

