidos pela aplicação de um questionário DELPHI (APÊNDICE A). Para a aplicação desse questionário, foram entrevistados 10 especialistas com reconhecido

conhecimento acerca de sistemas adutores. Os entrevistados (Engenheiros Civis) foram: o Diretor de Recursos Hídricos e o Gerente de Projetos da SEMAR, o Gestor de Planejamento de Obras Hídricas da Secretaria de Infraestrutura de Pernambuco (SEINFRA), o Superintendente da Superintendência de Desenvolvimento Urbano (SDU- Sul) da cidade de Teresina – Piauí, dois professores da Universidade Federal do Piauí (UFPI), três professores do IFPI (Instituto Federal do Piauí) e dois professores da Universidade Estadual do Piauí (UESPI).

Uma vez obtidos os pesos, os mesmos foram aplicados aos planos de informação padronizados para a geração do mapa final de aptidão. Para esse procedimento, foi usada uma ferramenta denominada Sobreposição Ponderada (*Weighted Overlay*). O resultado dessa operação é uma imagem matricial de custo, decorrente da ponderação e combinação dos planos de informação reclassificados.

A combinação dos planos de informação é feita de acordo com a influência de cada um. Quanto maior a porcentagem, mais influência uma determinada entrada terá no modelo de adequação.

Na sequência, é descrito um conjunto de passos para aplicação da ferramenta *Weighted Overlay* (Sobreposição ponderada) de acordo com *Spatial Analyst* tutorial (ESRI, 2012d):

- Definir a escala de avaliação. A escala padrão é de 1 a 9, incrementada em 1. Uma escala de 1 a 10 incrementada em 1 foi usada, quando da padronização dos planos de informação do projeto deste trabalho.
- Insirir um a um os planos de informação reclassificados (raster), no caso Altitude, Declividade, Distância de Rios e Distância de Rodovias.
- Mudar os valores (custos) da escala padrão para os valores definidos nas Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.
- Atribuir uma porcentagem de influência para cada raster, com base na importância (ou peso) que cada um deve ter no mapa final de aptidão, no caso, os pesos para Altitude, Declividade, Distância de Rios e Distância de Rodovias. Este procedimento é baseado no método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), descrito na seção 3.2.3.4.1.

Em decorrência da execução dessa ferramenta foi adicionada uma nova camada a tabela de conteúdos do ArcGis, denominada Custo Total. Dessa forma, foi

determinada uma superfície que apresenta os custos totais referentes aos locais para a locação do traçado da adutora.

3.2.3.4.1 Demonstração do método AHP

Uma demonstração matemática do método AHP pode ser vista em Santos, Louzada e Silva (2010), e tem a finalidade de determinar os pesos estatísticos das imagens matriciais individuais. Essa ponderação dos dados tem como propósito fazer com que o mapa represente de forma mais real as condições da área de estudo. Nesse sentido, a utilização do método AHP se mostra adequada considerando que a decisão do problema ocorre em níveis hierárquicos.

Deve ser construída a matriz de comparação (matriz de decisão) par a par, que utiliza a escala fundamental de Saaty, na qual se pode definir linearmente a hierarquia de importância entre os critérios pré-definidos.

A avaliação dos pesos estatísticos se dá através da Razão de Consistência (RC), a qual deverá apresentar um valor menor que 0,10. Trabalhos de pesquisa como os desenvolvidos em Primahardhika (2007) e Yildirim e Yomralioglu (2011), realizam uma avaliação dos pesos estatísticos através do método AHP. A razão de Consistência é calculada pela equação a seguir:

$$RC = IC/IR, \text{ onde} \quad 3.2$$

RC: Razão de Consistência

IR: índice aleatório que pode ser extraído da tabela 3.7

IC: índice de consistência calculado pela seguinte equação:

$$IC = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1), \text{ sendo que} \quad 3.3$$

n: número de variáveis testadas (número de linhas ou colunas)

$\lambda_{\max}$: autovetor, dado pela equação:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]_i}{wi} \quad 3.4$$

Onde,

[Aw]_{ij}: matriz resultante do produto da Matriz de Comparação par a par (Capítulo 2 – seção 2.2.5) pela Matriz dos Pesos w_i (Capítulo 2 – seção 2.2.5).

Tabela 3.6- Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n, de acordo com o Laboratório Nacional de Oak Ridge, EUA

N	2	3	4	5	6	7
IR	0,0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32

Fonte: Santos, Louzada e Silva (2010)

3.2.3.5 Determinação do melhor caminho para locação do traçado da adutora

A função de Caminho de Custo (*Cost Path*) do Spatial Analyst determina o melhor caminho (menor custo) a partir de um ponto de destino para uma fonte. Essa função exige que um destino seja especificado e usa dois *rasters* (Imagens matriciais), derivados do uso da ferramenta de Distância de Custo (*Cost Distance*): as imagens matriciais de distância e direção de custo. Essas matrizes são obtidas a partir das funções (distância de custo e direção de custo) que determinam a menor distância ponderada (custo de viagem acumulada) de cada pixel para o pixel mais próximo a partir do pixel de origem, em unidades de custo, e não em unidades geográficas.

A função de Distância de Custo utiliza uma imagem matricial de origem e uma imagem matricial de custo. As equações a seguir, descritas em SANTOS, LOUZADA e SILVA (2010), são utilizadas para determinar a distância de custo .

$$DCP_{LC} = resolução \times \left(\frac{custo1 + custo2}{2} \right) \quad 3.6$$

Onde:

- DCP_{LC} :distância de custo do pixel adjacente para linha L e coluna C
- resolução: resolução espacial do pixel
- custo1 e custo2: custos dos pixels 1 e 2, respectivamente

$$DCP_{LC} = DCP'_{LC} + resolução \times \left(\frac{custo1 + custo2}{2} \right) \quad 3.7$$

Onde:

- DCP'_{LC} : distância de custo do pixel adjacente calculado anterior para linha L e coluna C

$$DCP_{LC} = 1,4142 \times resolução \times \left(\frac{custo1 + custo2}{2} \right) \quad 3.8$$

Onde:

- DCP_{LC} : distância de custo do pixel em diagonal para linha L e coluna C

- $1,4142 = \sqrt{2}$: comprimento da diagonal que une os centros de dois pixels em diagonal

$$DCP_{LC} = DCP'_{LC} + 1,4142 \times resolução \times \left(\frac{custo1 + custo2}{2} \right) \quad 3.9$$

Onde:

- DCP'_{LC} : distância de custo do pixel em diagonal calculado anterior para linha L e coluna C

A Figura 3.6 ilustra essa situação: uma matriz com a identificação de alguns pixels e seus custos, no caso, de maneira genérica como custo1, custo2 e custo3.

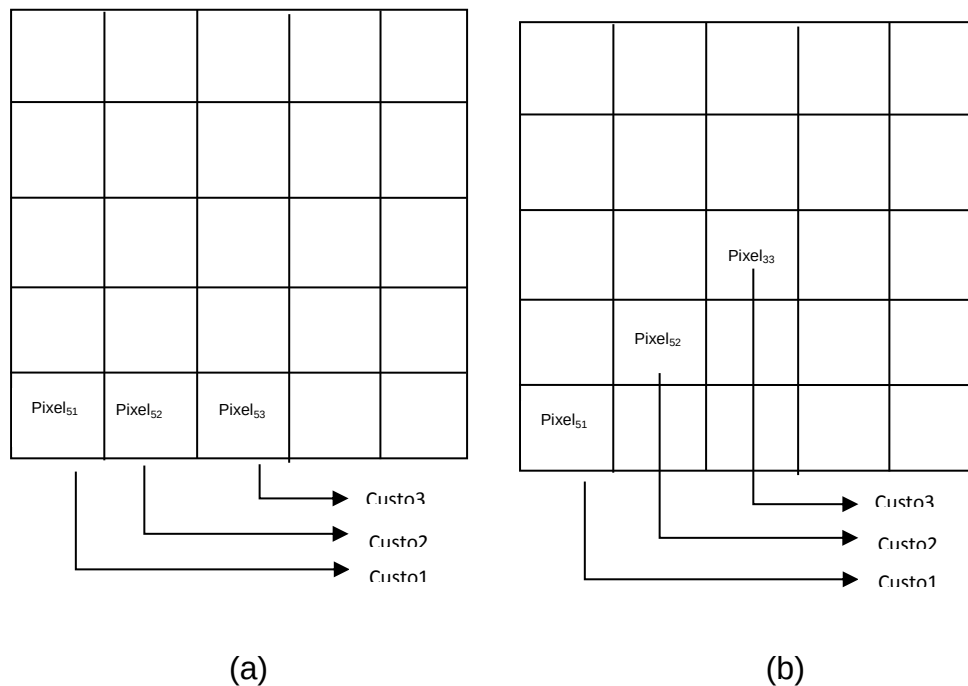


Figura 3.6 – (a) Distância de custo do pixel adjacente (b) Distância de custo do pixel em diagonal

A seguir, um procedimento que mostra a aplicação da função de distância de custo, no qual partimos dos pixels (Pixel₁₅ e Pixel₅₁) da imagem matricial de origem, Figura 3.7 (a), e da imagem matricial de custo, Figura 3.7 (b), e consideramos os valores dos pixels vizinhos (Pixel₁₄, Pixel₂₄, Pixel₂₅, Pixel₄₁, Pixel₄₂ e Pixel₅₂). Os resultados para esses pixels estão na Tabela 3.8 e foram obtidos a partir das equações 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9. Esses resultados compõem parcialmente a imagem matricial de distância de custo, onde os custos dos demais pixels são obtidos de maneira análoga, a partir dos menores valores de DCP_{LC} da imagem matricial de custo e dos valores dos pixels vizinhos. No caso desses cálculos iniciais, os menores valores são dos pixels (Pixel₂₄ e Pixel₄₂).

				1
1				

10	10	10	10	1
10	5	5	1	10
10	5	1	5	10
10	1	5	5	10
1	10	10	10	10

Figura 3.7 - Imagem matricial de origem (a) e de custo (b) para geração da imagem matricial de distância de custo

Fonte: Adaptado de Santos, Louzada e Silva (2010).

Na sequência cálculos para obtenção da Distância de Custo dos pixels. Como se pode perceber, os valores dos Pixel₁₃, Pixel₂₃ e Pixel₃₁ são obtidos de maneira cumulativa através das Equações 3.7 e 3.9.

$$DCP_{14} = 30 \times \left(\frac{1 + 10}{2} \right) = 165$$

$$DCP_{24} = 1,4142 \times 30 \times \left(\frac{1 + 1}{2} \right) = 42,426$$

$$DCP_{25} = 30 \times \left(\frac{1 + 10}{2} \right) = 165$$

$$DCP_{41} = 30 \times \left(\frac{1 + 10}{2} \right) = 165$$

$$DCP_{42} = 1,4142 \times 30 \times \left(\frac{1+1}{2}\right) = 42,426$$

$$DCP_{52} = 30 \times \left(\frac{1+10}{2}\right) = 165$$

$$DCP_{13} = 42,426 + 1,4142 \times 30 \times \left(\frac{1+10}{2}\right) = 275,769$$

$$DCP_{23} = 42,426 + 30 \times \left(\frac{1+5}{2}\right) = 132,426$$

A matriz direção de custo é utilizada para refazer a rota de menor custo a partir do destino para a origem sobre a superfície de distância de custo. Quando se usa a função direção de custo, segundo Santos, Louzada e Silva (2010), cada pixel da imagem matricial de custo recebe um código que indica a direção do próximo pixel de custo mínimo, como mostra a Figura 3.8.

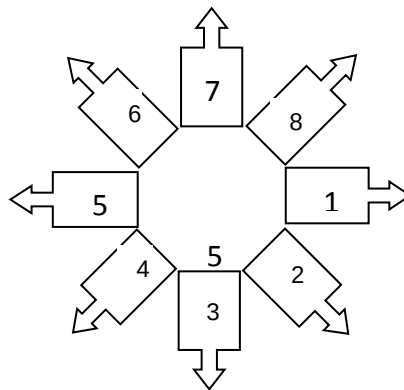


Figura 3.8 - Direção e código a ser atribuído à imagem matricial de direção custo.

Fonte: Santos, Louzada e Silva (2010).

A função de direção de custo também usa, a exemplo da função de distância de custo uma imagem matricial de origem e uma imagem matricial de custo (ESRI, 2012d). Quando se aplica essa função, os pixels representados com valor um (1) na imagem matricial de origem passam a ter valor zero (0) na imagem matricial de direção de custo, e a codificação dos outros pixels ocorre conforme a direção do próximo pixel de custo mínimo, conforme ilustração na Figura 3.8. Nesse sentido, quando da utilização das imagens matriciais de origem e de custo como as representadas na Figura 3.7, para geração da imagem matricial de direção de custo, teríamos como resultado os valores indicados na Figura 3.9.

2	3	2	1	0
1	2	1	8	7
2	3	8	7	8
3	4	5	6	5
0	5	6	7	8

Figura 3.9 - Imagem matricial de direção custo.

Percebe-se assim, que Imagem matricial de distância de custo mostra como os custos se acumulam, à medida em que ocorre um afastamento da origem, e a Imagem matricial de direção custo representa a direção de menor custo ao se fazer o caminho de volta a origem.

A função de Caminho de Custo (*Cost Path*) se utiliza portanto das imagens matriciais de distância e direção de custo para encontrar uma rota otimizada (melhor caminho) entre uma origem e destino. Neste trabalho, o objetivo é usar essa ferramenta para determinar o melhor caminho entre um ponto de origem, captação do Sistema Adutor Bocaina (Piauí), situado na barragem de Bocaina, e um destino no caso um reservatório na cidade de Picos, passando ainda pela cidade de Bocaina e de Sussuapara. No caso da Adutora do Pajeú (Pernambuco), o ponto origem corresponde à cidade de Serra Talhada e os destinos às cidades de Calumbi, Flores, Triunfo e Santa Cruz da Baixa Verde.

Os passos a seguir foram utilizados para a produção desse caminho, de acordo com metodologia descrita em ESRI (2012d) para uso da função Caminho de Custo do *Spatial Analyst*.

- Criar o conjunto de dados Origem. A Origem é o ponto de captação da adutora.
- Criar os conjuntos de dados de custos (imagens matriciais de custo), decidindo quais são necessários, e reclassificando-os a uma escala de medição comum ponderando-os, e em seguida, combinando-os.

- Realizar análise de distância de custo utilizando a origem e os conjuntos de dados de custos como entradas. O conjunto de dados (imagem matricial) de distância de custo criado a partir da função Distância de Custo (*Cost Distance*) é uma quadrícula, em que o valor de cada célula (pixel) é o custo acumulado de viajar a partir de cada célula, à medida em que se afasta da origem.
- Para encontrar o caminho menos oneroso, é necessário um conjunto de dados (imagem matricial) de direção, o qual foi criado como um conjunto de dados adicional usando a ferramenta Custo de Distância. Isso permite realizar uma varredura da direção do caminho menos oneroso de cada célula de volta para a origem.
- Criar o conjunto de dados de Destino. Nesse caso, o conjunto de dados de destino são os pontos de destino da água através da adutora.
- Realizar análise de Caminho de Custo (Função *Cost Path*) usando os conjuntos de dados de distância e direção criados com a função Distância de Custo.

Os APÊNDICES B.1 e B.2 contêm as figuras que representam o uso das funções *Cost Distance* (Distância de Custo) e *Cost Path* (Caminho de Custo), respectivamente. Essas funções permitiram a execução dos procedimentos computacionais para a aplicação das funções-objetivo Distância de Custo, Direção de custo e Caminho de Custo.

3.3 ESTRUTURAÇÃO DA REDE DO SISTEMA ADUTOR

Um dos objetivos deste trabalho é a criação de um banco de dados georreferenciado da rede de transporte formada pelas principais instalações do Sistema Adutor de Bocaina, incluindo, o ponto de captação de água, estação de tratamento, torre piezométrica, sedes municipais, ramais de derivação e reservatórios, e pela rede viária (principais rodovias da área de estudo).

Para isso foi usada a base de dados já criada para o desenvolvimento da análise espacial que permitiu fazer a simulação do traçado da adutora, com sua devida atualização, uma base de dados com as localizações da rede (instalações da adutora) e uma ferramenta de análise de rede (*Network Analyst*) do ArcGis para a caracterização da rede e para determinação da melhor rota (menor custo) entre

pontos específicos da rede e instalações do sistema, bem como para resolver problemas relacionados à determinação de instalações nas proximidades de um dado ponto da rede do sistema adutor. Com isso, espera-se contribuir na diminuição de custos globais com transporte e construção, bem como com a operação e manutenção, de forma a permitir melhoria na qualidade do produto e serviços oferecidos.

As aplicações *Route* (Otimização de Percursos) e *Closest Facility* (Instalação mais Próxima) da extensão *Network Analyst* do *ArcGis* foram utilizadas no modelo, de forma a permitir o desenvolvimento da análise de rede.

Nesse sentido, a metodologia descrita nas subseções seguintes está relacionada ao uso das diversas aplicações do *Network Analyst* na solução de problemas de rede que incluem otimização de rotas, localização de instalação nas proximidades de pontos (instalações) da rede do sistema adutor. A descrição dos problemas a serem resolvidos com essas aplicações pode se referir à fase de implantação ou de operação e manutenção da adutora.

Algumas das soluções apresentadas para a fase de manutenção que tratam, por exemplo, da determinação de percursos ótimos (melhor caminho) entre instalações, podem perfeitamente serem aplicadas na fase de implantação na qual existe a necessidade do transporte de materiais, equipamentos ou pessoas entre os locais das futuras instalações da adutora.

A metodologia utilizada para a estruturação e análise da rede do Sistema Adutor de Bocaina foi resumida no fluxograma da Figura 3.10.

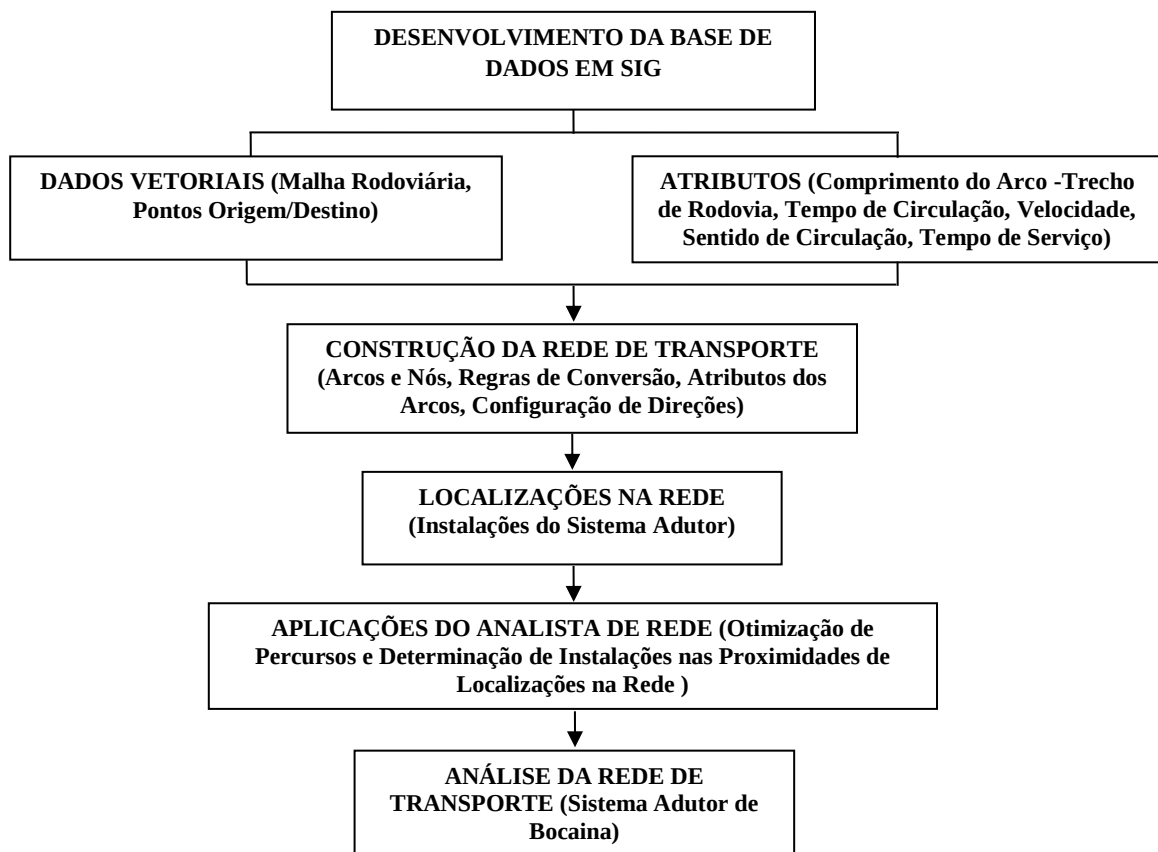


Figura 3.10 – Fluxograma da Metodologia para Estruturação e Análise da Rede do Sistema Adutor Bocaina - Picos

3.3.1 Elementos e atributos da rede

Os *Network Dataset* (Conjuntos de dados de rede) são formados de elementos de rede, que por sua vez são gerados a partir de *source features* (feições de origem) usadas para criar o conjunto de dados de rede. A geometria (do tipo linha) das feições ajuda a estabelecer a conectividade. Os elementos de rede possuem atributos que controlam a navegação através da rede (ESRI, 2012a).

De acordo com ESRI (2012a) existem três tipos de elementos de rede:

- *Edges* (Arestas): faz a conexão de outros elementos, os nós (junções), e são as ligações da rede;
- *Junctions* (Nós): conecta arestas e facilita a navegação;
- *Turns* (Conversões): armazenam informações que podem afetar o movimento entre duas ou mais arestas;

Edges (Arestas) e *Junctions* (nós) consistem na estrutura básica de qualquer rede. A conectividade numa rede lida com arestas de ligação e as junções entre si. Os *turns* são elementos opcionais que armazenam informações sobre um movimento de rotação particular; por exemplo, uma curva para a direita é proibida, pois não é permitida a navegação de uma determinada aresta para outra.

As Fontes de rede podem participar na construção de um *Network Dataset*. De acordo com (ESRI,2012a) existem três tipos de fontes de rede:

- *Edge feature sources* - uma classe de feição do tipo linha que participa como fonte de elementos de aresta;
- *Junction feature sources* - uma classe de feição do tipo ponto que participa como fonte de elementos de junção;
- *Turn feature sources*- uma classe de feição do tipo conversão que participa como fonte de elementos de conversão.

Uma classe de feição que participa de uma rede deve ser compreendida como uma fonte que gera elementos de rede com base em seu papel atribuído. Assim, uma classe de feição do tipo linha, como a que reúne as rodovias neste trabalho, é utilizada como uma fonte de elementos de aresta, sendo uma aresta um trecho de rodovias. Do mesmo modo, uma classe de feição do tipo ponto (os cruzamentos das rodovias) é utilizada para gerar elementos de junção (nó). Elementos de conversão são criados a partir de uma classe de feição do tipo *turn* (conversão). Os nós gerados, arestas e conversões formam a rede que nada mais é que um grafo.

Para cada extremidade de uma aresta em um *Network Analyst* deve existir uma junção (nó). Assim se não for criada uma fonte de elementos de junção, um sistema de junção será criado automaticamente durante a criação do *Network Analyst*. No caso, foi criado o sistema Rodovias_ND_Junções.

Como mencionado anteriormente, uma rede é um conjunto de arestas e um conjunto de pontos, no qual acontece a intersecção das arestas, originando junções (nós). No caso da rede estruturada neste trabalho, os trechos das rodovias correspondem às arestas e os cruzamentos dessas arestas correspondem aos nós da rede. A rede se constitui na estrutura principal de dados para aplicação de um *software* de análise de redes, considerando que qualquer funcionalidade do *software* requer o uso da rede (SILVA, 2009).

A caracterização dos elementos da rede ocorre através de atributos, que nada mais são que propriedades dos elementos de rede que controlam o fluxo através da rede. Em uma rede, restrições como sentido de fluxo, proibições, hierarquia da rede, impedâncias (resistência ao fluxo na rede) relativas ao comprimento da aresta ou ao tempo necessário para percorrê-la são modeladas através de atributos (ESRI, 2012b). Depois de digitalizada a aresta, o atributo relativo ao comprimento é definido automaticamente. Dependendo das características da rede pode-se definir a velocidade de circulação nessa rede.

3.3.2 Digitalização da rede

Nesta etapa foram criados os atributos que foram usados para caracterizar cada elemento da rede. Os atributos que tem como padrão os nomes: *Meters*, *Minutes* e *Oneway*, são usados para modelar restrições como sentido de fluxo, impedâncias relativas ao comprimento do arco e tempo necessário para percorrê-lo, respectivamente. O campo *Meters* (Figura 3.13), comprimento de arestas (trechos) de Rodovias, está relacionado aos campos MD_EXTENSAO da classe de feição Rodovias.

Foi criado o campo velocidade que corresponde à velocidade média de deslocamento na rede de rodovias, que é de 80 Km/h. O campo *Minutes* (tempo para percorrer um trecho de rodovias em minutos) foi calculado através de uma função matemática, onde o atributo MD_EXTENSAO da classe de feição Rodovias foi dividido pela velocidade média e o resultado multiplicado por 60.

O atributo *Oneway* (Sentido de fluxo na rede de rodovias) possui os seguintes valores: FT – Sentido único no sentido de digitalização da linha; TF – Sentido único no sentido contrário ao de digitalização da linha; Vazio – Dois sentidos. Os atributos usados para caracterizar cada elemento da rede estão na Figura 3.11 com seus respectivos valores.

Shape *	OBJECTID 1	nm sigla	cd classe	cd adminis	UF	md extensa	Meters	Velocidade	Oneway	Minutes
Polyline	1	BR-020	Rodovia	Federal	PI	0,490182181770249	490,182182	80		0,326788
Polyline	2	Sem Toponímia na Carta Impressa	Rodovia	Sem Informação	PI	8,85453959012625	8854,53959	80		5,903026
Polyline	3	BR-407	Rodovia	Federal	PI	39,0502637548623	39050,263755	80		26,033509
Polyline	4	Sem Toponímia na Carta Impressa	Outras Estradas	Sem Informação	PI	4,33781181595872	4337,811816	80		2,891875
Polyline	5	Sem Toponímia na Carta Impressa	Outras Estradas	Sem Informação	PI	15,0687257903603	15068,72578	80		10,045817
Polyline	6	PI-227	Rodovia	Estadual	PI	17,7715046733811	17771,504673	80		11,94787
Polyline	7	Sem Toponímia na Carta Impressa	Outras Estradas	Sem Informação	PI	6,47998625189266	6479,986252	80		4,319991
Polyline	8	Sem Toponímia na Carta Impressa	Rodovia	Sem Informação	PI	6,4363935105786	6436,393511	80		4,290829
Polyline	9	BR-407	Rodovia	Federal	PI	9,23941819311762	9239,418193	80		6,159612
Polyline	10	BR-407	Rodovia	Federal	PI	27,3310357656211	27331,035766	80		18,220691
Polyline	11	Sem Toponímia na Carta Impressa	Outras Estradas	Sem Informação	PI	34,1731467475711	34173,146748	80		22,782098
Polyline	12	PI-227	Rodovia	Estadual	PI	8,86208999918649	8862,089999	80		5,90806
Polyline	13	PI-245	Rodovia	Estadual	PI	12,0242919537832	12024,291954	80		8,016195
Polyline	14	PI-227	Rodovia	Estadual	PI	16,8386280351083	16838,628035	80		11,225752
Polyline	15	Sem Toponímia na Carta Impressa	Outras Estradas	Sem Informação	PI	16,7514470336202	16751,447034	80		11,167631
Polyline	16	Sem Toponímia na Carta Impressa	Rodovia	Sem Informação	PI	12,7479340844897	12747,934085	80		8,498623
Polyline	17	BR-230/BR-316	Rodovia	Federal	PI	9,62820802864447	9628,208029	80		6,418805
Polyline	18	PI-227	Rodovia	Estadual	PI	4,89919667373895	4899,196674	80		3,266131
Polyline	19	PI-227	Rodovia	Estadual	PI	1,70428203086239	1704,282031	80		1,136188
Polyline	20	BR-230/BR-316	Rodovia	Federal	PI	9,29544531595227	9295,445316	80		6,196964
Polyline	21	BR-407/PI-238	Rodovia	Estadual	PI	13,1738545925896	13173,854593	80		8,78257
Polyline	22	PI-227	Rodovia	Estadual	PI	9,02320318671759	9023,203187	80		6,015469
Polyline	23	Sem Toponímia na Carta Impressa	Outras Estradas	Sem Informação	PI	6,50513962634652	6505,139626	80		4,33676
Polyline	24	BR-230/BR-316/BR-407	Rodovia	Federal	PI	0,369338642592127	369,338643	80		0,246226
Polyline	25	Sem Toponímia na Carta Impressa	Outras Estradas	Sem Informação	PI	28,7550782921044	28755,078292	80		19,170052
Polyline	26	BR-230/BR-316	Rodovia	Federal	PI	2,58282893971424	2582,828984	80		1,721953
Polyline	27	BR-230/BR-316	Rodovia	Federal	PI	12,5206046442438	12520,604644	80		8,34707
Polyline	28	Sem Toponímia na Carta Impressa	Rodovia	Sem Informação	PI	27,8683915411143	27868,391541	80		18,578928
Polyline	29	BR-230/BR-316/BR-407	Rodovia	Federal	PI	0,780461206074384	780,461206	80		0,520307
Polyline	30	BR-407/PI-238	Rodovia	Federal	PI	1,82622716153571	1826,227162	80		1,217485
Polyline	31	BR-407/PI-238	Rodovia	Estadual	PI	9,04450836235439	9044,508362	80		6,029672
Polyline	32	BR-230/BR-316/BR-407	Rodovia	Federal	PI	0,273706041285729	273,706041	80		0,182471
Polyline	33	Sem Toponímia na Carta Impressa	Outras Estradas	Sem Informação	PI	15,7968322862586	15796,832286	80		10,531222
Polyline	34	BR-020	Rodovia	Federal	PI	14,2347676077002	14234,767608	80		9,489845
Polyline	35	BR-020/BR-230/BR-316	Rodovia	Federal	PI	18,3089939458928	18308,993946	80		12,205996
Polyline	36	PI-379	Rodovia	Estadual	PI	4,71855584391397	4718,555844	80		3,145704
Polyline	37	BR-230/BR-407	Rodovia	Federal	PI	6,09215863203223	6092,158632	80		4,061439
Polyline	38	BR-230/BR-316	Rodovia	Federal	PI	10,9103019194624	10910,30192	80		7,273535
Polyline	39	Sem Toponímia na Carta Impressa	Outras Estradas	Sem Informação	PI	20,705566438897	20705,566439	80		13,803711
Polyline	40	BR-407	Rodovia	Federal	PI	11,2321143379083	11232,114338	80		7,488076

Figura 3.11 - Atributos da Rede de Rodovias

O Quadro 3.1 descreve em detalhes os atributos da classe de feição Rodov_Piauí2, a qual contém as rodovias para a construção da rede de transporte deste trabalho.

Quadro 3.1 - Atributos da Rede de Rodovias

Atributo	Propriedades	Descrição	Observações
OBJECTID1	Object ID	Identificador único sequencial e dinâmico	Atributo automático
Shape	Geometry	Entidades do tipo linha ou arco	Atributo automático
Nm_sigla	Text	Sigla da rodovia	
Cd_classe	Text	Classe da estrada	
Cd_adminis	Text	Tipo de administração	
UF	Text	Unidade da Federação	
Md_extensao	Double	Comprimento do arco em Km	
Meters	Double	Comprimento do arco em metros	
Velocidade	Double	Velocidade de circulação no arco em km/h	
Oneway	Text	Sentido de fluxo na rede de rodovias Valores: FT – Sentido único no sentido de digitalização da linha; TF – Sentido único no sentido contrário ao de digitalização da linha; Vazio – Dois sentidos	
Minutes	Double	Tempo de circulação no arco em minutos	

3.3.3 Criação da *feature dataset*

No ArcCatalog do ArcGis foi criada a *Feature Dataset* (Conjunto de Dados de Feição) Rodovias_FD. Uma *feature dataset* corresponde a um conjunto de *feature classes* (classes de feição). Uma *feature class* é definida como um conjunto de características geográficas que possuem a mesma referência espacial e representação geométrica (ESRI, 2012a).

Do banco de dados da Adutora de Bocaina foram importadas as classes de feição Rodov_Piaui (Rodovias da área estudo), Origem (ponto de captação da água) e Destino (pontos de destino da água) as quais *foram* armazenadas em um mesmo local, no caso, a *feature dataset* configurada neste trabalho. A classe de feição Rodov_Piaui foi armazenada com o nome de Rodovias_Rede.

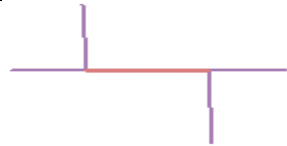
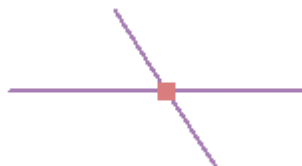
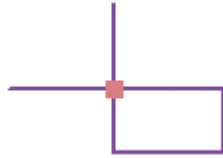
3.3.4 Topologia e validação da rede

Ainda no ambiente do ArcCatalog foi definida uma topologia para a rede dentro da *feature dataset* Rede_Adutora. A topologia se caracteriza como um conjunto de regras e procedimentos em que pontos, linhas e polígonos devem coexistir em espaços geométricos coincidentes (SILVA, 2009).

No ArcGIS, a topologia inclui um modelo de dados topológico, integrante do *geodatabase*, que usa um formato de armazenamento aberto para classes de feições simples (pontos, linhas e polígonos), regras topológicas e coordenadas topologicamente integradas entre feições com geometria compartilhada. O modelo de dados oferece então a capacidade de definir as regras de integridade e comportamento topológico das classes de feição que participam de uma topologia.

Na Tabela 3.12 são mostradas as regras topológicas utilizadas no projeto, assim como a descrição de quando devem ser utilizadas, a possível correção que o software oferece e a ilustração de um exemplo para melhor entendimento.

Quadro 3.2 - Descrição, reparo e exemplo de regras topológicas

Regra	Descrição	Reparo	Exemplo
Must Not Overlap (não deve se sobrepor)	Aplica-se onde segmentos de linha não podem ser duplicados	Subtract (subtrair)	
Must Not Intersect (não deve se cruzar)	Aplica-se em linhas de contorno que não devem se cruzar ou onde há interseção nos pontos finais	Split (dividido) Subtract (subtrair)	
Must Not Self-Overlap (não deve sobrepor consigo mesma)	Podem tocar-se ou cruzar, mas não ter segmentos coincidentes.	Simplify (simplificar)	
Must Not Self-Intersect (não deve cruzar consigo mesma)	Esta regra é útil para linhas, tais como as linhas de contorno, que não podem se cruzar.	Simplify (simplificar)	

Fonte: (ESRI, 2012a)

Depois da escolha das regras se fez necessário efetuar a validação da rede e correção dos possíveis erros topológicos. Esses procedimentos foram realizados automaticamente pelo software logo após a criação da topologia. A classe de feição utilizada para validar a topologia criada foi Rodovias_Rede.

3.3.5 Construção do *network dataset*

Para que seja possível usar a extensão *Network Analyst do ArcGis* faz-se necessário construir a estrutura da rede. Usando os módulos do *ArcCatalog*, foi criado um *Network Dataset* (conjunto de dados de rede), que nada mais é do que uma rede formada por linhas, junções e conversões, relacionadas espacialmente (ESRI,2012b). Em um *Network Dataset* são estabelecidas as restrições da rede, modeladas através de atributos.

Nesse caso, estamos interessados em otimizar essas variáveis designadas de impedâncias, que representam uma resistência ao fluxo na rede. Os atributos METERS (comprimento de trechos da classe de feição Rodovias) e MINUTES

(Tempo para percorrer um determinado trecho na rede de rodovias) foram utilizados para determinar as impedâncias para percorrer a rede.

Nos passos seguintes são descritos os procedimentos para criar um *Network Dataset* de acordo com (ESRI, 2012a).

3.3.5.1 Denominação do *network dataset* e seleção das *feature class*

Para o *Network Dataset*, foi utilizada a *Feature Class* (classe de feição) Rodovias_Rede dentro da *Feature Dataset* Rede_Adutora. Essa classe de feição integra o *Network Dataset* Rodovias_ND configurado para percursos com veículos nas rodovias.

Na sequência, foi feita a opção através do software para que o modelo se transformasse em uma rede. Uma verificação importante se refere às conversões em cruzamentos de rodovias onde podemos estabelecer proibições. Para efeito deste trabalho não foi feita nenhuma proibição de conversões, considerando que para as rodovias em questão não existem essas proibições.

3.3.5.2 Definição das políticas de conectividade e de elevação

Nesse procedimento foi configurado o modelo de conectividade para a rede de transporte. Podemos definir uma conectividade *End Point* (nas extremidades) ou *Any Vertex* (em qualquer vértice).

Se a conectividade for apenas nas extremidades, classes de feição do tipo de linha tornam-se arcos e unem-se apenas em vértices coincidentes nas extremidades. O cruzamento de duas linhas não representa conectividade (ESRI, 2012a). A figura 3.12 ilustra essa alternativa.

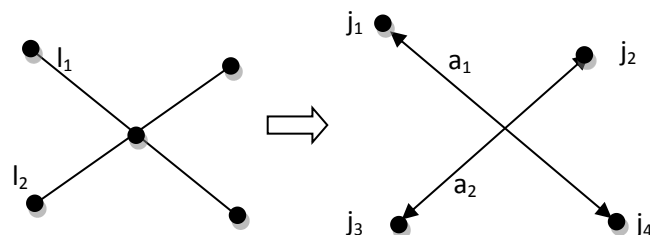


Figura 3.12 - Cruzamento de duas linhas que não representa conectividade
Fonte: Adaptada de ESRI (2012a),

Neste caso, a feição do tipo linha l_1 transforma-se no arco a_1 e feição do tipo linha l_2 transforma-se no arco a_2 . Haverá sempre um arco criado para uma feição de acordo com esta política de conectividade. Construir redes com conectividade *End Point* é uma maneira de modelar objetos de passagem, como viadutos e pontes.

Se for definida uma conectividade em qualquer vértice, classes de feição do tipo linha como *Rodovias_Nete* são divididas em várias arestas com vértices coincidentes. Esta situação é ilustrada na Figura 3.13.

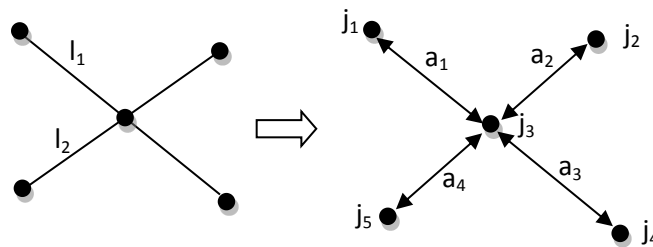


Figura 3.13 - Conectividade em qualquer vértice

Fonte: Adaptada de ESRI (2012a).

Dessa forma, segundo (ESRI, 2012a), duas polilinhas que atravessam uma posição de vértice partilhado são divididas em quatro arestas, com uma junção no vértice. As arestas a_1 e a_3 são identificadas com a classe de feição fonte e objeto ID (Identificador de objeto) da feição do tipo linha l_1 . As arestas a_2 e a_4 são identificadas com a classe de feição fonte e objeto ID da feição do tipo linha l_2 . A junção j_3 será uma junção do sistema recém-criado. As Junções j_1 , j_2 , j_4 e j_5 serão junções do sistema ou junções de pontos coincidentes de uma classe de feição fonte.

Para o Network Dataset *Rodovias_ND* foi definida uma conectividade em qualquer vértice. A definição dessa política é importante, porque para a classe de feição *Rodovias_Nete*, as rodovias podem conectar-se, umas com as outras, em qualquer vértice.

Outro aspecto relacionado com as políticas de conectividade estabelecidas na extensão *Network Analyst* do ArcGIS, é a definição de grupos de conectividade (ligação). Cada *edge source* (fonte de aresta) está associada à exatamente um grupo de conectividade, e cada *junction source* (fonte de junção) pode ser associada a um ou mais grupos de conectividade. Um grupo de conectividade pode conter qualquer número de fontes (arestas ou pontos de junção).

A forma como elementos de rede podem se conectar depende dos grupos de conectividade nos quais esses elementos se encontram. Por exemplo, duas arestas criadas a partir de duas classes de feição distintas podem se conectar se elas estão no mesmo grupo de conectividade. No entanto, se elas são separadas em grupos de ligação, as arestas não podem se ligar, a menos que sejam unidas por uma junção que participa em ambos os grupos de conectividade.

Os grupos de conectividade são usados para modelar sistemas de transporte multimodal (redes de modais diferentes). Nesses sistemas, um *network dataset* é baseado em *geodatabase*, e suporta múltiplos planos de informação para formar os arcos (arestas) e junções da rede. Exemplo disso são os casos de integração de redes, como linhas de metrô e de eixos de logradouro. Nesse caso, teríamos dois grupos de conectividade e as arestas podem ser unidas por uma junção, como as entradas do metrô, que participa em ambos os grupos de conectividade (ESRI, 2012b).

A Figura 3.14 ilustra esta situação com dois grupos de conectividade e com uma política de conectividade nas extremidades.

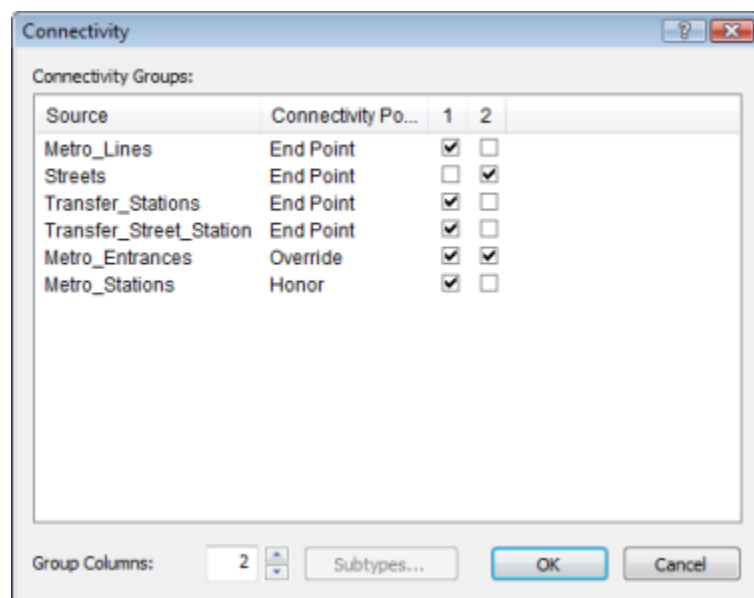


Figura 3.14 - Exemplo de definição de conectividade com dois grupos

Fonte: (ESRI, 2012b).

No caso do estudo apresentado neste trabalho, o *network dataset* para percursos com veículos nas estradas (Rodovias_ND) é baseado em *shapefile* e suporta apenas um plano de informação para compor os arcos da rede. Assim,

temos apenas um grupo de conectividade, e com uma política de conectividade em *Any Vertex* (qualquer vértice).

Campos de elevação de acordo com (ESRI, 2012a) são utilizados em *Network Dataset* (conjunto de dados de rede) para refinar a conectividade nas extremidades das linhas. Eles contêm informações de elevação derivadas de campos de uma classe de feição que participa da rede. Eles armazenam valores lógicos de elevação, que não devem ser confundidos com altitude. É importante salientar que os campos de elevação são complementares e não substituem a conectividade.

Para o *Network Dataset* estruturado para a análise de rede proposta aqui não existem dados de elevação, e a política é de **conectividade em qualquer vértice**, portanto, foi feita uma opção na qual não serão usados campos de elevação. No entanto, em outras situações como da modelagem de viadutos e pontes esses campos devem ser considerados.

Um aspecto importante a considerar na análise de rede é a configuração de Dados Históricos de Tráfego. Os dados de tráfego fornecem informações sobre como velocidades de deslocamento em segmentos rodoviários específicos podem mudar de acordo com o momento. Isto é relevante na análise de rede porque o tráfego afeta o tempo de viagem, que por sua vez afeta os resultados (ESRI, 2012b).

Dessa forma, é possível que se encontre as rotas mais rápidas com base em hora e dia da semana. Por exemplo, o percurso mais rápido entre duas cidades às 8:30 h da manhã de sexta-feira (durante o horário de trânsito intenso) poderia ser diferente do que a rota mais rápida entre as mesmas cidade às 13:00 h do domingo. Mesmo se o caminho do percurso for o mesmo, o tempo que leva para chegar ao destino poderia variar. No entanto, este tipo de configuração só pode ser feita quando a construção da rede é baseada em *Geodatabase* (dois ou mais *shapefile*), ou seja, quando se tratar de redes multimodais, o que não é caso das redes estudadas neste trabalho, que são baseadas em um único *shapefile*.

3.3.5.3 Configuração, verificação, renomeação e criação de atributos de rede

Atributos de rede são propriedades dos elementos de rede que controlam a navegação através da rede. Exemplos de atributos incluem o tempo para viajar um

determinado comprimento de estrada, o comprimento relacionado ao traçado de uma adutora ou a velocidade de um veículo ao longo de uma determinada estrada.

O *Network Analyst* do *ArcGIS* analisa a classe (ou classes) de feição usada como fonte, e procura por campos comuns como *Meters*, *Minutes*, *Oneway*, *Name* e *Type*. Ao encontrar esses campos, ele cria automaticamente os atributos de rede correspondentes, e designa os respectivos campos para eles. Isto pode ser visto através do campo *Evaluators* (ESRI, 2012a). É feita Uma descrição das configurações *Evaluators* (*Avaliadores*) ainda nessa seção. Foram configurados automaticamente os atributos *Meters*, *Minutes* e *Oneway* para os dados da rede *Rodovias_ND* como mostra Figura 3.15.

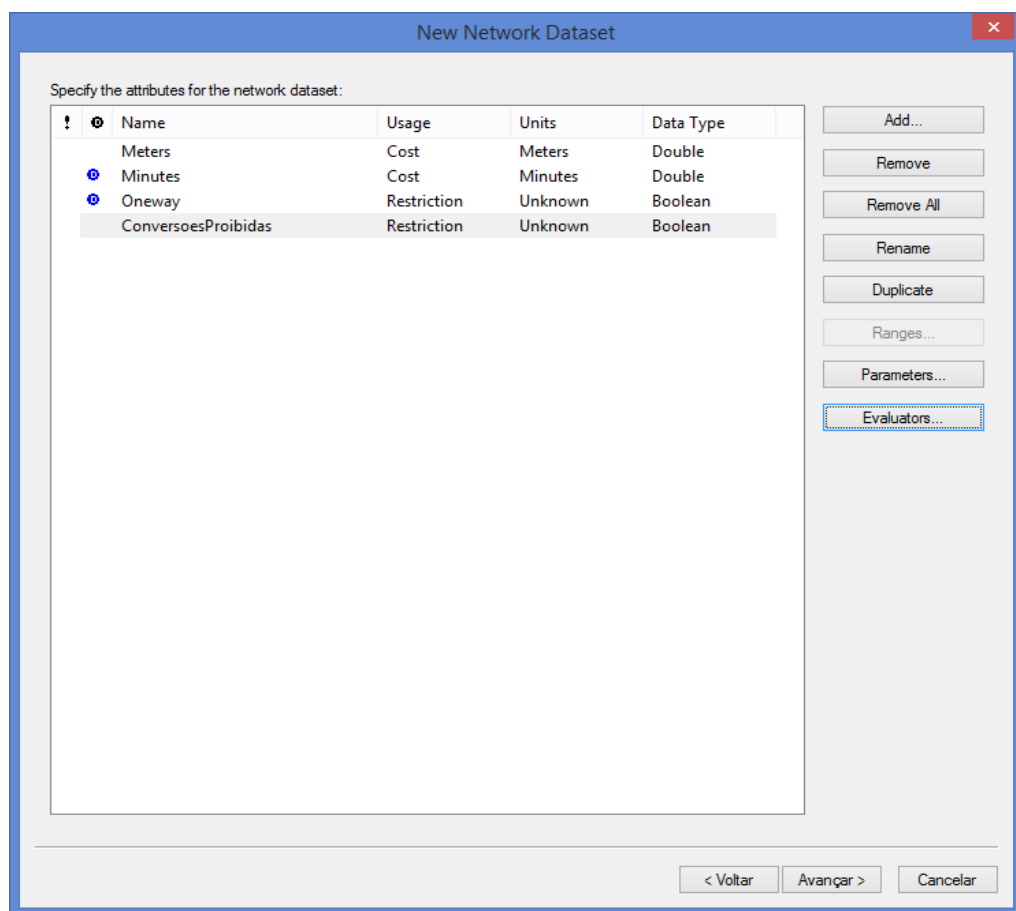


Figura 3.15 - Atributos de rede configurados automaticamente pelo *Network Analyst* para *Rodovias_ND* mais o atributo *ConversoesProibidas*

O atributo *Meters* foi renomeado, de maneira mais adequada ao estudo para *Distância_Rota*, que representa o comprimento de um arco, em metros, num dado percurso na rede, e o atributo *Minutes* foi renomeado para *Tempo_Rota*, que

representa o tempo gasto, em minutos, para percorrer uma determinada rota na rede. O atributo *Oneway* representa o sentido de circulação na rede.

Atributos de rede também podem ser criados utilizando o assistente para um novo *Network Dataset* (quando da definição de uma nova rede), ou na guia Atributos da caixa de diálogo Propriedades do *Network Dataset*. Em qualquer uma das duas opções, para criar atributos de rede, inicialmente deve se definir o nome do atributo e seu uso, as unidades, e o tipo de dados. Em seguida, deve se atribuir Avaliadores para cada fonte que irá fornecer os valores para o atributo de rede quando o *Network Dataset* é construído. Isto é feito escolhendo o atributo e a opção Avaliadores.

A Figura 3.16 ilustra a criação do atributo *ConversoesProibidas* que é um atributo de restrição.

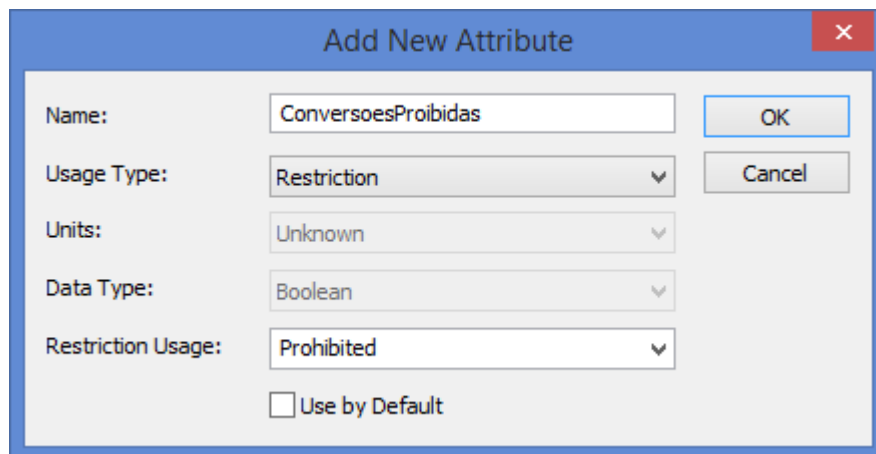
A imagem mostra uma caixa de diálogo intitulada "Add New Attribute" com uma barra de título azul e um botão de fechar (X) no canto superior direito. O formulário interno é branco e contém os seguintes campos: "Name:" com o texto "ConversoesProibidas" inserido; "Usage Type:" com o menu suspenso selecionado em "Restriction"; "Units:" com o menu suspenso selecionado em "Unknown"; "Data Type:" com o menu suspenso selecionado em "Boolean"; e "Restriction Usage:" com o menu suspenso selecionado em "Prohibited". Abaixo desses campos, há uma opção "Use by Default" com uma caixa de seleção vazia. À direita do formulário, há dois botões: "OK" e "Cancel".

Figura 3.16 - Criação do atributo *ConversoesProibidas*

O tipo de uso utilizado nesse atributo foi *Restriction* (Restrição), o tipo de dado foi *Boolean*, e foi modelado de acordo com a possibilidade de fazer ou não conversões nos pontos que representam junções (nós) nas rodovias. Não foi definido o uso padrão para esse atributo já que isso vai depender de análises de rede específicas, em função de uma dada solução de um problema de rede. O parâmetro *Restriction Usage* (Restrição de uso) é adicionado automaticamente para todos os atributos de restrição. O valor atribuído a este parâmetro determina se o atributo de restrição proíbe, como é caso do atributo (*ConversoesProibidas* usado neste trabalho), evita, ou mesmo prefere os elementos de rede que estão associados. O novo atributo foi adicionado à lista de atributos como mostra Figura 3.15.

3.3.5.4 Configuração de direções

Direções são instruções sobre como navegar em uma rota. Elas podem ser criadas para qualquer rota gerada a partir de uma análise de rede, desde que seja suportada pelo *Network Dataset*. Existem alguns requisitos mínimos (ESRI, 2012a) para um *Network Dataset*, de forma a suportar essas instruções, são eles:

- Um atributo de comprimento com unidades de comprimento. No caso o atributo *Meters* (Distância_Rota)
- Pelo menos uma fonte de aresta. A fonte utilizada foi a classe de feição Rodovias
- Pelo menos um campo de texto na fonte de aresta

As instruções geradas quando uma rota é calculada são customizáveis no nível do *Network Dataset*. Por exemplo, os nomes das rodovias utilizadas para indicações de relatórios e informações gerais são armazenados com o esquema do *Network Dataset* Rodovias_ND. Essas configurações podem então ser modificadas para personalizar as direções.

Para a rede de rodovias (Rodovias_ND) construída neste trabalho foi especificado o campo NM_SIGLA para relatar as indicações para os resultados da análise de rede. O campo NM_SIGLA contém os nomes das rodovias da área de estudo, que são necessários para ajudar a gerar direções de condução. Essa configuração é mostrada na Figura 3.17.

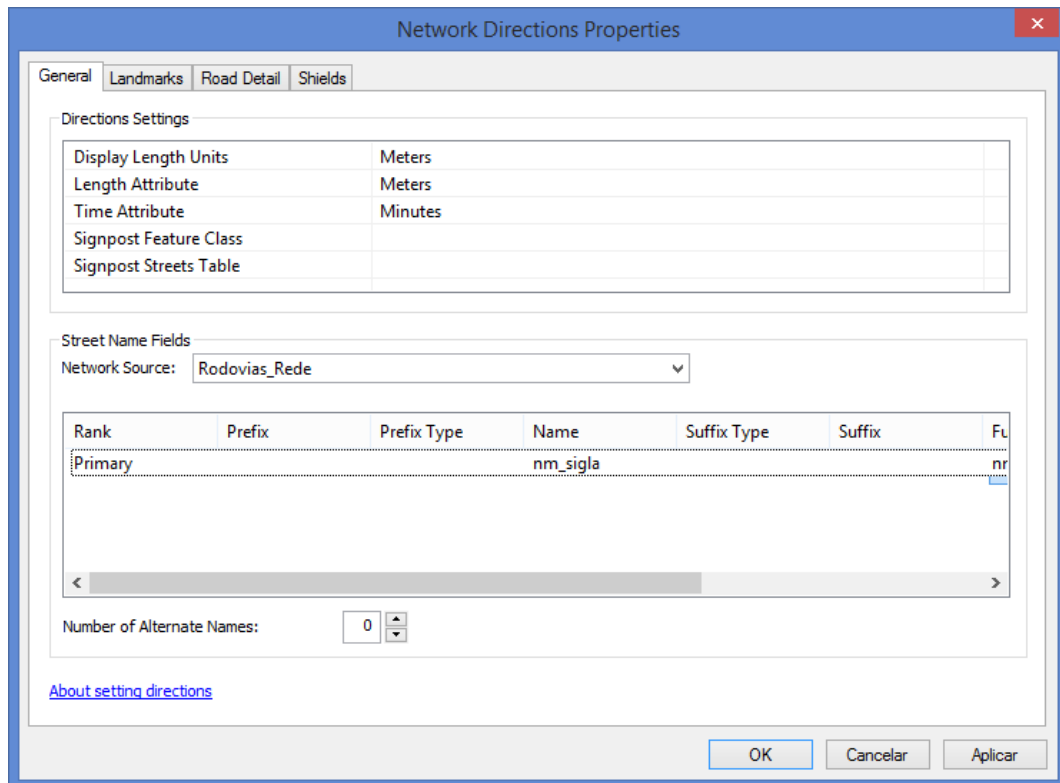


Figura 3.17 - Configurações de Direção para o *Network Dataset*

Na sequência de utilização da ferramenta *Build* (construir), pela qual o software irá construir a rede através das informações modeladas, conclui-se a construção do conjunto de dados (*Network Dataset*) Rodovias_ND. Durante esse processo de compilação foram determinados quais elementos de rede foram conectados e que valores foram atribuídos aos atributos do *Network Dataset*. Este procedimento deve ser considerado antes de ser executada qualquer análise de rede.

3.3.6 Localizações na rede (*network locations*)

As *Network Locations* (localizações na rede), são objetos específicos de análise da rede. Estes objetos estão ligados à rede e são usados pelo *Network Analyst* como dados de entrada (ESRI,2012a).

Essas localizações na rede incluem paradas, barreiras, instalações, incidentes, origens e destinos. Para efeito deste trabalho, são pontos que representam instalações do Sistema Adutor de Bocaina, como Captação de Água Bruta, Reservatórios, ETA, Torre Piezométrica, Ramais de Derivação da Adutora,

Centro de Comando e Automação do Sistema, entre outras, além de pontos que representam algumas sedes municipais do estado do Piauí.

Diferente de outros objetos de análise da rede, de acordo com ESRI (2012a) uma *Network Location* é um ponto posicionado junto ou sobre a rede, localizado geograficamente, que correspondem a um local no *Network Dataset*. Ainda de acordo com ESRI (2012a), tem quatro atributos obrigatórios que são:

- *SourceID*: O identificador numérico da classe de feição, fonte na qual o *Network Location* está localizado.
- *SourceOID*: O identificador numérico da feição fonte.
- *PosAlong*: A posição ao longo da direção digitalizada da feição do tipo linha de origem. Esse valor é armazenado como uma proporção; no entanto, é nulo se o local de rede faz referência a uma junção.
- *SideOfEdge*: O lado da aresta em relação à direção digitalizada da feição do tipo linha. Esse domínio é limitado a um domínio de dois valores: lado direito (1) e do lado esquerdo (2).

Quando uma *Network Location* é adicionada, o *software* automaticamente assume os atributos descritos acima. Uma *Network Location* só representa uma localização válida na rede se a sua geometria estiver dentro da tolerância de pesquisa das linhas que constituem a *Network Dataset*. A princípio, a tolerância definida é de cinco mil metros, podendo ser alterada em função de uma análise específica.

A introdução de uma *Network Location* ocorre de três formas diferentes:

- Criar as localizações interativamente (através da ferramenta *Create Network Locations*);
- Carregar as localizações a partir de bases de dados existentes (*Feature Class*);
- Carregar as localizações a partir de endereços conhecidos (*Geocode*);

A caracterização de cada localização na rede é feita através de um conjunto de atributos. Os atributos definidos nas *Network Locations* se referem às características das instalações do Sistema Adutor de Bocaina, aos dados dos

municípios beneficiados com a adutora e às características de acessibilidade temporal. Essas propriedades, no entanto, variam de acordo com o tipo de *Network Location*.

No contexto do Sistema Adutor, são exemplos de atributos das localizações na rede: características dos reservatórios e ramais de derivação, dados demográficos e domiciliares dos municípios da área de estudo.

Como dados de saída, o *software* fornece informações relativas ao tempo de chegada e partida a uma localização, tempo acumulado numa localização, tempo acumulado do percurso naquele ponto e, se aplicável, tempo violado, tempo de espera e tempo de espera acumulado.

3.3.7 Aplicações do *network analyst*

O *Network Analyst* permite que se resolva diversos problemas de rede, tais como: encontrar o melhor caminho entre dois pontos, encontrar uma instalação mais próxima de um ponto da rede, fazer a identificação de uma área de serviço em torno de um local ou escolher as melhores áreas para alocar uma instalação. Essas funcionalidades são apresentadas em forma de *layers* (camadas) e têm como requisito uma rede validada quando da criação do *Network Dataset*. Na sequência é feita uma breve descrição dessas funcionalidades.

3.3.7.1 Otimização de percursos (*route*)

A funcionalidade *Route* do *Network Analyst* foi desenvolvida para determinar o melhor percurso (caminho) entre dois pontos ou o melhor percurso incluindo vários pontos. No entanto, dependendo das circunstâncias, isto pode ter significados diferentes, pois o melhor percurso pode ser o mais rápido ou o mais curto dependendo do objetivo que se quer atingir. Nesse caso, esse objetivo se refere à minimização das variáveis tempo e distância (ESRI, 2012b).

Para criar uma camada de análise com aplicação *Route* foram usadas as ferramentas do *Network Analyst*. Esta camada é composta por cinco classes de análise de rede que são: *Stop*, *Routes*, *Point Barriers*, *Line Barriers*, e *Polygon Barriers* (ESRI, 2012a).

A classe *Stop* (Paradas) armazena as localizações de rede que são usadas como paradas em uma análise de percurso. No caso, esta opção foi usada para marcar pontos (instalações da rede como a ETA ou um reservatório, cidades, etc). A classe *Route* armazena a rota (ou rotas) resultante, a partir da análise. Dessa forma, foi possível obter o melhor caminho (rota) entre esses pontos.

As barreiras estabelecem restrições temporárias, através da adição de impedância (resistência ao fluxo na rede) em partes da rede.

A Figura 3.18 apresenta as propriedades da *layer Route* que foi adicionada ao *ArcMap*.

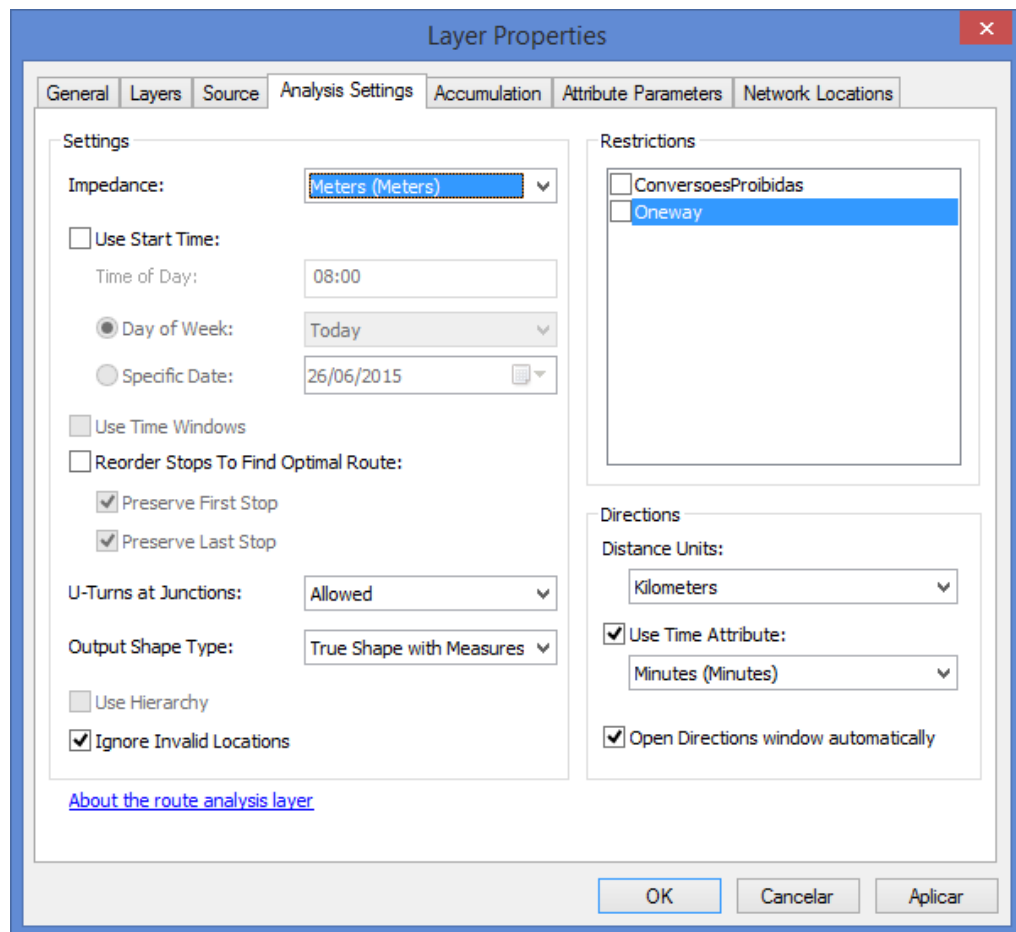


Figura 3.18 - Propriedades da *layer Route*

O campo *Impedance* (impedância) indica ao software qual é o campo da tabela de atributos que armazena os custos associados a cada arco da rede. No caso deste trabalho, a rota de custo mínimo significa aquela de menor distância ou menor tempo. Ainda podem ser usadas as opções para definir o horário que se inicia o percurso e a utilização de janelas temporais.

Por padrão, uma rota atravessa paradas numa ordem pre-definida. No entanto, podemos, eventualmente, encurtar ainda mais o caminho deixando *Network Analyst* encontrar a melhor ordem.

O *Network Analyst* pode permitir inversões de percurso em todos os lugares, em nenhum lugar, apenas em ruas sem saída ou somente nos cruzamentos e ruas sem saída. Ao Permitir inversões de percurso implica, que o veículo pode virar em uma junção e voltar na mesma via. Isto é importante nesse trabalho, pois nas rodovias que integram a rede, é permitida a inversão.

No campo de Restrições foi possível escolher quais atributos de restrição devem ser considerados em uma dada solução da análise. Para as análises deste trabalho, o atributo de restrição *Oneway* foi definido para que se estabelecesse o sentido do fluxo na rede de rodovias, que são naturalmente de duplo sentido. O atributo “*ConversoesProibidas*” permite ou não a realização de uma conversão nos cruzamentos das rodovias.

Com as propriedades do campo Direções, podemos definir as unidades de distância para a exibição e, opcionalmente, o tempo (caso um atributo de tempo seja definido). Dessa forma, foram obtidos relatórios com o itinerário que deverá ser seguido, com as parciais de cada trecho e a distância total a ser percorrida, além do tempo que deverá ser gasto.

3.3.7.2 Instalação Mais próxima (*closest facility*)

A funcionalidade *Closest Facility* (Instalação mais Próxima) é utilizada para encontrarmos instalações nas proximidades de pontos da rede (incidentes). Com essa solução pode ser especificado quais instalações e a direção do percurso que pode ser a partir da instalação para o ponto da rede (incidente) ou em direção a ela (ESRI, 2012a). Além de permitir que se encontrem as instalações mais próximas, o *Network Analyst* pode exibir a melhor rota (melhor caminho), devolver o custo do curso para cada rota e exibir as indicações de direção para cada instalação. Outra especificação pode ser um corte de impedância para além do qual o software não deve procurar uma Instalação.

Segundo a SEMAR (2012), no que se refere ao funcionamento do Sistema Adutor de Bocaina, para monitoramento da vazão veiculada pela adutora de água tratada, desde a saída da ETA até a chegada, no reservatório de distribuição de

Picos, foi prevista a instalação de medidores de vazão ao longo do seu caminhamento. Os medidores deverão ser implantados em cada um dos ramais de derivação e na linha principal, imediatamente após cada derivação, além de um medidor na saída da ETA e outro na chegada ao reservatório de distribuição de Picos.

Esses medidores de vazão são do tipo eletromagnético de imersão, que terão seus sinais recebidos pelo Centro de Comando e Automação do Sistema, permitindo o monitoramento contínuo da vazão veiculada pela adutora de água tratada, possibilitando identificar vazamentos ou falhas operacionais no sistema e tomar providências, de forma ágil, para sua resolução (SEMAR, 2012).

Dessa forma, neste trabalho, o Centro de Comando e Automação do Sistema, previsto para funcionar na cidade de Bocaina – PI, é referido, de acordo com a solução *Closest Facility* do *Network Analyst*, como uma *Facility* (Instalação), e os vazamentos ou falhas operacionais nos Ramais de Derivação, na saída da ETA ou no RAD (Picos) são referidos como um *Incident* (incidente). O *Network Analyst* permite então, que se execute várias análises *Closest Facility* (instalações mais próxima) simultaneamente. Isso significa que podemos considerar vários incidentes, como os que podem ocorrer nos Ramais (pontos) de Derivação da adutora, na ETA e no RAD, e encontrar a instalação mais próxima para cada incidente, no caso o Centro de Comando e Automação do Sistema.

Nas configurações da solução *Closest Facility* o campo *default cutoff value* (valor de corte padrão) foi definido para 50000 metros, o que significa que o software deve procurar instalações em um raio de 50 km. O campo *Travel From* (direção do percurso) foi especificado da instalação para os pontos da rede (incidente).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA LOCAÇÃO DO TRAÇADO DE ADUTORAS

O resultado da delimitação das áreas de estudo para os Sistemas Adutores de Bocaina e do Pajeú foi a geração dos mapas das Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. Para o sistema de referência espacial foi adotado o Datum SAD 69 (*South American Datum 1969*) e o sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator).

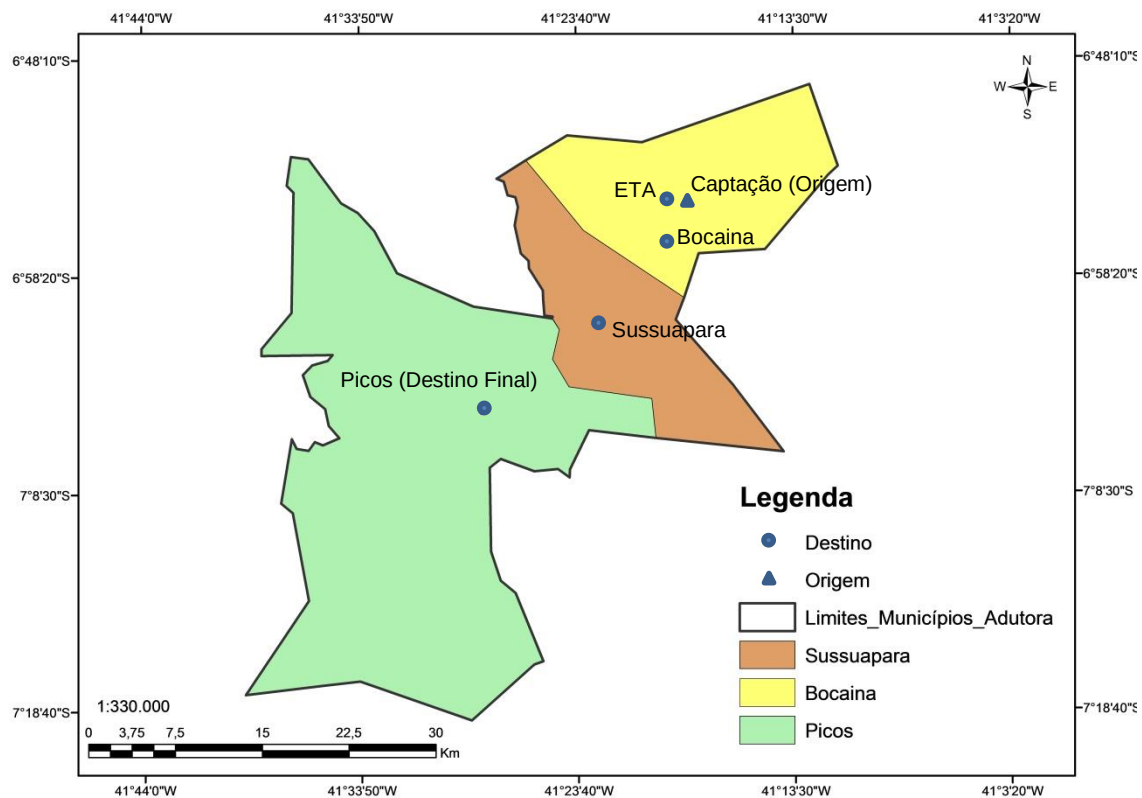


Figura 4.1 - Limites de estudo e os pontos de Origem e Destino (Adutora de Bocaina)

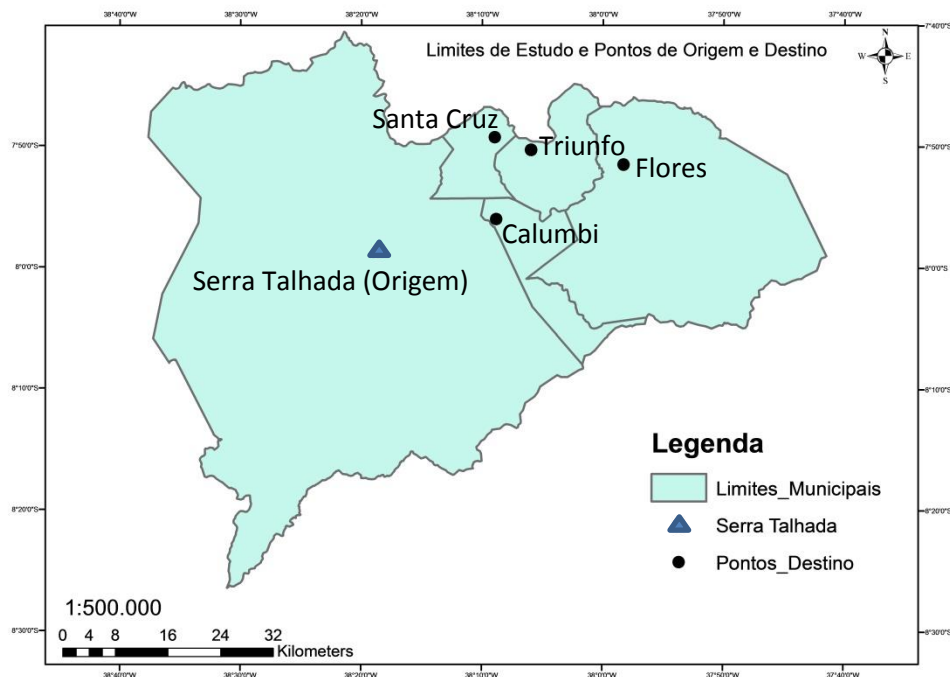


Figura 4.2 - Limites de estudo e os pontos de Origem e Destino (Adutora do Pajeú)

A base de dados em SIG, que permitiu iniciar as análises, é composta pelos planos de informação (variáveis) que compõem cada uma das etapas. Os planos de informação obtidos para a área de estudo do Sistema Adutor de Bocaina são apresentados nas Figuras que vão de 4.3 a 4.11. Por serem análogos, do ponto de vista da metodologia e da análise, os planos de informação obtidos para a área de estudo do Sistema Adutor do Pajeú foram omitidos.

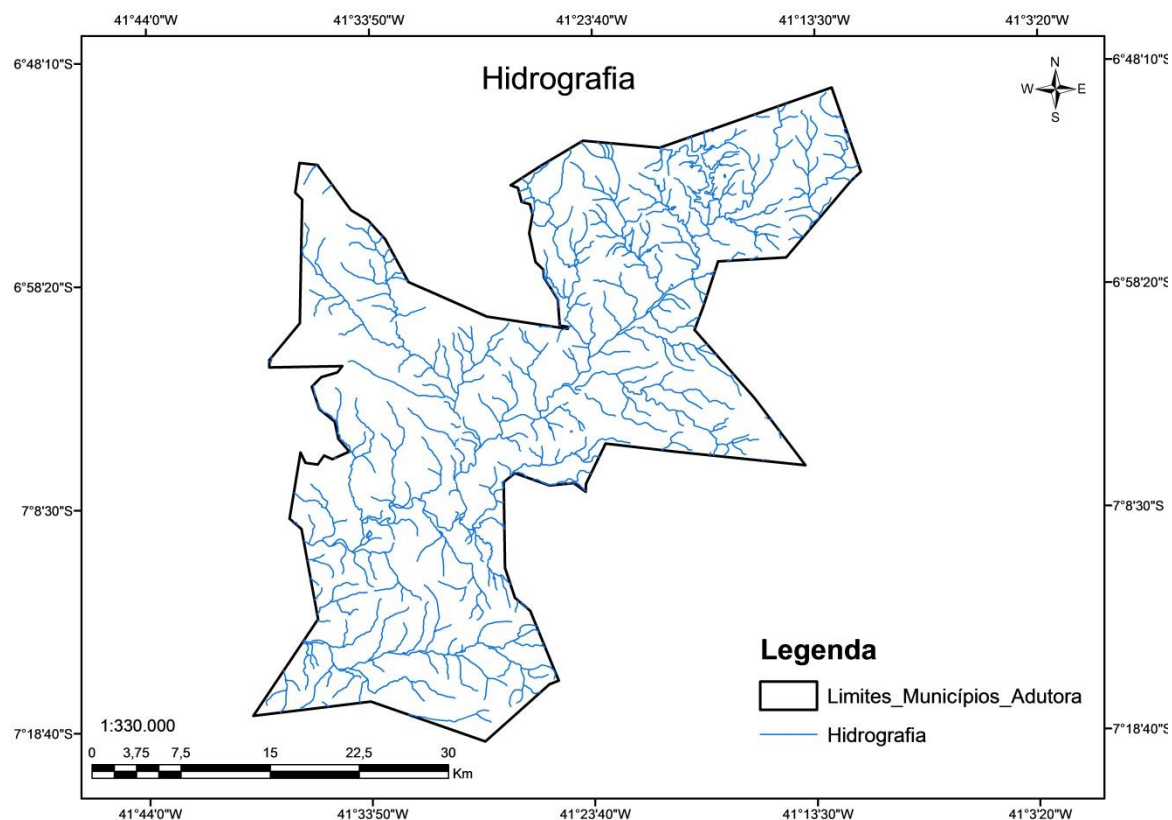


Figura 4.3 - Hidrografia da área de estudo (Adutora de Bocaina).

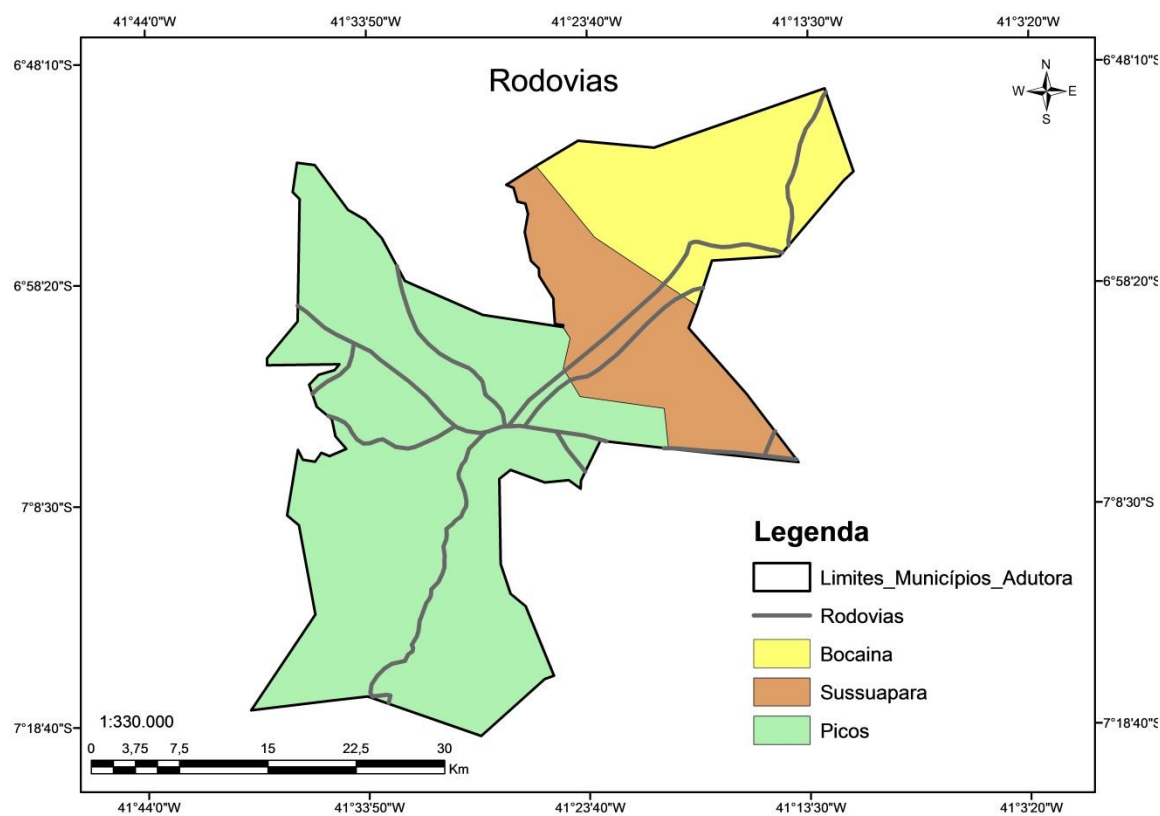


Figura 4.4 - Rodovias da área de estudo (Adutora de Bocaina)

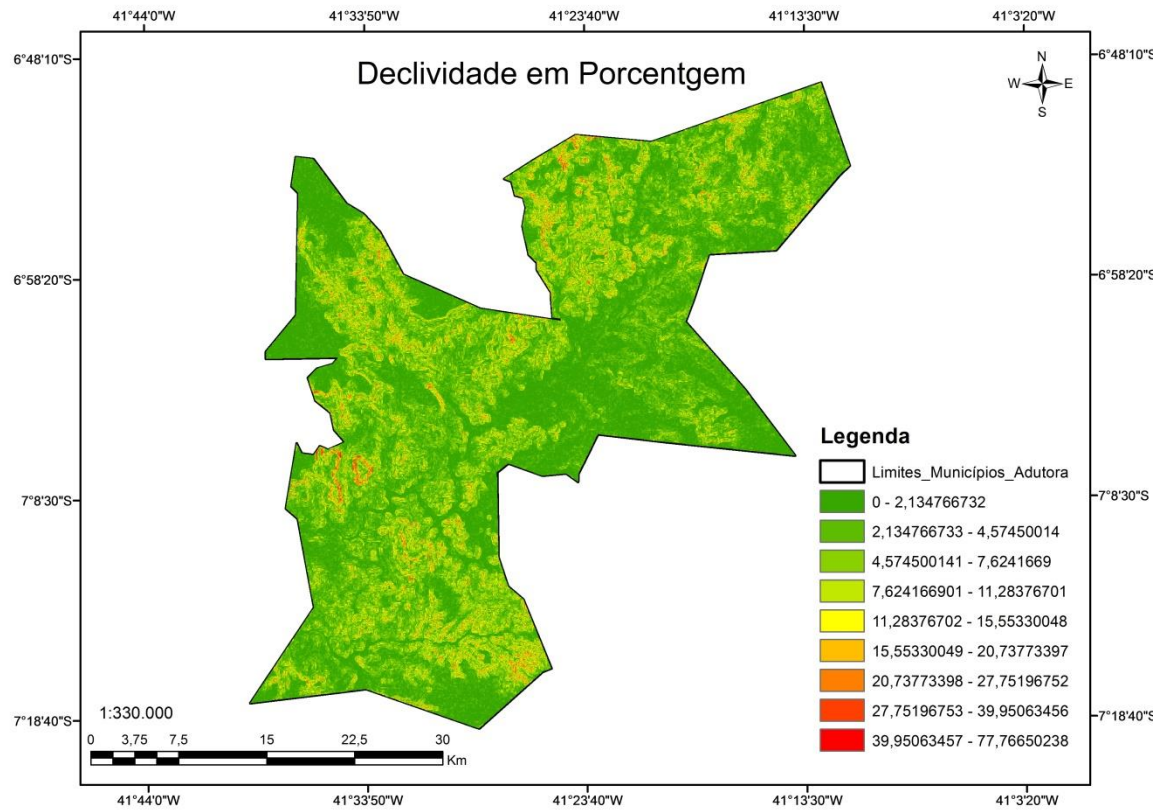


Figura 4.5 - Imagem Matricial de Declividade (Adutora de Bocaina).

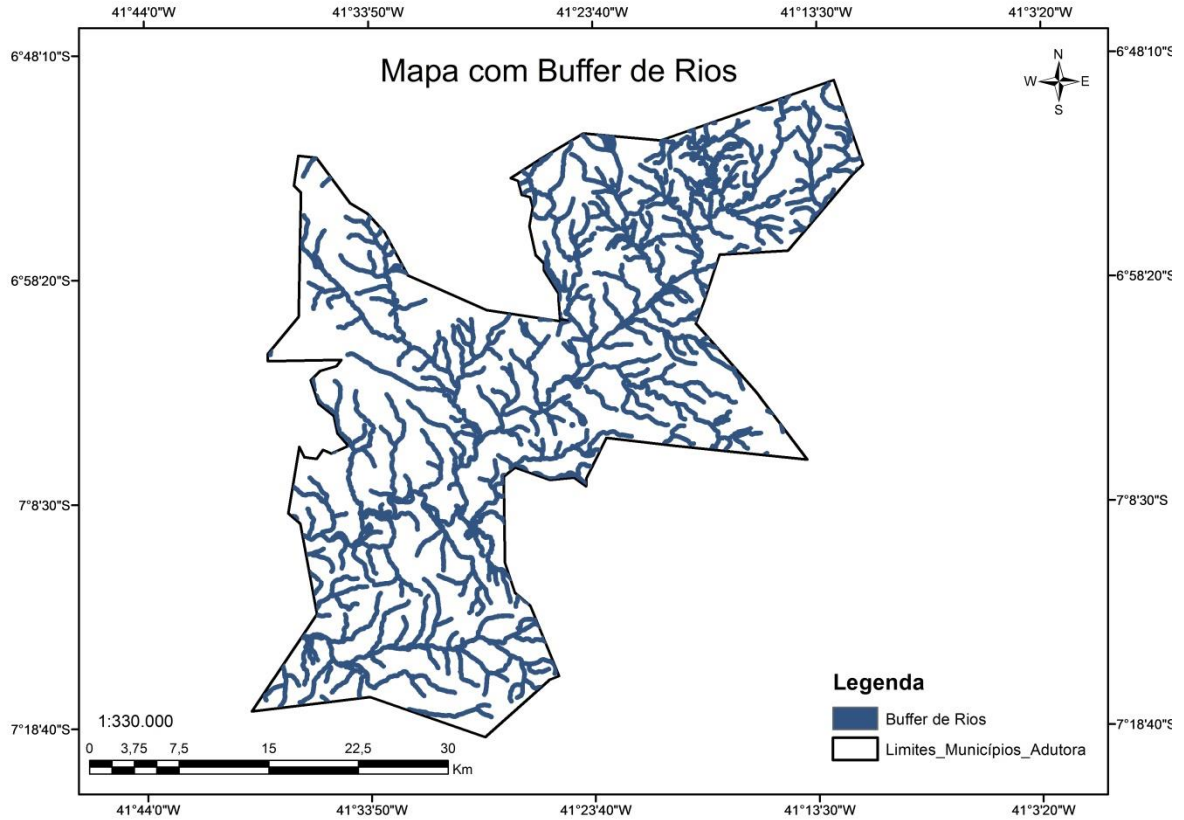


Figura 4.6 - Buffer de Rios da área de estudo (Adutora de Bocaina)

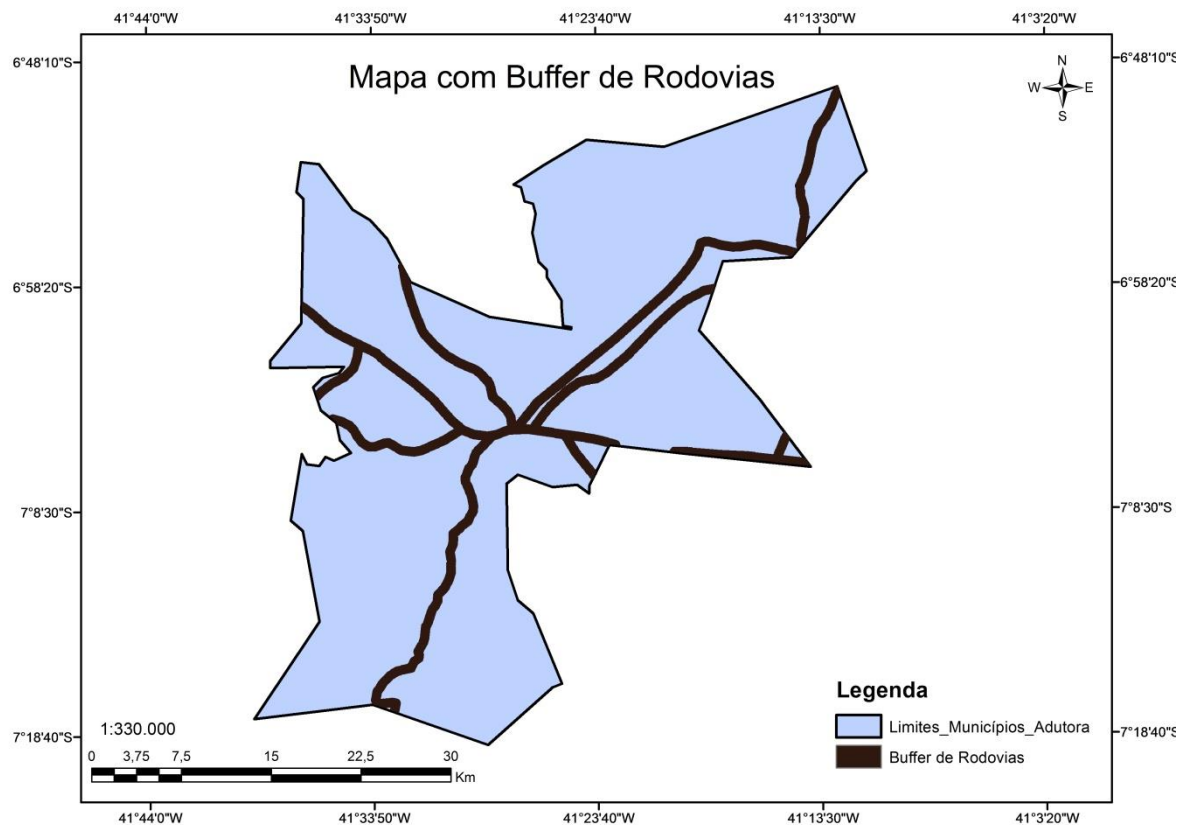


Figura 4.7 - Buffer de Estradas da área de estudo (Adutora de Bocaina).

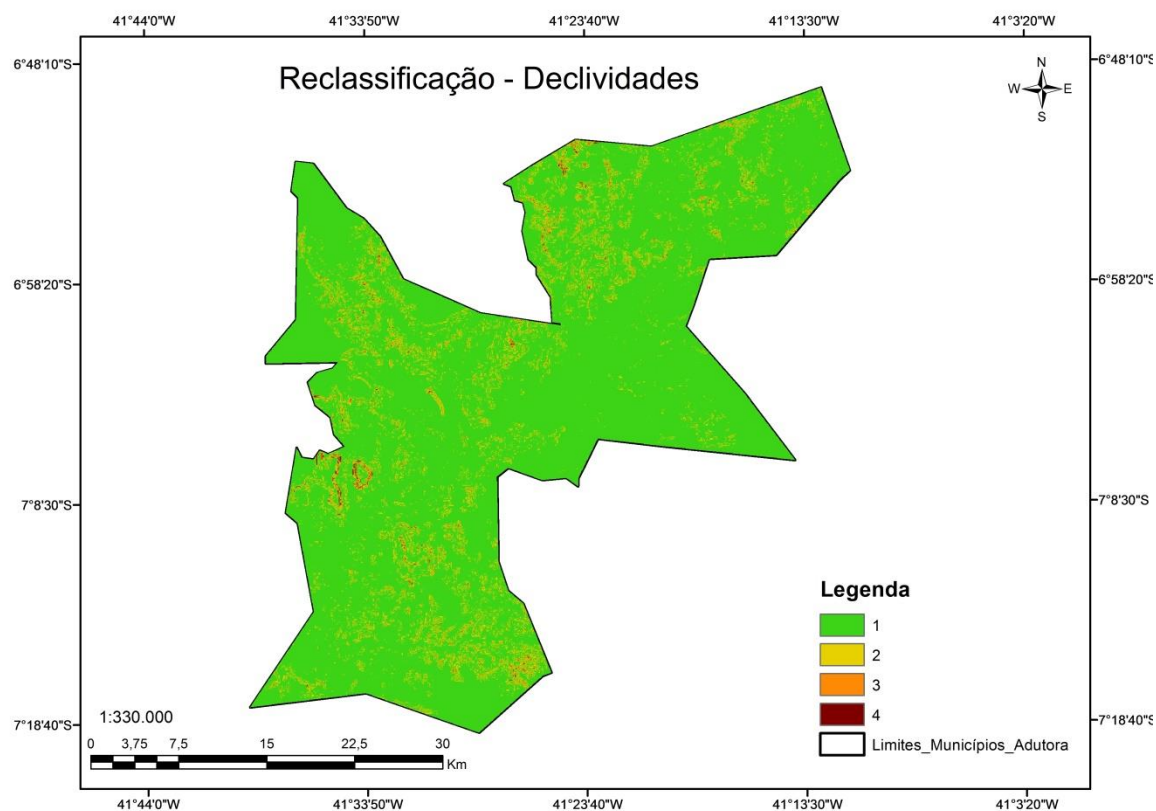


Figura 4.8 - Reclassificação da Imagem Matricial de Declividade (Adutora de Bocaina).

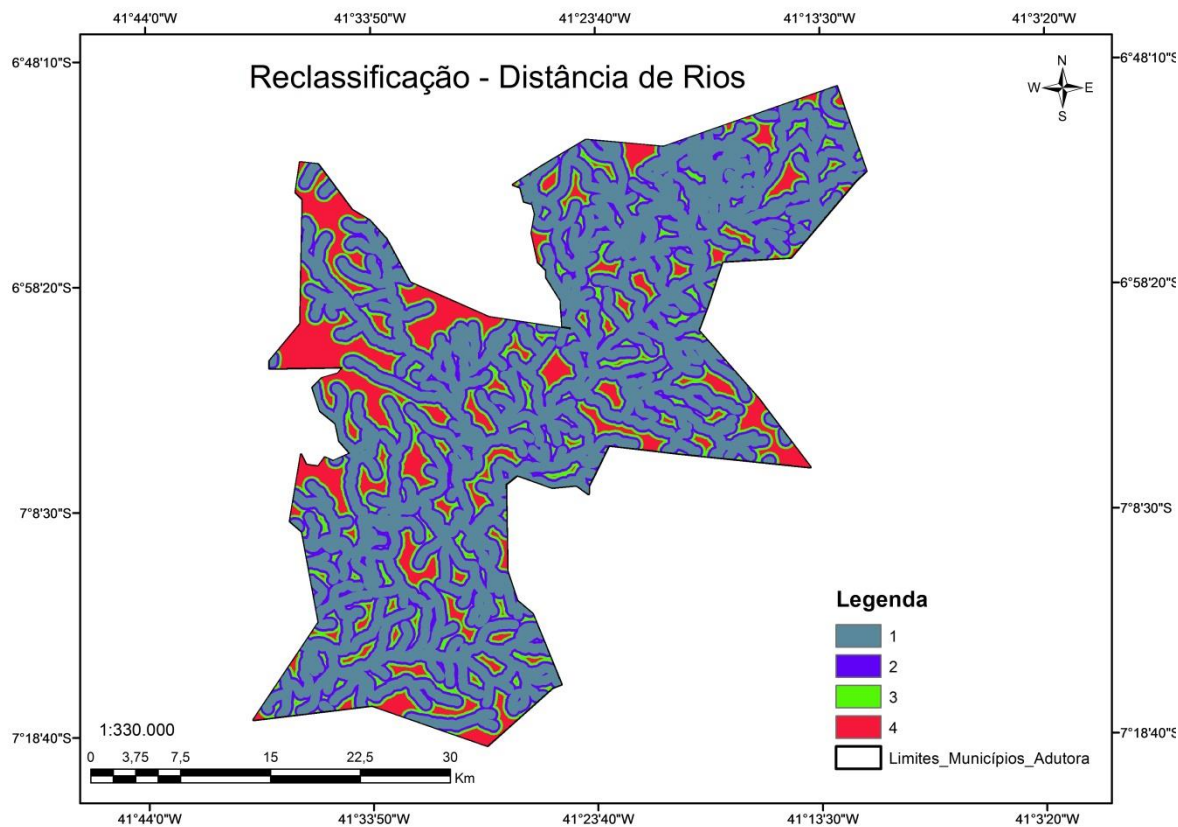


Figura 4.9 - Reclassificação da Distância Euclidiana para Rios (Adutora de Bocaina).

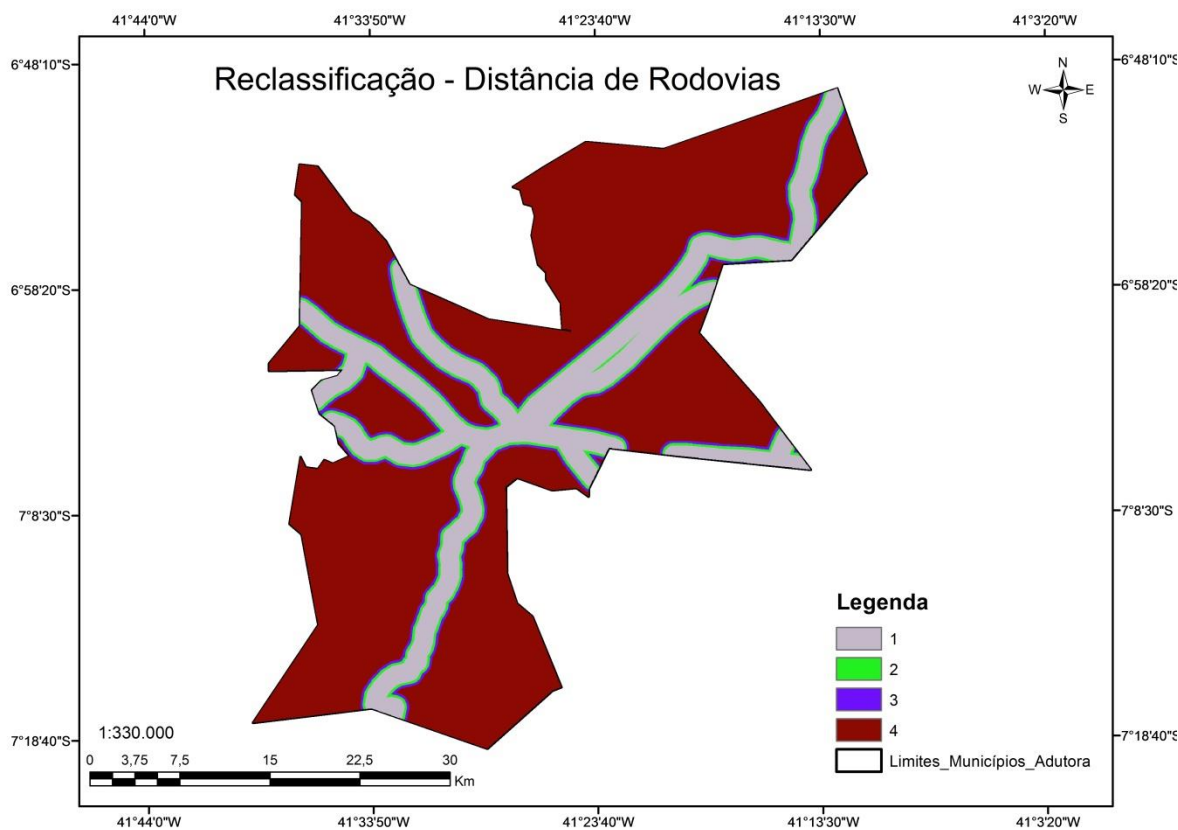


Figura 4.10 - Reclassificação da Distância Euclidiana para Rodovias (Adutora de Bocaina).

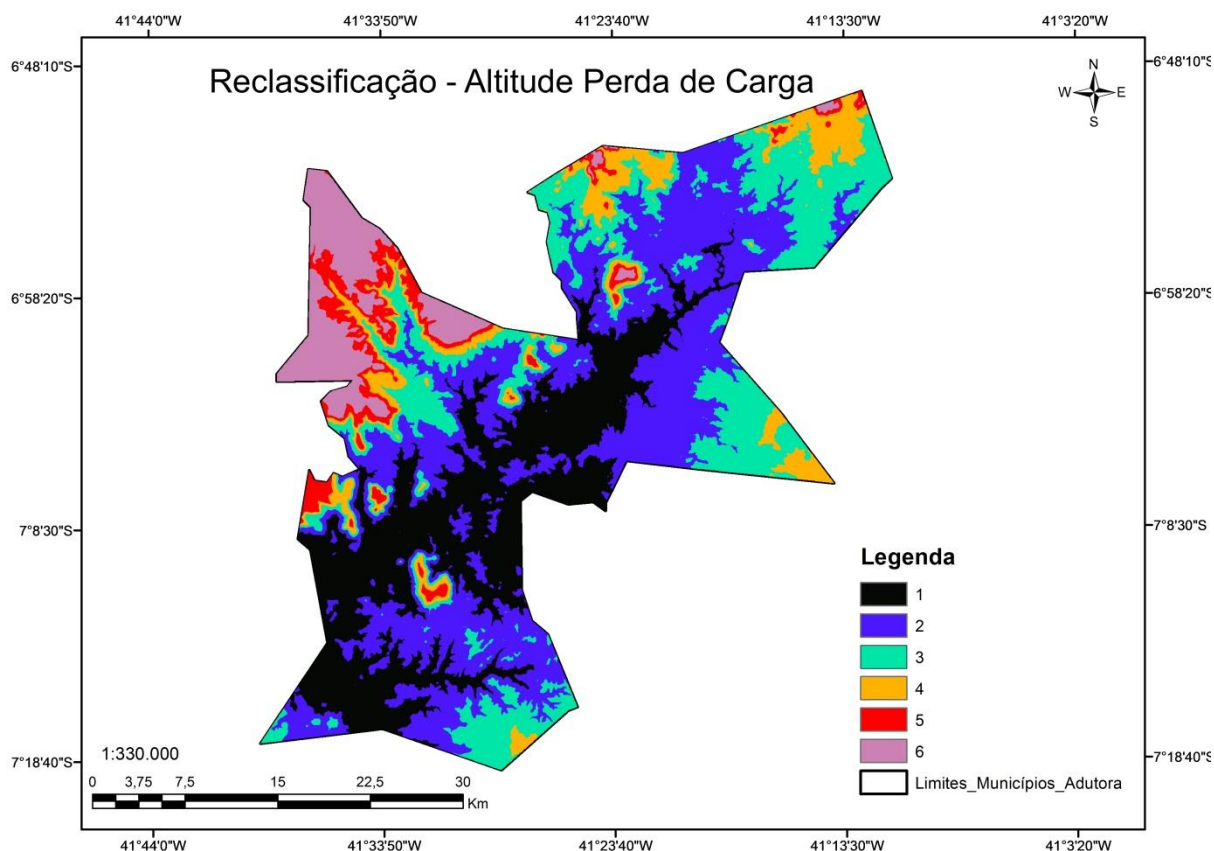


Figura 4.11 - Reclassificação da Imagem matricial de Altitude_P_Carga.

4.1.1 Determinação dos locais com potencial para a locação do traçado das adutoras

A aplicação do Questionário Delphi (APÊNDICE A) resultou nos valores de comparação apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Matriz de comparação par a par (Resultados)

Critérios	Declividade	Estradas	Rios	Altitude_P_Carga
Declividade	1	$1/3=0,333$	3	$1/3=0,333$
Estradas	3	1	3	$1/5=0,2$
Rios	$1/3=0,333$	$1/3=0,333$	1	$1/7=0,143$
Altitude_P_Carga	3	5	7	1

A Tabela 4.2 determina os pesos para cada variável usando os valores da Tabela 4.1. Os valores dessa tabela são determinados dividindo cada elemento pelo somatório dos elementos da coluna a que ele pertence e fazendo-se uma média entre as colunas, obtendo assim os pesos.

Tabela 4.2 - Determinação dos pesos para cada variável

Critérios	Declividade	Estradas	Rios	Altitudes_Perda_Carga	Pesos
Declividade	1/7,333=0,136	0,333/6,666=0,050	3/14=0,214	0,333/1,676=0,199	0,599/4=0,150
Estradas	3/7,333=0,409	1/6,666=0,150	3/14=0,214	0,2/1,676=0,119	0,892/4=0,223
Rios	0,333/7,333=0,045	0,333/6,666=0,05	1/14=0,071	0,143/1,676=0,085	0,251/4=0,063
Altitudes_Perda_Carga	3/7,333=0,409	5/6,666=0,750	7/14=0,50	1/1,676=0,597	2,256/4=0,564

Determinação da Razão de Consistência (RC), conforme (Capítulo 3 - Seção 3.2.3.4.1):

- Cálculo de A_w :

$$A_w = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 3 & 1/5 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1/7 \\ 3 & 5 & 7 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,150 \\ 0,223 \\ 0,063 \\ 0,564 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,598 \\ 0,974 \\ 0,265 \\ 2,570 \end{bmatrix}$$

- Cálculo do Autovetor ($\lambda_{\max}$) através da Equação 3.4:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{4} \left(\frac{0,598}{0,150} + \frac{0,974}{0,223} + \frac{0,268}{0,063} + \frac{2,570}{0,564} \right) = 4,260$$

- Cálculo do Índice de Consistência (IC) através da Equação 3.3:

$$IC = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) = (4,260 - 4) / (4 - 1) = 0,087$$

- Cálculo da Razão de Consistência (RC) através da Equação 3.2:

$$RC = IC/IR = 0,087/0,90 = 0,09 < 0,10$$

Isso significa que os pesos calculados para o modelo são aceitáveis. A Razão de Consistência ficou em 0,09 e os pesos para Declividade, Estradas, Rios e Altitude, valem, respectivamente, 0,150; 0,223; 0,063 e 0,564.

A partir da padronização e ponderação dos planos de informação, conforme os critérios mencionados no Capítulo 3 – Seção 3.2.1, foram obtidos os valores dos pesos apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores obtidos pela ponderação e padronização dos planos de informação (Adutora de Bocaina)

Variáveis	Pesos	Componentes das classes	Custos
Altitude	57%	161-229	1
		229-297	3
		297-365	5
		365-433	6
		433-501	8
		501-569	10
Declividade(%)	15%	0% – 10%	1
		10% – 20%	4
		20% – 30%	7
		>30%	10
Distância_Estradas	22%	0 – 30	1
		30 – 60	4
		60 – 90	7
		>90	10
Distância_Rios	6%	0 – 100	10
		100 – 200	7
		200 – 300	4
		>300	1

Para o caso da Adutora do Pajeú, uma observação se refere aos valores (custos) das classes da variável Altitude em virtude da padronização, considerando que as altitudes são diferentes, como mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Classes de Altitude, seus novos valores após reclassificação e custos (Adutora do Pajeú).

Altitude_P_Carga (em metros)	Classes	Custos
562-688	1	2
688-814	2	4
814-940	3	6
940-1066	4	7
1066-1192	5	9
1192-1318	6	10

A ferramenta Sobreposição Ponderada (capítulo 3 – seção 3.2.3.4) permitiu que se estabelecesse os procedimentos computacionais para a aplicação da função-objetivo $Custo_Total$ (Equação 4.1), a seguir:

$$Custo_Total = 0,57 * Altitude + 0,22 * Rodovias + 0,15 * Declividade + 0,06 * Rios \quad 4.1$$

Onde:

- $Custo_Total$: Mapa final de aptidão
- Coeficientes (peso estatístico das variáveis): 0,57; 0,22; 0,15 e 0,06
- Variáveis de decisão:
 - Altitude (Altitude_P_Carga_Rec – Matriz de Altitudes e Perda de Carga reclassificadas)
 - Rodovias (Distância Euclidiana para_Rodovias)
 - Declividade (Declividades Reclassificadas)
 - Rios (Distância Euclidiana para Rios)

Considerando os mapas gerados com os critérios definidos na metodologia, a exemplo do que pode ser visto em Cross, Moran e Stam (2007) onde foi desenvolvida uma avaliação multicritérios para gerar uma camada de custo, foi possível estabelecer as áreas consideradas como mais adequadas para o traçado de adutoras (camada de custo), utilizando a ferramenta *Weighted Overlay* (Sobreposição ponderada) do *Spatial Analyst*. Como descrito na metodologia, trata-se da construção do modelo de adequação baseado em custos que variam de acordo com uma escala de 1 a 10.

4.1.1.1 Adutora de Bocaina

A figura 4.13 mostra o resultado para os locais ou áreas consideradas como de maior aptidão para a locação do traçado da adutora de Bocaina, com o uso da base de dados espaciais TOPODATA, e o traçado da adutora (traçado proposto)

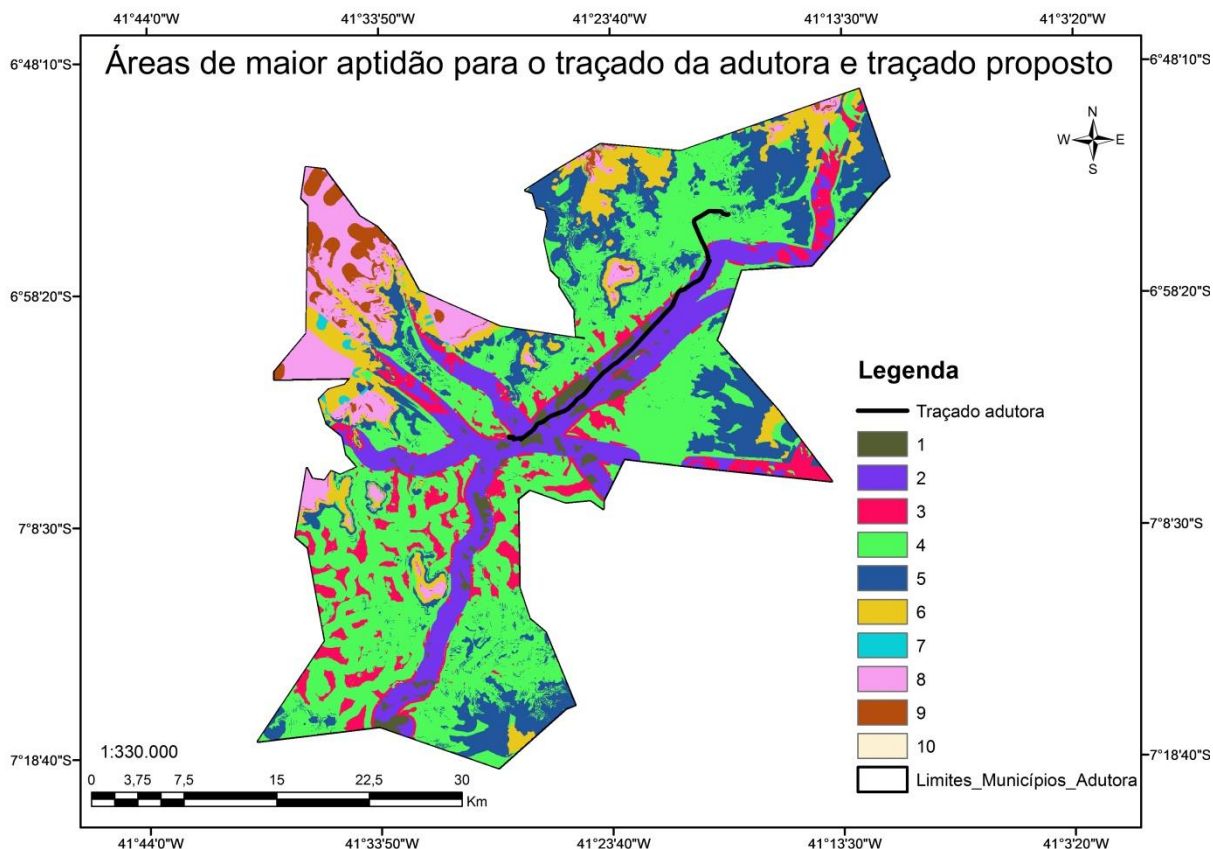


Figura 4.13 - Resultado para os locais de maior aptidão para traçado da adutora de Bocaina e traçado proposto no projeto do Sistema Adutor de Bocaina.

Os resultados apresentados na Figura 4.13 mostram que as áreas (custos variando de 1 a 3) são as mais indicadas para o traçado da adutora, considerando uma combinação e ponderação dos critérios estabelecidos. As áreas (custos 4 a 6) apresentam custo médio, enquanto que as áreas (custos variando de 7 a 10) representam os maiores custos, inclusive o valor 10, que é o máximo da escala considerada.

Percebe-se, com a metodologia aplicada, que a comparação das regiões sugeridas na Figura 4.13 com o traçado proposto no projeto básico do Sistema Adutor de Bocaina, indica que o traçado projetado para a adutora segue uma rota que se apresenta dentro das áreas consideradas como de maior aptidão para a locação do traçado.

4.1.1.2 Adutora do Pajeú

A Figura 4.14 mostra os resultados para as áreas mais adequadas para o traçado da adutora do Pajeú e o traçado original apresentado no projeto do Sistema Adutor do Pajeú, com o uso da base de dados espaciais TOPODATA. Para efeito de simplificação na aquisição dos dados, foi utilizada apenas parte (Limites de Estudo) da área de estudo que envolve os municípios de Pernambuco.

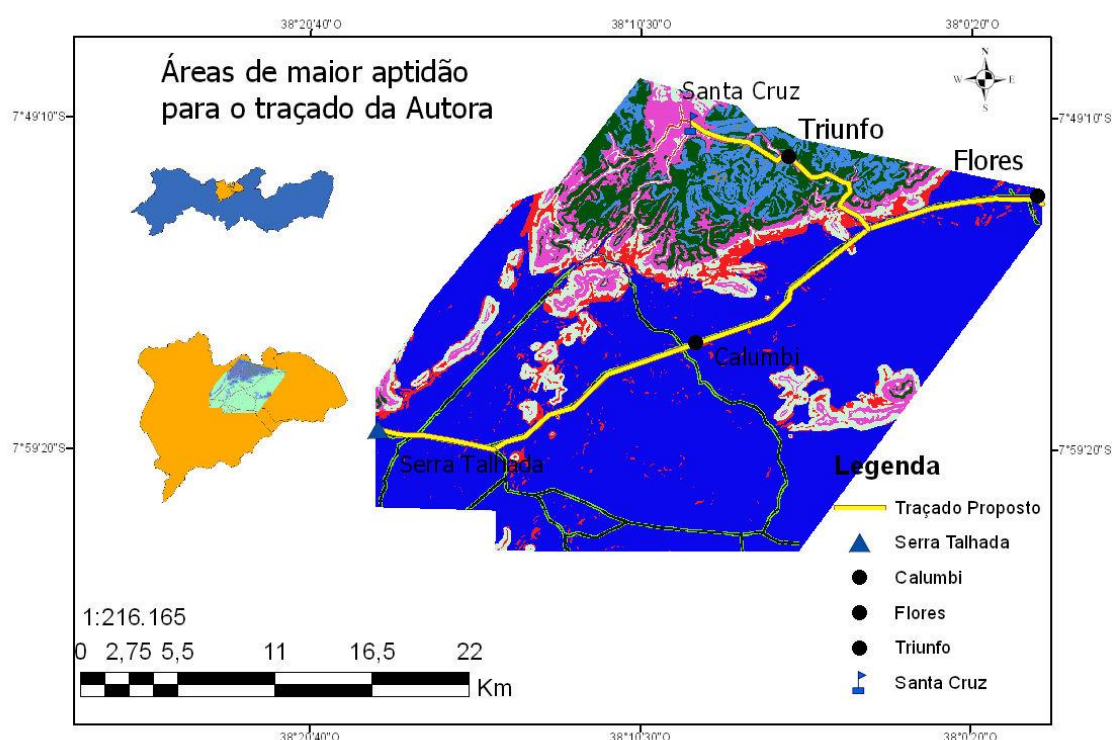


Figura 4.14 - Resultado para os locais de maior aptidão para o traçado da adutora e traçado proposto no projeto básico do Sistema Adutor do Pajeú.

A exemplo da Adutora de Bocaina, percebe-se que o traçado apresentado no projeto básico do Sistema Adutor do Pajeú segue uma rota que também se apresenta dentro das áreas consideradas adequadas, como mostra a Figura 4.14.

Com o desenvolvimento do modelo, pode-se observar que a camada de custo (local de maior aptidão para locação do traçado) gerada pode ser usada para identificar potenciais áreas problemáticas para a locação do traçado que possam não ser evidentes em uma primeira avaliação. Segundo Cross, Moran e Stam (2007) uma área em particular pode não ter sido considerada como um alto custo e baixa

área de adequação quando se considera um único fator. No entanto, com a combinação de todos os fatores (camada de custo), pode-se observar a possibilidade de um custo muito mais elevado. Nestes casos, o fato de se ter acesso a esta camada pode ser de grande ajuda no processo de tomada de decisão.

4.1.2 Determinação do melhor caminho para locação do traçado das adutoras

O processo de seleção de rota (melhor caminho) baseado em SIG foi usado para fornecer uma base racional para estreitar diferentes e potenciais alternativas para a locação do traçado de adutoras, de forma análoga ao que pode ser observado nas aplicações desenvolvidas por Luettinger e Clark (2005); Cross, Moran e Stam (2007); Hardin, Bridges e Rundeli (2008); Salah e Atwood (2011).

Os resultados são decorrentes, de acordo com modelo proposto, da aplicação da função Caminho de Custo, neste caso, montada sobre o conjunto de ferramentas do *Spatial Analyst*. Definida a região de maior viabilidade, como mostrado na etapa anterior, a escolha da melhor rota é feita sobre o conjunto de pontos gerados nessa região.

As Figuras 4.15 e 4.16 indicam o melhor caminho (menor custo) entre os pontos de origem e destino para o traçado das linhas adutoras do Sistema Adutor de Bocaina e do Sistema Adutor do Pajeú, respectivamente. Essas Figuras também indicam o traçado da adutora projetado originalmente. A escolha do traçado significa, de acordo com a metodologia usada e os critérios utilizados, que:

- Esses traçados simulados evitam as altas declividades que são inadequadas para o caminhamento da adutora, pois indicariam subidas e descidas acentuadas (obstáculos topográficos), impróprias para sua execução, manutenção e operação. Além disso, diminuem as necessidades de uso de elementos de proteção contra efeitos transitórios (subpressão e sobrepressão) e as possibilidades de formação de bolhas de ar no interior da tubulação.
- A análise da rota (traçado otimizado) escolhida também revela que a rota evita com sucesso o cruzamento desnecessário de rios e áreas alagadas a exemplo do que se observou na aplicação da metodologia desenvolvida

por Cross, Moran e Stam (2007). As áreas consideradas mais adequadas, de acordo com modelo proposto neste trabalho são aquelas que distam mais de 100 metros dos rios e áreas alagadas (uso de *buffers*). Nesse sentido, as regiões mais próximas aos rios e áreas alagadas (buffer de 0 a 100 metros), apresentaram os maiores custos. Vale salientar também, que esse critério tem por objetivo evitar que a locação de uma adutora ocorra margeando um rio.

- Tal como foi previsto durante a concepção do modelo, e com resultados similares aos encontrados em Luettinger e Clark (2005) e Cross, Moran e Stam (2007), o traçado segue próximo às rodovias - numa faixa de domínio de 30 metros - para a maioria do percurso. Uma maior proximidade da linha adutora com relação às rodovias ou estradas vicinais é de grande importância para sua implantação, operação e principalmente manutenção. As regiões próximas às rodovias (buffer de 0 a 30 metros) são as que apresentam os menores custos, segundo o modelo, portanto, as de maior adequação.
- Os traçados simulados estão sempre em terrenos com menores altitudes, o que diminui custos de energia elétrica com bombeamento. Esses traçados (Adutora de Bocaina e Adutora do Pajeú), como mostram as Figuras 4.8 e 4.9, apresentam as maiores diferenças com relação aos traçados originais, exatamente nos trechos que apresentam diferenças nas altitudes. As altitudes nas áreas de estudo variam de 153 a 561 metros (Adutora de Bocaina - Piauí) e de 558 a 1290 metros (Adutora de Pajeú - Pernambuco).

4.1.2.1 Adutora de Bocaina

Na comparação (Figura 4.15) da rota simulada com o traçado apresentado no projeto básico do Sistema Adutor de Bocaina, percebe-se que há bastante similaridade nos alinhamentos. Isso é de se esperar, principalmente por conta do aproveitamento da faixa de domínio das estradas. Essa é uma restrição muito impositiva. No caso em que não haja a possibilidade de aproveitamento de áreas adjacentes a estradas, certamente as diferenças de traçado serão mais acentuadas.

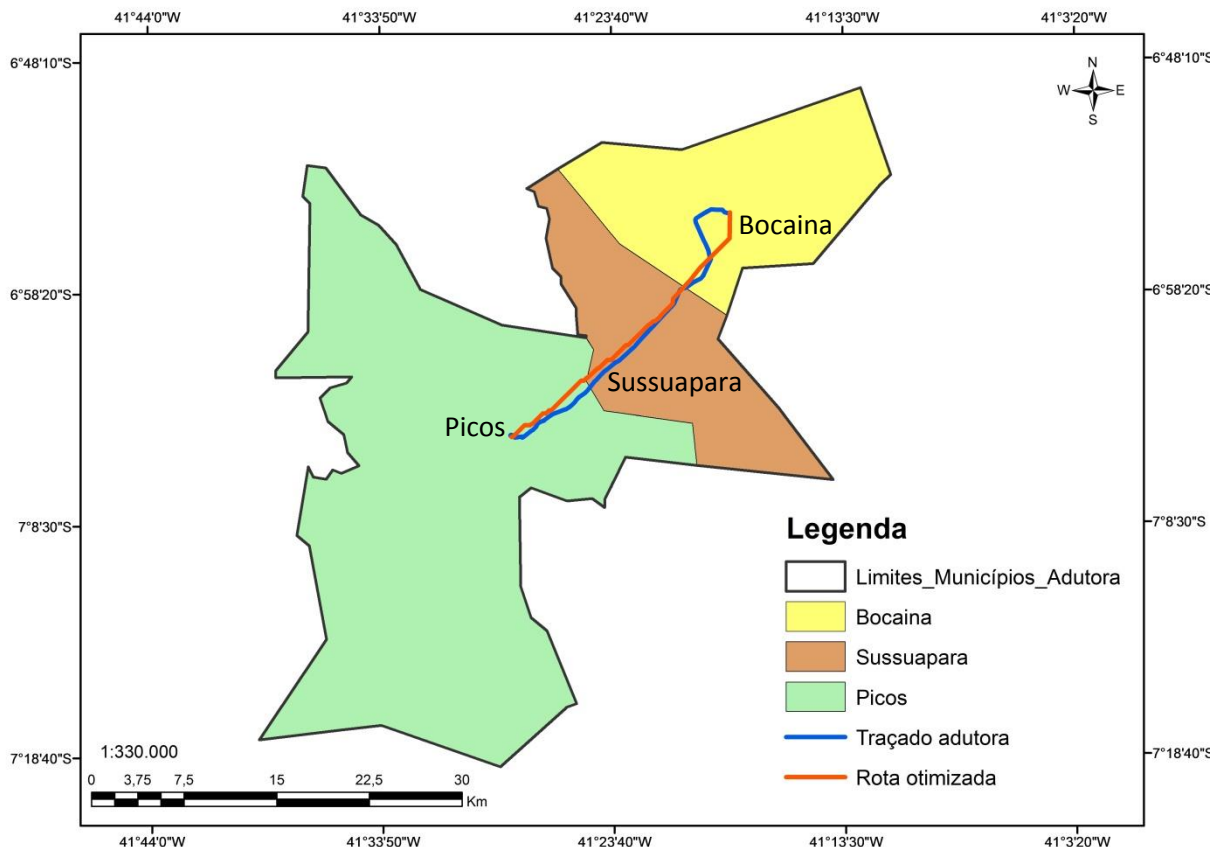


Figura 4.15 - Rota otimizada e traçado proposto no projeto básico do Sistema Adutor de Bocaina.

Ainda de acordo com os resultados, foi possível determinar o comprimento da rota simulada num total de 27.804,14 metros. Isso significa que a simulação representa uma alternativa de rota que possibilita uma diminuição de custos com obras e com materiais para os tubos, já que apresenta um percurso menor que a traçado (rota) original do Sistema Adutor de Bocaina, que tem 29.634 m de comprimento.

4.1.2.2 Adutora do Pajeú

A Figura 4.16 apresenta comparação da rota simulada (base de dados SRTM) com o traçado apresentado no projeto básico do Sistema Adutor do Pajeú, a qual também indica que há similaridade nesses alinhamentos. No entanto, observa-se que a derivação para a cidade de Triunfo apresentou um traçado diferente: a Estação de Bombeamento (EB), representada na Figura 4.8, está localizada entre as cidades de Calumbi e Flores e se encontra exatamente em um ponto de derivação

da adutora, ligando o alinhamento às cidades de Triunfo e Santa Cruz da Baixa Verde. A sugestão que se apresenta na simulação da rota é que essa derivação seja posicionada em outro ponto do alinhamento. Isso se deve porque, segundo os resultados para as áreas de aptidão para locação da rota, o ponto (derivação na simulação) está em numa região que apresenta menores altitudes e declividades, e como consequência menores custos.

O comprimento da rota simulada num total de 55160,20 metros. Isso significa tendência à diminuição de custos com obras e com materiais para os tubos, já que a simulação apresenta um percurso menor que a rota original do Sistema Adutor do Pajeú, o qual tem 56086,50 m de comprimento.

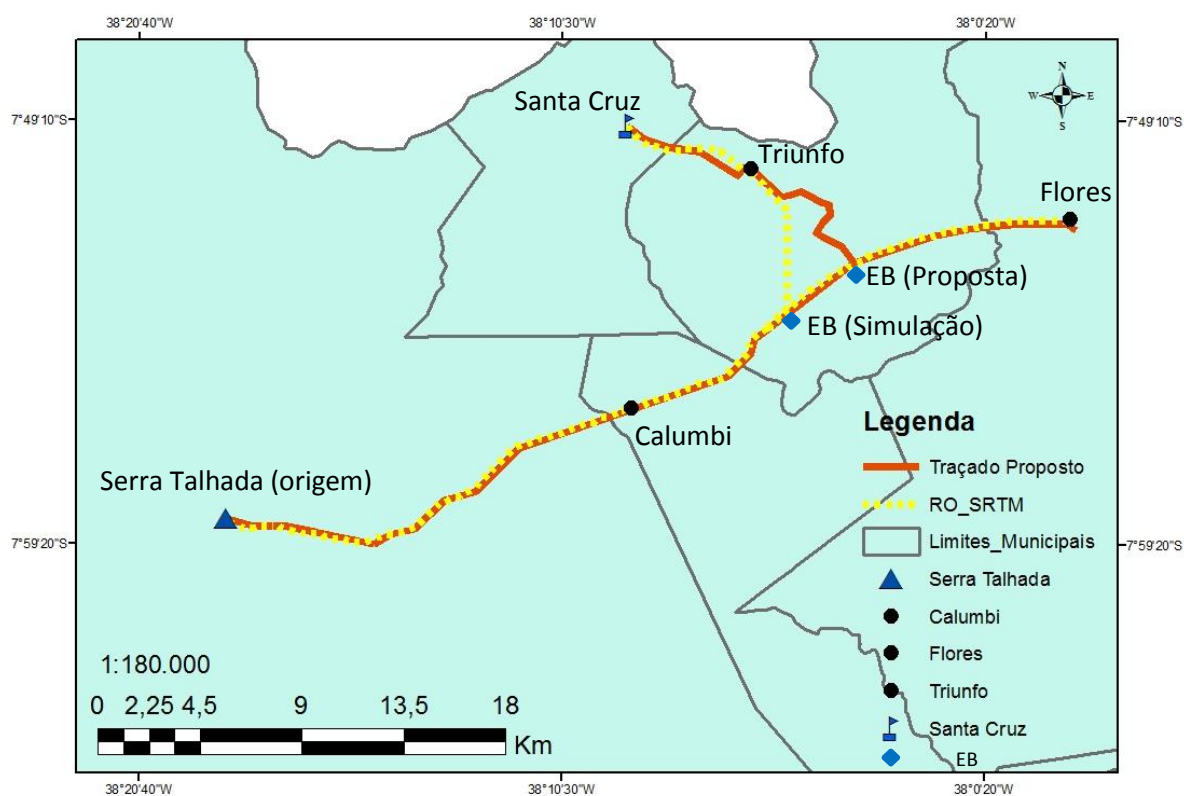


Figura 4.16- Rota otimizada e traçado proposto no projeto básico do Sistema Adutor do Pajeú (Base de dados SRTM).

Um aspecto muito importante a se considerar na análise é base de dados utilizada. No caso da Adutora do Pajeú foram usadas duas bases de dados espaciais: a SRTM/TOPODATA, cujos resultados foram apresentados, e a LiDAR, do Programa PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL. A Figura 4.17 mostra as duas simulações, Rota_Otimizada_SRTM (RO_SRTM) e Rota_Otimizada_LiDAR

(RO_LiDAR) através das duas bases consideradas, respectivamente, SRTM/TOPODATA e LiDAR. O trecho em destaque na Figura 4.17 mostra, em outra escala, as diferenças nas rotas das duas simulações (RO_SRTM e RO_LiDAR).

O traçado simulado com o uso da base de dados espaciais SRTM/TOPODATA com resolução espacial de 30 metros teve como resultado o comprimento de 55160,20 metros, enquanto que com a base de dados LiDAR, com resolução espacial de 1 metro, esse traçado apresentou um comprimento de 58303,6 metros. A diferença nesses valores se dá em função da precisão maior, devido a tecnologia LiDAR ter permitido a geração de um MDT de alta resolução, essencial no cálculo de rotas mais adequadas aos estudos e projetos de sistemas adutores. A Tabela 4.5 resume essas informações.

Tabela 4.5. Bases de dados e comprimento dos traçados (Adutora do Pajeú)

Traçado (Rota)	Base de Dados	comprimento (em metros)
Proposta	-	56086,50
Simulação	LiDAR	58303,60
Simulação	SRTM/TOPODATA	55160,20

De forma geral, os dois modelos convergiram para soluções bastante próximas. Deve-se considerar que a geração de um MDT de alta resolução permitiu o cálculo de planos de informação com valores bem mais precisos para altitudes e declividades e como consequência maior fidelidade à realidade de campo. Contra a utilização dessa base de dados pesa o esforço computacional: o processamento teve a duração de várias horas para a obtenção de uma solução, sendo até mesmo necessário aplicar filtros para reduzir a densidade de dados disponível para a área de estudo.

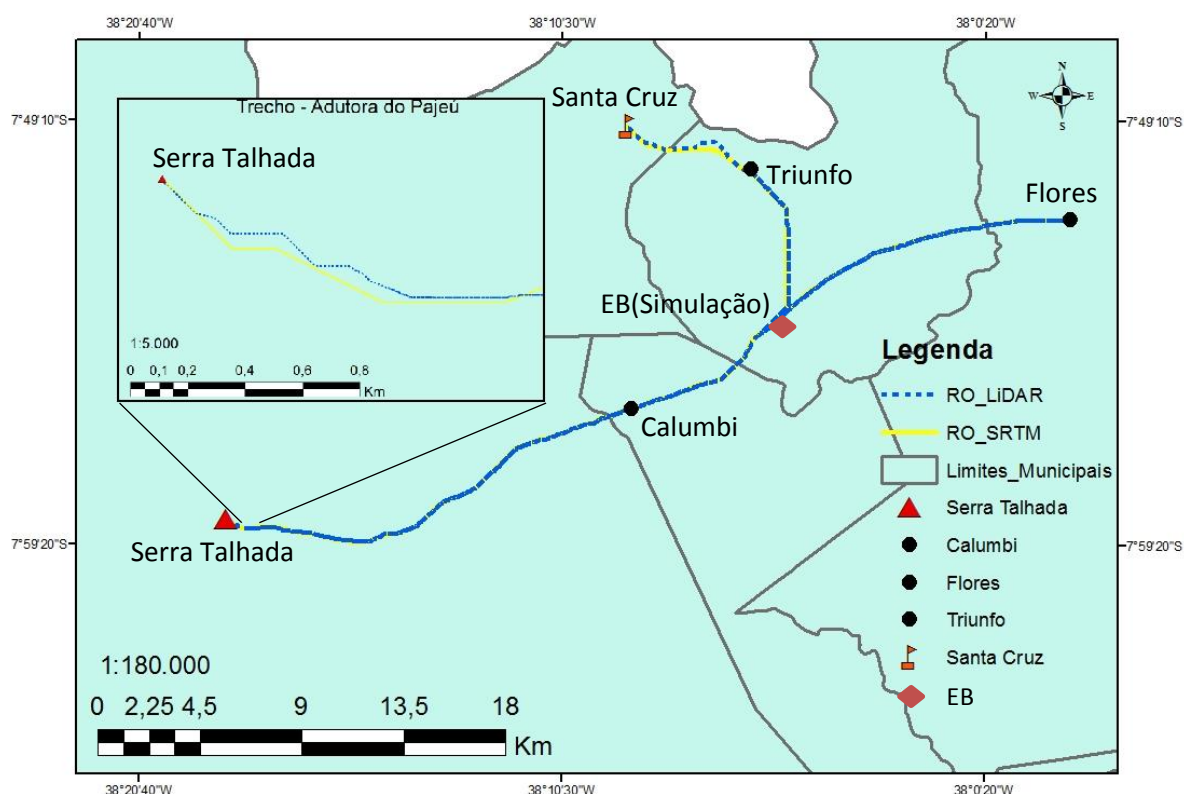


Figura 4.17 - Rotas otimizadas para o traçado da Adutora do Pajeú.

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DE REDE

Considerando o aprimoramento do modelo de otimização, previsto na metodologia, foi desenvolvida uma análise da rede de transporte para considerar a operação do sistema adutor de Bocaina, utilizando o módulo *Network Analyst* do ArcGis, na determinação de rotas otimizadas entre as instalações do sistema com a utilização de veículos. Entre os trabalhos de pesquisa descritos de forma sucinta neste estudo está uma aplicação de análise de rede através de SIG desenvolvida por Salah e Atwood (2011) que tem como objetivo a otimização do traçado (rota) de adutoras. Como pode ser visto os objetivos das duas análises de rede são diferentes. No entanto, vale ressaltar a importância e a influência do referido trabalho de pesquisa no desenvolvimento da metodologia aplicada para a análise de rede desenvolvida no presente estudo.

As informações decorrentes dessa análise foram, então, adicionadas ao modelo, de forma que possam auxiliar o processo de tomada de decisão, como pode ser observado nos resultados seguintes.

4.2.1 Network dataset: rede_adutora_ND

A construção do *Network Dataset* (Conjunto de Dados de Rede) serviu para modelar a rede de transporte formada pelas instalações do sistema adutor e pelas rodovias da área de estudo. O *network dataset* é a base na qual foram executadas as análises da ferramenta *Network Analyst*, considerando que foi gerada a conectividade entre as linhas da *feature class*, através de *Edges* (arestas) e *Junctions* (nós).

As informações associadas aos arcos (Rede Adutora – Rodovias) indicam o sentido de fluxo da rede, enquanto que as informações associadas aos nós (Rede Adutora – Junções) indicam a impedância do fluxo, ou seja, a resistência do fluxo em determinado nó (Rede Adutora – Junções). Os nós representam as interseções das rodovias e as arestas representam as rodovias da região em torno do sistema adutor de Bocaina. A Figura 4.18, a seguir, ilustra a rede criada com suas arestas (arcos) e nós e serviu de base para que o algoritmo do *Network Analyst* (ArcGis) calculasse a melhor rota entre dois pontos como será visto com as Aplicações *Route* e *Closest Facility* a seguir.

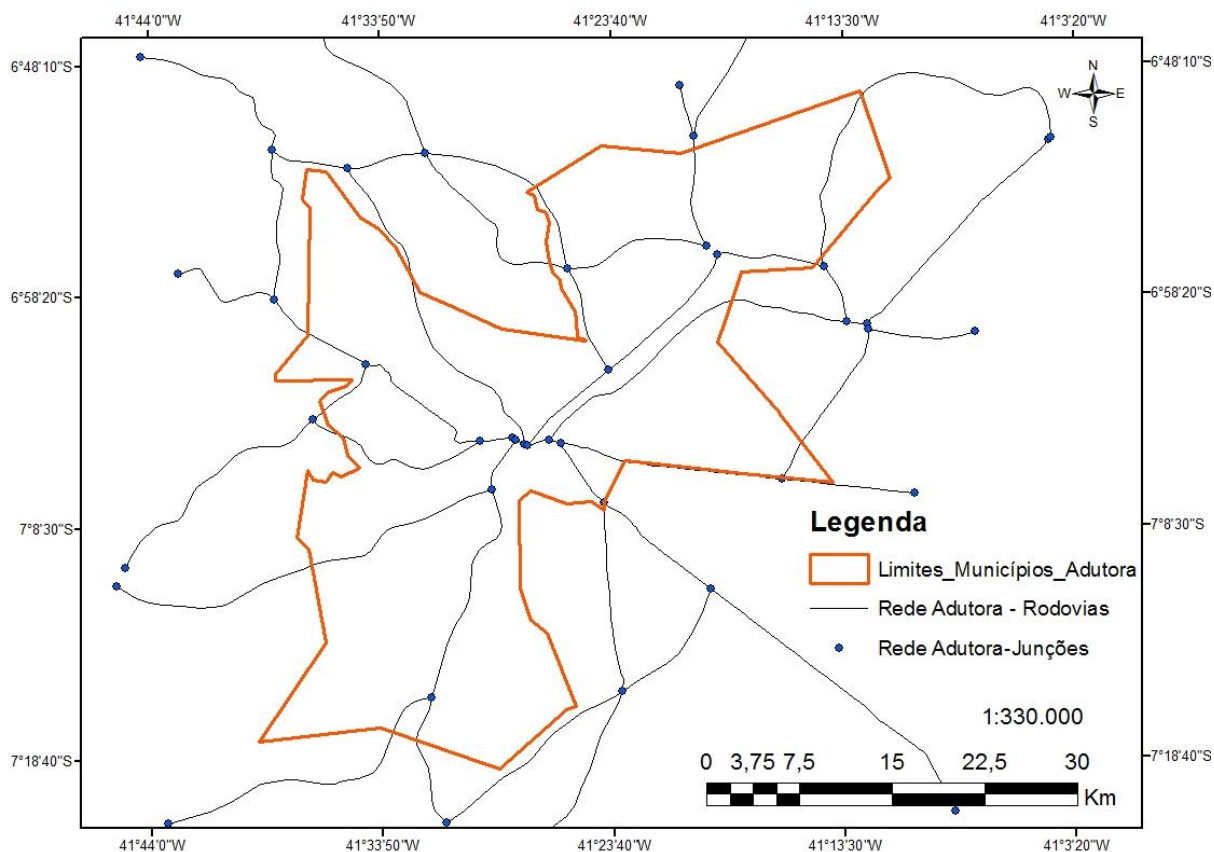


Figura 4.18 – Rede de rodovias com suas arestas e nós

4.2.2 Aplicação route (otimização de percursos) entre instalações da adutora

Um aspecto considerado essencial num estudo desta natureza é o conhecimento de percursos (rotas) entre as instalações do sistema adutor, e como consequência das distâncias e tempos relacionados a eles. Esse conhecimento pode ser de bastante utilidade no processo de tomada de decisão, considerando que a otimização desses percursos pode minimizar custos relacionados ao transporte de pessoas, materiais e/ou equipamentos, seja na fase de implantação ou na fase de operação e manutenção do sistema.

Através da ferramenta *Solve* (Solucionar) da aplicação *Route*, foi determinada a melhor rota (melhor caminho) entre os pontos RAD_Picos (Reservatório apoiado de distribuição), localizado na cidade de Picos- PI, e o Ramal de Derivação 1 (DERIV1) no município de Bocaina - PI, passando pelo Ramal de Derivação 2 (DERIV2) no município de Sussuapara – PI, como mostra a Figura 4.19. Diante disso, foi possível obter informações como as relacionadas aos percursos.

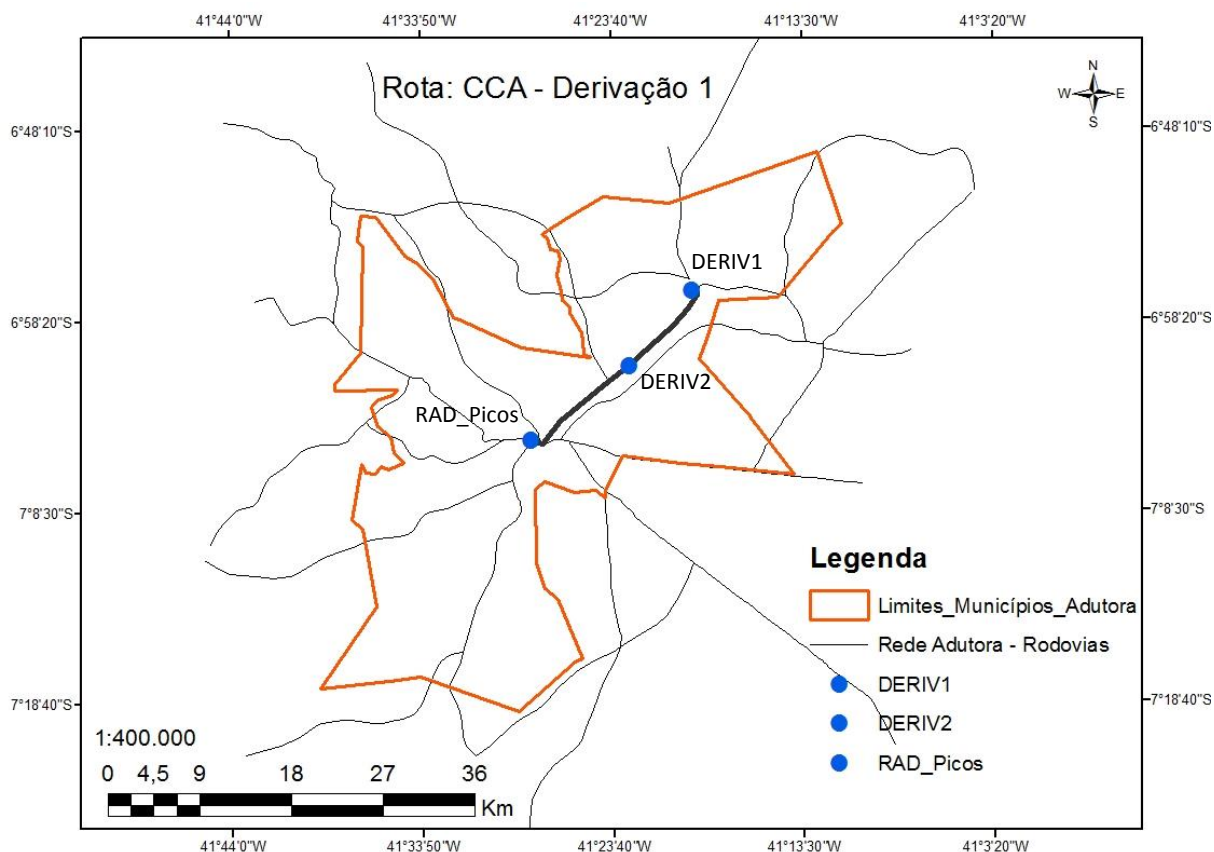


Figura 4.19 - Melhor rota (melhor caminho) entre os pontos RAD e o Ramal de Derivação1

A ferramenta *Directions Window* (Janela de Direções) representada na Figura 4.20 exibe uma janela com o cálculo da distância, o tempo do percurso e as direções que se devem seguir através das rodovias. Nessa análise, chega-se então a uma rota partindo do RAD até a DERIV1, passando por DERIV2, com uma distância total de 23,1 km que pode ser percorrida em 15 minutos.

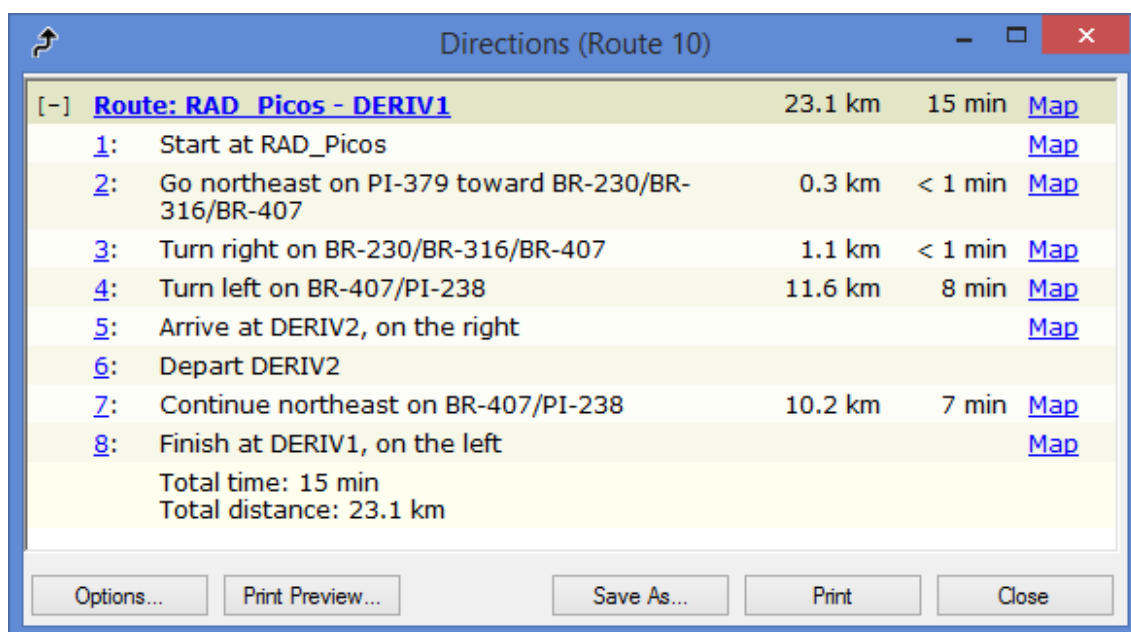


Figura 4.20 - Uso da ferramenta *Directions Window*: RAD até a DERIV1

Em se tratando de percursos dessa natureza, uma situação problema que pode se apresentar é a impossibilidade de fazer o mesmo trajeto em decorrência de interrupções (barreiras) na rodovia, como acidentes ou até mesmo rupturas. Diante disso, uma solução seria uma alternativa de rota, como mostra a Figura 4.21.

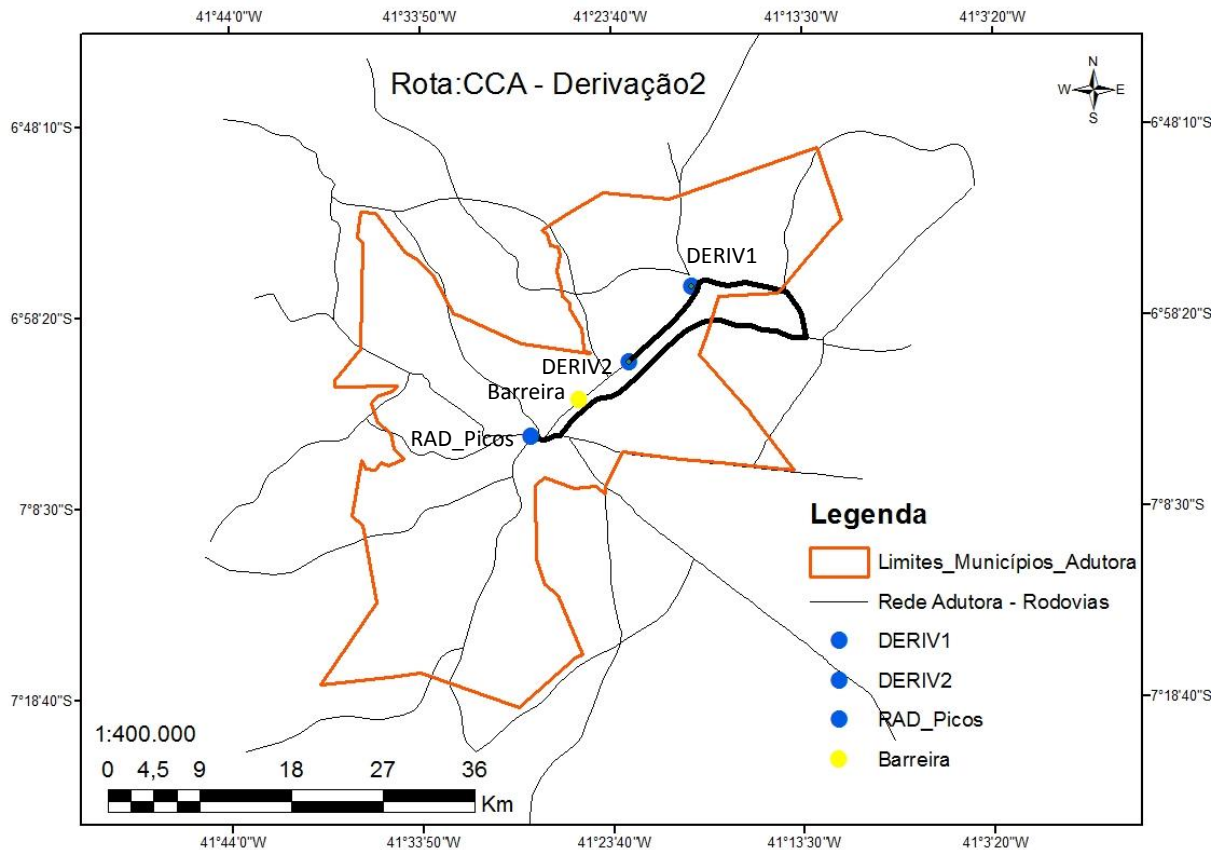


Figura 4.21 - Melhor rota alternativa entre os pontos RAD e o Ramal de Derivação 2

Como se pode perceber, com a nova rota na qual um veículo poderia visitar os dois ramais de derivação com um percurso iniciado no RAD_Picos, far-se-ia necessário, de acordo com a rede de rodovias construída neste trabalho, dirigir-se inicialmente à DERIV2. A Figura 4.22, representa o tempo e a distância total do percurso, assim como as informações relacionadas às direções, distâncias e intervalos de tempo para cada trecho a ser seguido.

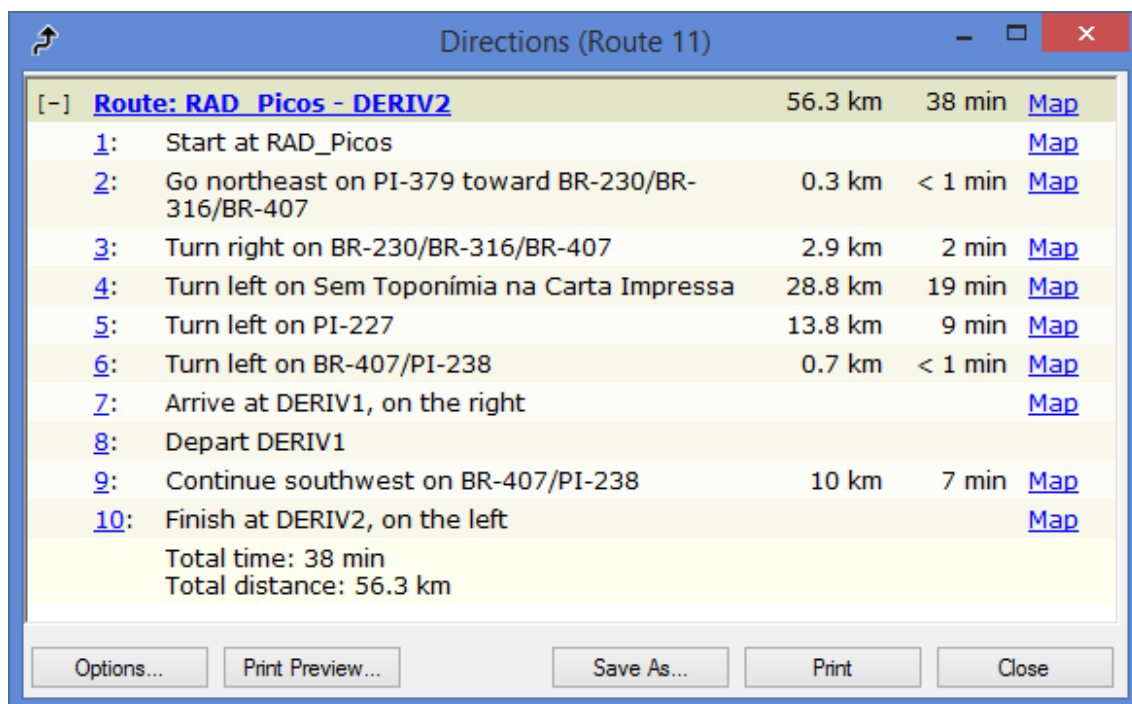


Figura 4.22 - Uso da ferramenta *Directions Window (Route)*: RAD até a DERIV2

Usando a rede de transporte estruturada através do módulo *Network Analyst* do ArcGis, é possível, como visto acima se ter conhecimento de percursos (rotas) entre as instalações do sistema adutor, e como consequência das distâncias e tempos relacionados a eles. Essa informação pode ser de bastante utilidade no processo de tomada de decisão, considerando que esses percursos podem ser otimizados, inclusive em situações nas quais ocorrem interrupções (barreiras) na rodovia, como acidentes ou até mesmo rupturas. Dessa forma, é possível minimizar custos relacionados ao transporte de pessoas, materiais e/ou equipamentos, seja na fase de implantação ou na fase de operação e manutenção do sistema.

O algoritmo de Dijkstra, utilizado pelo *Network Analyst*, apresenta soluções de fácil aplicação e resposta rápida aos problemas de percurso citados acima. Entretanto, outros algoritmos, como os baseados em heurísticas, devem ser testados para o propósito de definição dessas rotas.

4.2.3 Aplicação *closest facility* (instalação mais próxima) para instalações na adutora

Outro problema de rede analisado com o *Network analyst*, foi a locação de dispositivos de controle no sistema adutor. De acordo com SEMAR (2012), está prevista a instalação de medidores de vazão em pontos específicos (ETA, ramais de derivação e RAD-Picos) da rede, de maneira que seus sinais serão automaticamente recebidos pelo CCA_Bocaina (Centro de Comando e Automação do Sistema). As instalações do CCA deverão ser localizadas na área da ETA, no município de Bocaina - PI.

Nessa análise de rede a solução *Closest Facility* (Instalação mais Próxima), foi utilizada para determinar as informações relacionadas às rotas entre o CCA e a localização desses dispositivos. O resultado gráfico dessa solução é apresenta na Figura 4.23.

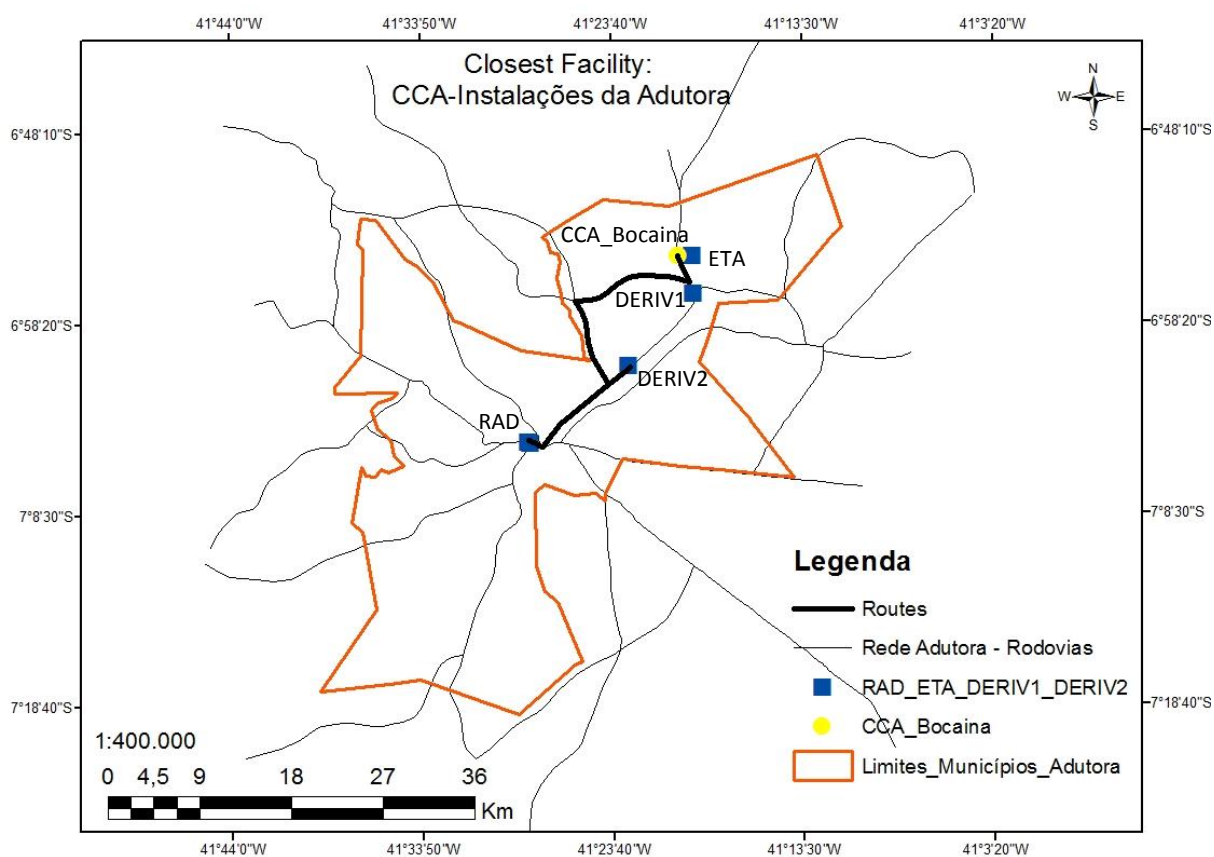


Figura 4.23 - Resultado gráfico da solução Instalação mais Próxima

A vantagem dessa alternativa, com relação à determinação das informações de percurso da solução *Route* (Percurso Ótimo), é que as rotas e instruções de direção (Figura 4.16) foram geradas em conjunto e não individualmente como na seção anterior. Outra vantagem seria a possibilidade de encontrar uma solução, na qual fossem consideradas, na análise, outras instalações além do CCA-Bocaina.

A Figura 4.24 detalha os resultados da solução encontrada.



Figura 4.24 - Uso da ferramenta *Directions Window (Closest Facility)*

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de otimização baseado em SIG, que realiza uma análise espacial para a determinação do melhor caminho (menor custo) na implantação de uma rota (traçado) em sistemas adutores e uma análise para solução de problemas de rede nesses sistemas, contribuindo assim para as questões de otimização de projetos e operacionalização desses sistemas. Para isto foram propostas metodologias que se apresentam como alternativas que oferecem informações para auxiliar a tomada de decisão no cumprimento das seguintes etapas: seleção de locais com maior potencial para a implantação de rotas para locação do traçado de adutoras; determinação do melhor caminho (menor custo) para locação do traçado de adutoras; estruturação e análise de uma rede de transporte (sistema adutor de Bocaina) para aplicação do problema do cálculo de percursos entre as instalações do sistema.

Para testar a viabilidade das metodologias, foram utilizados os sistemas adutores de Bocaina (Piauí) e do Pajeú (Pernambuco). O SRTM/TOPODATA consistiu na base utilizada para os dois sistemas adutores analisados. Os dados do PE3D foram aplicados somente para o estudo de caso da adutora do Pajeú, obviamente por não se dispor dessa base para a outra área de estudo.

No que concerne à seleção dos locais com potencial para locação do traçado da adutora, a metodologia apresenta-se como alternativa a padronização e ponderação dos planos de informação (variáveis espaciais) utilizados. Este procedimento proporciona o tratamento estatístico da opinião de vários especialistas com relação aos critérios estabelecidos, auxilia na minimização de avaliações tendenciosas e permite a análise de critérios que se utilizam de múltiplas grandezas. Diferentes funções de padronização das variáveis inerentes a cada plano de informação devem ser testadas e seus resultados comparados, a fim de se obter valores que melhor se adequem aos estudos e projetos. Não obstante, a metodologia pode ser utilizada no desenvolvimento de projetos de adutoras em outras regiões, desde que dados e informações estejam disponíveis.

O método AHP (Análise Hierárquica de Pesos) apresenta-se como uma alternativa viável para a ponderação de múltiplos critérios. No entanto, para que a sua utilização seja satisfatória faz-se necessário que a comparação dos critérios seja realizada por profissionais capacitados, assim como as questões a serem levadas

em consideração a cada critério devem estar explicitadas no questionário Delphi, de forma que ambiguidades nas interpretações sejam evitadas. Outros critérios devem adicionados ao modelo a fim de se obter resultados que melhor reflitam a realidade de campo.

O uso do modelo de otimização na determinação do melhor caminho para locação do traçado da adutora, o que em outras palavras significou a determinação de uma rota para implantação da tubulação, sugere que a utilização de SIG e técnicas de otimização podem auxiliar o processo de tomada de decisão gerencial. No estudo de caso da adutora de Bocaina houve maior coincidência entre o traçado proposto no projeto e a otimização proposta pelo modelo. Há que se considerar o peso da restrição decorrente do uso da faixa de domínio das estradas, que termina sendo determinante para a solução. Certamente as diferenças seriam mais acentuadas se não existissem as estradas no percurso. Já no caso da adutora do Pajeú as mudanças de rota foram mais significativas. Vale registrar aqui que, por conta das declividades, mesmo ao longo de trechos de estradas, o DNOCS está modificando a solução de projeto.

Sob o ponto de vista de qualidade da solução, obviamente o traçado da solução que utiliza o PE3D (Adutora do Pajeú) é mais fidedigno à realidade de campo. Se fosse o caso de um projeto ainda a desenvolver, a solução seria de grande valia, pela riqueza dos detalhes, para definir todos os quantitativos para definição da obra.

No que se refere à análise de rede, desenvolvida para o sistema Bocaina, busca-se apresentar o potencial de ferramentas GIS para auxiliar ações operacionais, para aumentar a eficiência do sistema pós-construído em termos de manutenção, monitoramento e logística em geral. Além disso, foi criado um banco de dados georreferenciado da rede de transporte correspondente ao Sistema Adutor de Bocaina, formada pelas instalações (localizações na rede) da adutora e pelas principais rodovias em torno do sistema adutor.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Futuros trabalhos relacionados à aplicação de métodos de análise espacial e técnicas de geoprocessamento para a locação do traçado e resolução de problemas de rede em adutoras devem considerar as seguintes possibilidades:

- Desenvolver aplicações que incluam outros critérios de tomada de decisão para a locação do traçado. Uma sugestão seria o aperfeiçoamento do critério que represente melhor o consumo de energia com bombeamento.
- Embora tenha havido bastante coerência entre os traçados obtidos com as condições do relevo e mesmo com as soluções definidas nos projetos de engenharia, é importante desenvolver análise de sensibilidade quanto aos valores dos pesos utilizados, visto que sempre existe o componente de subjetividade.
- Um componente importante para montagem dos planos de custo certamente seria o tipo de solo, visto que o custo com a escavação tem elevado peso na composição do custo total da obra. Recomenda-se assim que em estudos futuros sejam desenvolvidas aplicações onde esse componente possa ser avaliado, o que não foi o caso no presente estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAHIA, S. R. **Eficiência Energética nos Sistemas de Saneamento**. Rio de Janeiro: IBAM, PROCEL/ELETOBRÁS, 1998.

BALOGUN, A.; MATORI, A.; LAWAL, D. U.; IMTIAZ, C. **Optimal Oil Pipeline Route Selection using GIS: Community Participation in Weight Derivation and Disaster Mitigation**. International Conference on Future Environment and Energy, 2012, Singapura. Disponível em WWW por: < <http://www.ipcbee.com/vol28/20-ICFEE2012-F10008.pdf>>. Acesso em: 12 de Setembro de 2014.

BARDALES, K. L. N. **Otimização Energética da Operação de um Sistema Adutor de Água Tratada Utilizando Algoritmos Evolucionário Multiobjetivo**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Disponível em WWW: <<https://sistemas.ufms.br/sigpos/portal/trabalhos/download/56/cursold:33>>. Acesso em: 08 de março de 2014.

BARROSO, M. M. A. Aplicação de grafos em um problema de rede. **Abakós**, Belo Horizonte, maio. 2014.v. 2, n. 2, p. 48–78, ISSN: 2316–9451.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Brasília, 1997

BRASIL. Ministério da Integração Nacional/DNOCS. **Projeto Executivo do Sistema Adutor do Rio Pajeú**. Brasília, DF, 2007.

BRUCE, D. **Trans Basin Water Transfer to the MDB: GIS modelling and engineering solutions**. SURVEYING & SPATIAL SCIENCES CONFERENCE, 2013, Canberra Austrália. Disponível em WWW por: <https://www.sssi.org.au/download.php?folder=20&file=documents_1368660710811_106030.pdf>. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2014.

BUCKLEY, F.; LEWINTER, M. **Introductory Graph Theory with Applications**. Long Grove (US): Waveland Press, 2013. 355p.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Oxford Science Publications, 1986.

CÂMARA, G. **Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos**. 1995. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP. Disponível em WWW: <https://www.academia.edu/510122/Modelos_linguagens_e_arquiteturas_para_bancos_de_dados_geogr%C3%A1ficos>. Acesso em: 28 de junho de 2014.

CASANOVA, M.; CÂMARA, G.; DAVIS, C.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R. **Bancos de Dados Geográficos**. Curitiba, PR: MundoGEO, 2005.

CIRILO, J. A. **Políticas Públicas de Recursos Hídricos para o Semiárido Brasileiro. Estudos Avançados**, v. 63, p. 61-82, 2008.

CIRILOa, J. A.; ALVES, F. H. B; CAMPOS, P. H. A. L; SILVA, B. M. 2014. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de

Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 07, n. 04, p. 755-763.

CIRILOb, J. A.; ALVES, F. H. B; CAMPOS, P. H. A. L; SILVA, B. M. Suporte de Informações Georreferenciadas para Planejamento de Recursos Hídricos – Programa PernambucoTridimensional. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Natal, Brasil, 4-7 de Novembro de 2014, p. 001-009.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B; CAMPOS, P. H. A. L; SILVA, B. M. Pernambuco **Tridimensional: Base de Dados Espaciais para Planejamento Urbano e Gestão Territorial**. XII SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, Brasília, Brasil, 22-27 de Novembro de 2015, p. 001-010.

CIRILO, J. A.; BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; MASCARENHAS, F. C. B. **Hidráulica Aplicada**. 2ª ed. Porto Alegre, RS: ABRH, 2011.

CORDÃO, M. J. S.; LACERDA, I. S.; RIBEIRO NETO, A. **Uso de SIG como Ferramenta de Apoio à Decisão Espacial para Traçado de Adutoras**. 2012. 12p. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

COVAS, J. P. B. **Modelação das Acessibilidades Face a Alterações das Condicionantes de Circulação Viária em Lisboa: O Caso da Deslocação ao Centro Comercial Colombo**. Dissertação de mestrado, 147p., Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Lisboa, 2010.

CROSS, B.; MORAN, C.; STAM, R.D. **GIS-Based Siting of a Water Pipeline Route from Guelph to Lake Erie in Ontario**. 2007. Disponível em WWW: <http://www.uoguelph.ca/geography/research/geog4480_w2007/Group11/index.html>. Acesso em: 15 de dezembro de 2013.

DATE, C. J. **Introduction to Database Systems**. 8 ed. Vancouver: Addison Wesley, 2003.

DEO, N. **Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science**. New Delhi (Índia): Prentice-Hall, 1974. 463p. Disponível em WWW: <http://www.edutechlearners.com/download/Graphtheory.pdf>. Acesso em: 05 de setembro de 2014.

DRAGAN, M.; Jarre, P. A Spatial MCA Process to Optimize Pipeline Alignment Choices. **HS + E Magazine**, Ravenna (RA), abril-junho, 2015, v. 12, n. 2, p. 34–38. 1200.

DRUCK, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (eds). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília, EMBRAPA, 2004 (ISBN: 85-7383-260-6).

ELMASRI, R.; NAVHATE, S. B. **Fundamentals of Database Systems**. 6 ed. Boston: Addison Wesley, 2011. 1201p.

ELMIRO, T. A. M. **Fundamentos de modelagem digital de terreno: MDT/MDE**. Belo Horizonte: UFMG [2007], 18 p. Disponível em: <<http://www.geoprocessamento.net/forum/files/file/31-fundamentos-de-modelagem-digital-de-terreno-mdtmde/>>. Acesso em: 15 de Novembro de 2016

ESRI, 2012a. “ Network Analysis”. ArcGIS Desktop Help.

ESRI, 2012b. “ Network Analyst Tutorial”.

ESRI, 2012c. “ Spatial Analysis”. ArcGIS Desktop Help.

ESRI, 2012d. “ Spatial Analyst Tutorial”.

FERREIRA, C. C. M. **Zoneamento agroclimático para implantação de sistemas agroflorestais com eucaliptos, em Minas Gerais**. Viçosa: UVF. 158p. 1997.

FURUSAWA, R.T. **Contribuição no Dimensionamento de rede de Distribuição de Água por Critério de Custo Geral**. 2011. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GERSTING, J. L. **Fundamentos Matemáticos para a Ciência da Computação**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

GOMES, L. F. A. M.; ALMEIDA, A. T.; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GOMES, H. P. (2004). **Dimensionamento de sistemas de abastecimento Urbano de água a partir de técnicas de Otimização econômica**. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

HARDIN, D.; BRIDGES, G.; RUNDELI, D. **Selecting the best pipeline route based on facts not feelings**. *Proc., Pipelines Congress*, ASCE, Reston, Va, 2008. Disponível em WWW:<[http://www.ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40994\(321\)12](http://www.ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40994(321)12)>. Acesso em: 06 de dezembro de 2013.

HUSEYNLI, S. **Determination of the Most Suitable Oil Pipeline Route Using GIS Least Cost Path Analysis**. Dissertation of master. Information Management School da Universidade Nova de Lisboa, 2015. Disponível em WWW por: <<https://run.unl.pt/bitstream/10362/14553/1/TGEO0138.pdf>>. Acesso em: 12 de Maio de 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em:ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bcim/ver_sao2014/. Acesso em: 16 de julho de 2014.

KAINZ, W. (2010). **The Mathematics of GIS**. Version 2.1, 156p., Vienna - Austria – Department of Geography and Regional Research of University of Vienna. Disponível em [www: <http://homepage.univie.ac.at/wolfgang.kainz/Lehrveranstaltungen/15th_Nordic_Summer_School/The_Mathematics_of_GIS_Draft.pdf>](http://homepage.univie.ac.at/wolfgang.kainz/Lehrveranstaltungen/15th_Nordic_Summer_School/The_Mathematics_of_GIS_Draft.pdf). Acesso em: 28 de maio de 2014.

LACERDA, I. S. **Regras de operação para sistemas de abastecimento de água com baixo nível de automação e sujeitos a incertezas**. Dissertação de mestrado, 167p., Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2009.

Liu, X.; Peterson, J.; Zhang, Z. High-Resolution DEM Generated from LiDAR Data for Water Resource Management. Centre for GIS, School of Geography and

Environment Science Monash University.
Disponível em: <http://eprints.usq.edu.au/7943/3/Liu_Peterson_Zhang_MODSIM05_2005_PV.pdf> Acesso em: 12 de Novembro de 2016.

LOPES, K. G. O.; COELHO, M. M. L. P.; LIBÂNEO, M. **Aplicação do Método da Análise Hierárquica na Priorização da Reabilitação de Redes de Distribuição de Água.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, v. 16, n. 4, p. 181–194, Out/Dez 2011. Disponível em WWW: <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/eedf46b2fec21fb19b948987549356c2_858d906366e58c5e52913ff5f59d2d2a.pdf>. Acesso em: 28 de agosto de 2014.

LUETTINGER, J. and CLARK, T. (2005). "Geographic Information System-based Pipeline Route Selection Process." *Journal Water Resource Planning Management*, 131(3), p.193–200. Disponível em [www: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%2907339496%282005%29131%3A3%28193%29>](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%2907339496%282005%29131%3A3%28193%29). Acesso em: 15 de fevereiro de 2014

MACKANESS, W. A.; BEARD, M. K. Use of Graph Theory to Support Map Generalization. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1993, p. 210 - 221. Disponível em [www: <www.geos.ed.ac.uk/homes/wam/MackBeard1993.pdf>](http://www.geos.ed.ac.uk/homes/wam/MackBeard1993.pdf). Acesso: 29 de maio de 2014

MARTINHAGO, A. Z. **Otimização Para Locação de Pátios de Estocagem Para Exploração de Impacto Reduzido na Amazônia Brasileira.** 2012. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal. 163p. Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG.

MICELI, B. S.; et al. Comparação da Avaliação Vertical de Modelos Digitais de Elevação para Médias e Pequenas Escalas em Diferentes Configurações Topográficas. **Anais III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, Brasil, 27-30 de Julho de 2010, p. 001-007.

OLIVEIRA, M.J.S. **Otimização de Circuitos de Recolha de Lixo Domésticos em Zonas Urbanas.** 2008. Tese de doutorado em Ciências de Engenharia. 154p. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

ORNELAS, A. R. **Aplicação de Métodos de Análise Espacial na Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos.** 2011. Tese de Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. 101p. Universidade Federal de Minas Gerais.

PALLAVICINE, G.M.C. **Contribuição ao estudo da distribuição física de produtos em áreas urbanas:** integração de modelos matemáticos de roteamento com sistemas de informações geográficas (SIG). 2001. 137p. Dissertação (Mestrado em Transportes. Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília (UnB), Brasília/DF, 2001.

PE3D. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco. **Programa Pernambuco Tridimensional.** Recife, PE, 2014. <www.pe3d.pe.gov.br>

PRIMAHARDHIKA, F. **Determination of the Transjakarta Busway Gas Pipeline Using Geographic Information System and Multicriteria Decision Making**. Master Thesis, Bogor Agricultural University, Science in Information Technology for Natural Resource Management, 2007, Indonesia. Disponível em WWW por: <<https://core.ac.uk/download/pdf/32344684.pdf>>. Acesso: 04 de Abril de 2014.

QGISBRASIL. Comunidade QGISBrasil. <qgisbrasil.org>

RAY, S.S. **Graph Theory with Algorithms and its Applications: In Applied Science and Technology**. New Delhi - Índia: Springer, 2013. 211p.

RIZKALLA, M. **Pipeline geo-environmental design and geohazard management**, ASME, New York, 2008.

RODELLA, L. M. A. **Modelo de Programação Linear para Apoio a Decisão na Distribuição de Água de Sistemas Integrados de Abastecimento**. 107p. Tese de Doutorado em Economia. 2014. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE.

SAATY, T.L.A. **Scaling method for priorities in hierarchical structures**. *Journal mathematical psychology*, 15, p. 234-281, 1977.

SALAH, A. M. e ATWOOD, D. Pipeline Alignment Optimization: Automated GIS-Based Approach. **Journal of Pipeline system Engineering and Practice**. 2011.2:2-13. Disponível em www: <<http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?273913>>. Acesso: 02 de fevereiro de 2014

SANTOS, A. R.; LOUZADA, F. L. R. O.; EUGENIO, F. C. **ArcGis 9.3 Total: Aplicações para Dados Espaciais**. Alegre: Mundo da Geomática, 2010. 185p.

SANTOS, A. R.; LOUZADA, F. L. R. O.; SILVA, A. G. **Delimitação de Corredores Ecológicos no ArcGis 9.3**. Alegre: Mundo da Geomática, 2010. 52p.

SANTOS, A. R.; PELUZIO, T. M. O.; SAITO, N. S. **SPRING Passo a Passo: Aplicações Práticas**. Alegre: Mundo da Geomática, 2010. 153p.

SARMENTO, F. J. **Um Algoritmo Metaheurístico de Apoio à Otimização Para o Traçado de Adutoras**. XI Simpósio de Recurso Hídricos do Nordeste. , 2012, Anais. Disponível em: https://www.academia.edu/3440806/UM_ALGORITMO_METAHEUR%C3%8DSTICO_DE_APOIO_%C3%80_OTIMIZA%C3%87%C3%83O_DO_TRA%C3%87ADO_DE_ADUTORAS. Acesso em: 04 de Dezembro de 2014.

SEMAR – **Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí**. Projeto do Sistema Adutor de Bocaína. Teresina: SEMAR, 2011.

SAZERDAS, G. L. **Planejamento para a Substituição de Tubulações em Sistemas de Abastecimento de Água. Aplicação na Rede de Distribuição de Água na Região Metropolitana de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em WWW por: www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-20072009-144606/dissertacao_rev.pdf.

SILBERSCHATZ, A.; KORTH, F.; SUDARSHAN, S. **Database System Concepts**, 1ª ed. New York: McGraw-Hill, 2011. 1376p.

SILVA, A.R.E. **Optimização da recolha de resíduos urbanos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, 2009. Disponível em WWW por: <http://ria.ua.pt/bitstream/10773/644/1/2010000210.pdf>

SILVA, J. F. F.; VIEIRA, J. M. P.; HAIE N. **Dimensionamento Optimizado de Sistemas Adutores Elevatórios de Água. Uma ferramenta essencial para o planeamento e gestão dos sistemas de abastecimento de água**. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil. "Engenharia Civil". ISSN 0873-1152. 16 p. 51-62, 2003.

SPRING: **Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling**. Camara G, Souza RCM, FreitasUM, Garrido J Computers & Graphics, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.

SOUSA, P.A.M. **Efeito Estruturante das Redes de Transporte no Território - Modelo de Análise**. Tese de Doutoramento. 313p., Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, 2010. Disponível em WWW por: http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/2418/30/ulsd059499_tese_PSousa.pdf . Acesso em: 28 de Maio de 2014

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3. ed. 643p., São Paulo – SP – Departamento de engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da universidade de São Paulo, 2006.

VALERIANO, M. M. 2008. **TOPODATA: Guia para utilização dos dados geomorfológicos locais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 75p. Disponível em: <<http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>> Acesso em: 07 de Novembro de 2015.

YILDIRIM, V.; YOMRALIOGLU, T. **Pipeline Route Selection Through Turkey: Comparison of a GIS-based Approach to a Traditional Route Selection Approach**. OIL GAS European Magazine 10, 2011, p. 1–5. Disponível em WWW:<http://web.itu.edu.tr/tahsin/tahsin/Yaynlar_Uluslararası_files/71_20.pdf>. Acesso em: 13 de Novembro de 2014.

ZHANG, T. **Application of GIS and CARE-W systems on water distribution networks in Skärholmen in Stockholm** . Dissertação de Mestrado. School of Architecture and the Built Environment. Royal Institute of Technology (KTH), 2006. Disponível em WWW por: <<http://www.pipeline-conference.com/sites/default/files/papers/113%20Tao.pdf>>. Acesso em: 28 de Janeiro de 2014

APÊNCICE A - QUESTIONÁRIO DELPHI

Questionário de Avaliação DELPHI

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Discente: Francisco Eudes do Amaral

Tese de Doutorado: “Uso de Técnicas de Geoprocessamento na Otimização do Traçado e na Resolução de Problemas de Rede em Adutoras”.

Orientadores: Prof. Dr. José Almir Cirilo e Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto

O presente questionário possui como objetivo ponderar os critérios selecionados para determinação do melhor caminho (menor custo) para locação do traçado de uma adutora.

O método utilizado para a definição das notas é o da Análise Hierárquica de Pesos (AHP). Este método realiza a comparação par a par dos critérios envolvidos no processo de tomada de decisão através de uma escala de comparação. A tabela 1 apresenta a escala de comparação a ser utilizada na ponderação dos critérios.

Tabela A.1 – Escala de comparação de critérios (DELPHI)

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

A tabela 2 apresenta um exemplo de critérios e ponderações definidos para a aquisição de um computador. Levando-se em consideração a escala de comparação apresentada na Tabela 1, o entrevistado considera o desempenho fortemente mais importante do que o custo, a beleza é Moderadamente menos importante do que o custo e fortemente menos importante do que o desempenho.

Tabela A.2 – Critérios e respectivas ponderações definidos para compra de um computador (DELPHI)

Critérios	Custo	Desempenho	Beleza
Custo	1	1/3	3
Desempenho	3	1	5
Beleza	1/3	1/5	1

A partir da escala de comparação e do exemplo apresentado pondere os critérios selecionados para os dois processos de tomada de decisão abaixo.

1) Determinação do melhor caminho para locação do traçado de uma adutora (DELPHI)

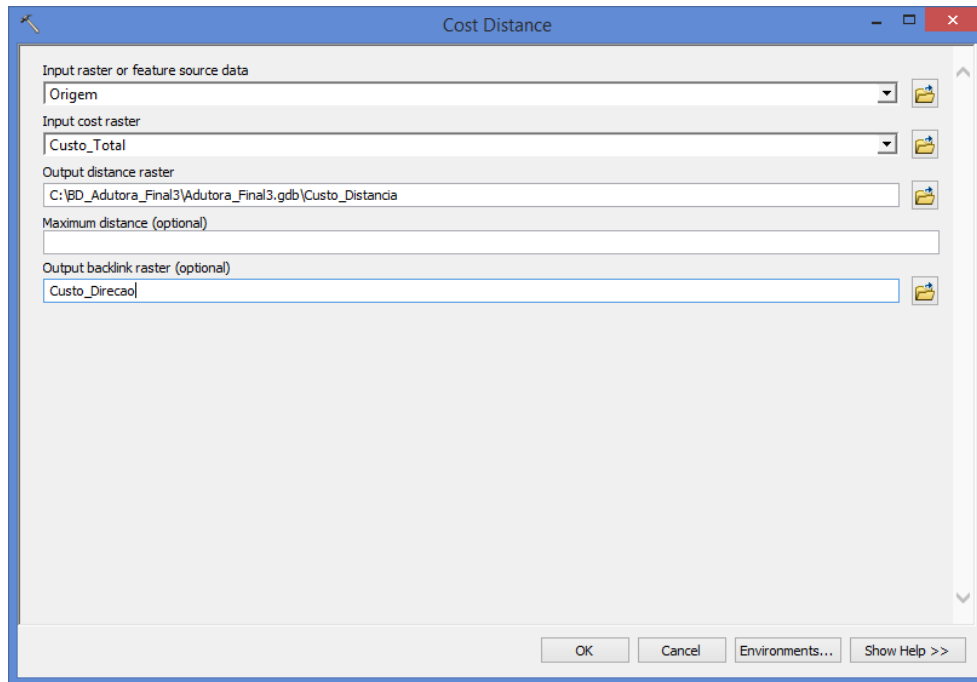
Critérios	Declividade	Distância de Estradas	Distância de Rios	Altitude (Análise da Perda de carga)
Declividade	1			
Distância de Estradas		1		
Distância de Rios			1	
Altitude (Análise da Perda de carga)				1

2) Sugestão de inclusão de algum critério nos processos de tomada de decisão propostos?

3) Sugestões ou críticas?

APÊNDICE B – FERRAMENTAS DO SPATIAL ANALYST E NETWORK ANALYST

B.1 FERRAMENTA COST DISTANCE (SPATIAL ANALYST)



B.2 FERRAMENTA COST PATH (SPATIAL ANALYST)

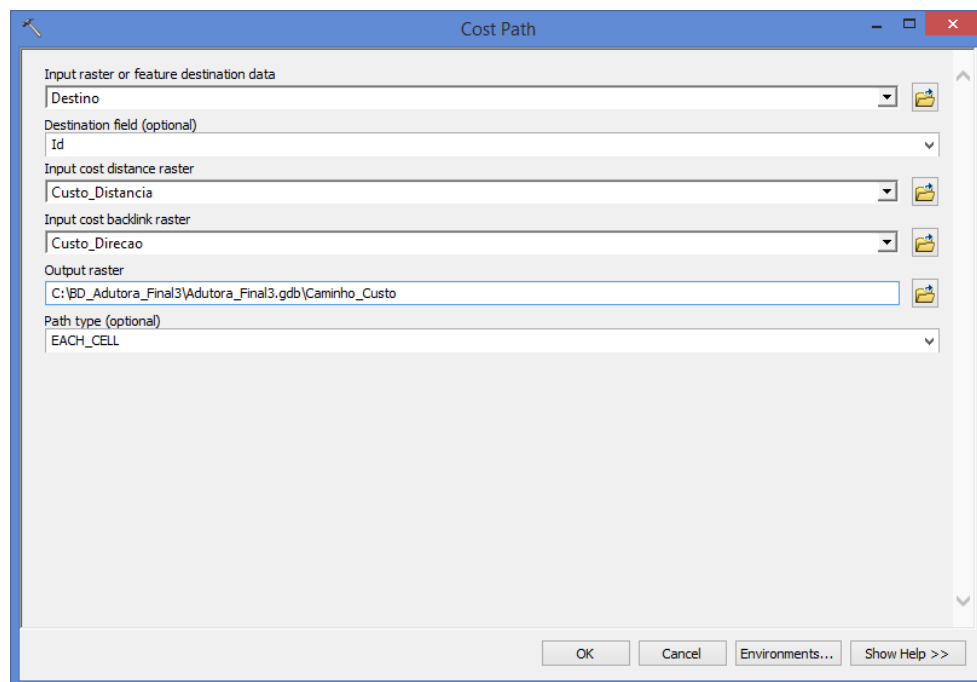


Tabela 5 - Características técnicas dos ramais de derivação da adutora de água tratada.

TRECHO	REGIME HIDRÁULICO	VAZÃO (L/s)	VELOCIDADE (m/s)	J (m/m)	DIÂMETRO NOMINAL	MATERIAL	EXTENSÃO (m)
DER1	Gravidade	5,56	0,60	0,004356	100	PVC DEFºFº	548
DER2	Gravidade	6,45	0,70	0,005792	100	PVC DEFºFº	246
EXTENSÃO TOTAL DAS DERIVAÇÕES							794

Tabela 6- Unidades de reservação adotadas para o projeto integrado.

LOCALIZAÇÃO	SITUAÇÃO	TIPO	MATERIAL	FUNÇÃO	CAPACIDADE
Bocaina	Projetado	Elevado	Concreto Armado	Distribuição	100 m ³
Sussuapara	Projetado	Elevado	Concreto Armado	Distribuição	150 m ³
Picos	Projetado	Apoiado	Concreto Armado	Distribuição	400 m ³

ANEXO B - DADOS CENSITÁRIOS DE MUNICÍPIOS

Tabela 1- Dados censitários dos municípios da área de interesse (Adutora de Bocaina)

		1970	1980	1991	1996	2000	2007	2010
Sussuapara - PI	Total	-	-	-		5,042	5,537	6,235
	Urbana	-	-	-	1,013	1,191	1,414	1,582
	Rural	-	-	-		3,851	4,123	4,653
Bocaina - PI	Total	3,962	3,786	3,890	4,001	4,208	4,039	4,346
	Urbana	913	872	1,197	1,350	1,493	1,693	1,730
	Rural	3,049	2,914	2,693	2,651	2,715	2,346	2,616
Picos - PI	Total	52,757	71,018	78,409	75,953	68,974	70,450	73,417
	Urbana	18,263	33,129	45,571	47,507	52,547	54,648	58,295
	Rural	34,494	37,889	32,838	28,446	16,427	15,802	15,122

ANEXO C - DEMANDA HÍDRICA DAS CIDADES ATENDIDAS PELO SISTEMA ADUTOR DE BOCAINA

Tabela 1- Demanda Hídrica da cidade de Bocaina

ANO	População (Habitantes)	I _P (%)	q (L/hab.dia)	I _A (%)	Demanda Média (L/s)	Demanda Média Com Perdas (L/s)	Demanda Máxima Diária (L/s)	Demanda Máxima Horária (L/s)
2011	1.728	25	120	100	2,400	3,200	3,840	5,760
2012	1.750	25	120	100	2,430	3,240	3,888	5,832
2013	1.771	25	120	100	2,460	3,280	3,936	5,904
2014	1.793	25	120	100	2,491	3,321	3,985	5,978
2015	1.816	25	120	100	2,522	3,362	4,035	6,052
2016	1.838	25	120	100	2,553	3,404	4,085	6,127
2017	1.861	25	120	100	2,585	3,446	4,136	6,204
2018	1.884	25	120	100	2,617	3,489	4,187	6,281
2019	1.908	25	120	100	2,649	3,533	4,239	6,359
2020	1.931	25	120	100	2,682	3,577	4,292	6,438
2021	1.955	25	120	100	2,716	3,621	4,345	6,518
2022	1.980	25	120	100	2,750	3,666	4,399	6,599
2023	2.004	25	120	100	2,784	3,712	4,454	6,681
2024	2.029	25	120	100	2,818	3,758	4,509	6,764
2025	2.054	25	120	100	2,853	3,804	4,565	6,848
2026	2.080	25	120	100	2,889	3,852	4,622	6,933
2027	2.106	25	120	100	2,925	3,900	4,680	7,019
2028	2.132	25	120	100	2,961	3,948	4,738	7,107
2029	2.159	25	120	100	2,998	3,997	4,797	7,195
2030	2.185	25	120	100	3,035	4,047	4,856	7,284
2031	2.213	25	120	100	3,073	4,097	4,917	7,375
2032	2.240	25	120	100	3,111	4,148	4,978	7,467
2033	2.268	25	120	100	3,150	4,200	5,040	7,560
2034	2.296	25	120	100	3,189	4,252	5,102	7,654
2035	2.325	25	120	100	3,229	4,305	5,166	7,749
2036	2.354	25	120	100	3,269	4,358	5,230	7,845
2037	2.383	25	120	100	3,309	4,413	5,295	7,943
2038	2.412	25	120	100	3,351	4,467	5,361	8,041
2039	2.442	25	120	100	3,392	4,523	5,428	8,141
2040	2.473	25	120	100	3,434	4,579	5,495	8,243
2041	2.504	25	120	100	3,477	4,636	5,563	8,345

Tabela 2 - Demanda Hídrica da cidade de Picos

ANO	População (Habitantes)	I _P (%)	q (L/hab.dia)	I _A (%)	Demanda Média (L/s)	Demanda Média Com Perdas (L/s)	Demanda Máxima Diária (L/s)	Demanda Máxima Horária (L/s)
2011	61.067	25	200	100	141,360	188,480	226,176	339,263
2012	61.931	25	200	100	143,359	191,145	229,374	344,061
2013	62.807	25	200	100	145,386	193,848	232,617	348,926
2014	63.695	25	200	100	147,441	196,589	235,906	353,859
2015	64.595	25	200	100	149,526	199,368	239,242	358,863
2016	65.509	25	200	100	151,640	202,187	242,625	363,937
2017	66.435	25	200	100	153,785	205,046	246,055	369,083
2018	67.374	25	200	100	155,959	207,946	249,535	374,302
2019	68.327	25	200	100	158,164	210,886	253,063	379,595
2020	69.293	25	200	100	160,401	213,868	256,641	384,962
2021	70.273	25	200	100	162,669	216,892	260,270	390,405
2022	71.267	25	200	100	164,969	219,959	263,950	395,926
2023	72.274	25	200	100	167,302	223,069	267,683	401,524
2024	73.296	25	200	100	169,667	226,223	271,468	407,202
2025	74.333	25	200	100	172,066	229,422	275,306	412,959
2026	75.384	25	200	100	174,499	232,666	279,199	418,799
2027	76.450	25	200	100	176,967	235,956	283,147	424,720
2028	77.531	25	200	100	179,469	239,292	287,151	430,726
2029	78.627	25	200	100	182,007	242,676	291,211	436,816
2030	79.739	25	200	100	184,580	246,107	295,328	442,993
2031	80.866	25	200	100	187,190	249,587	299,504	449,257
2032	82.010	25	200	100	189,837	253,116	303,739	455,609
2033	83.169	25	200	100	192,521	256,695	308,034	462,051
2034	84.345	25	200	100	195,244	260,325	312,390	468,585
2035	85.538	25	200	100	198,004	264,006	316,807	475,210
2036	86.747	25	200	100	200,804	267,739	321,287	481,930
2037	87.974	25	200	100	203,643	271,525	325,830	488,744
2038	89.218	25	200	100	206,523	275,364	330,437	495,655
2039	90.479	25	200	100	209,443	279,258	335,109	502,664
2040	91.759	25	200	100	212,405	283,206	339,847	509,771
2041	93.056	25	200	100	215,408	287,211	344,653	516,979

Tabela 3 - Demanda Hídrica da cidade de Sussuapara.

ANO	População (Habitantes)	I _p (%)	q (L/hab.dia)	I _A (%)	Demanda Média (L/s)	Demanda Média Com Perdas (L/s)	Demanda Máxima Diária (L/s)	Demanda Máxima Horária (L/s)
2011	1.601	25	120	100	2,223	2,964	3,557	5,335
2012	1.633	25	120	100	2,268	3,024	3,628	5,442
2013	1.665	25	120	100	2,313	3,084	3,701	5,551
2014	1.699	25	120	100	2,360	3,146	3,775	5,663
2015	1.733	25	120	100	2,407	3,209	3,851	5,776
2016	1.768	25	120	100	2,455	3,274	3,928	5,892
2017	1.803	25	120	100	2,504	3,339	4,007	6,011
2018	1.839	25	120	100	2,555	3,406	4,087	6,131
2019	1.876	25	120	100	2,606	3,475	4,169	6,254
2020	1.914	25	120	100	2,658	3,544	4,253	6,380
2021	1.952	25	120	100	2,711	3,615	4,338	6,508
2022	1.991	25	120	100	2,766	3,688	4,425	6,638
2023	2.031	25	120	100	2,821	3,762	4,514	6,771
2024	2.072	25	120	100	2,878	3,837	4,605	6,907
2025	2.114	25	120	100	2,936	3,914	4,697	7,046
2026	2.156	25	120	100	2,995	3,993	4,791	7,187
2027	2.199	25	120	100	3,055	4,073	4,887	7,331
2028	2.243	25	120	100	3,116	4,155	4,986	7,478
2029	2.288	25	120	100	3,178	4,238	5,086	7,628
2030	2.334	25	120	100	3,242	4,323	5,188	7,781
2031	2.381	25	120	100	3,307	4,410	5,292	7,937
2032	2.429	25	120	100	3,374	4,498	5,398	8,097
2033	2.478	25	120	100	3,441	4,588	5,506	8,259
2034	2.527	25	120	100	3,510	4,680	5,617	8,425
2035	2.578	25	120	100	3,581	4,774	5,729	8,594
2036	2.630	25	120	100	3,653	4,870	5,844	8,766
2037	2.683	25	120	100	3,726	4,968	5,961	8,942
2038	2.736	25	120	100	3,801	5,067	6,081	9,121
2039	2.791	25	120	100	3,877	5,169	6,203	9,304
2040	2.847	25	120	100	3,955	5,273	6,327	9,491
2041	2.904	25	120	100	4,034	5,379	6,454	9,681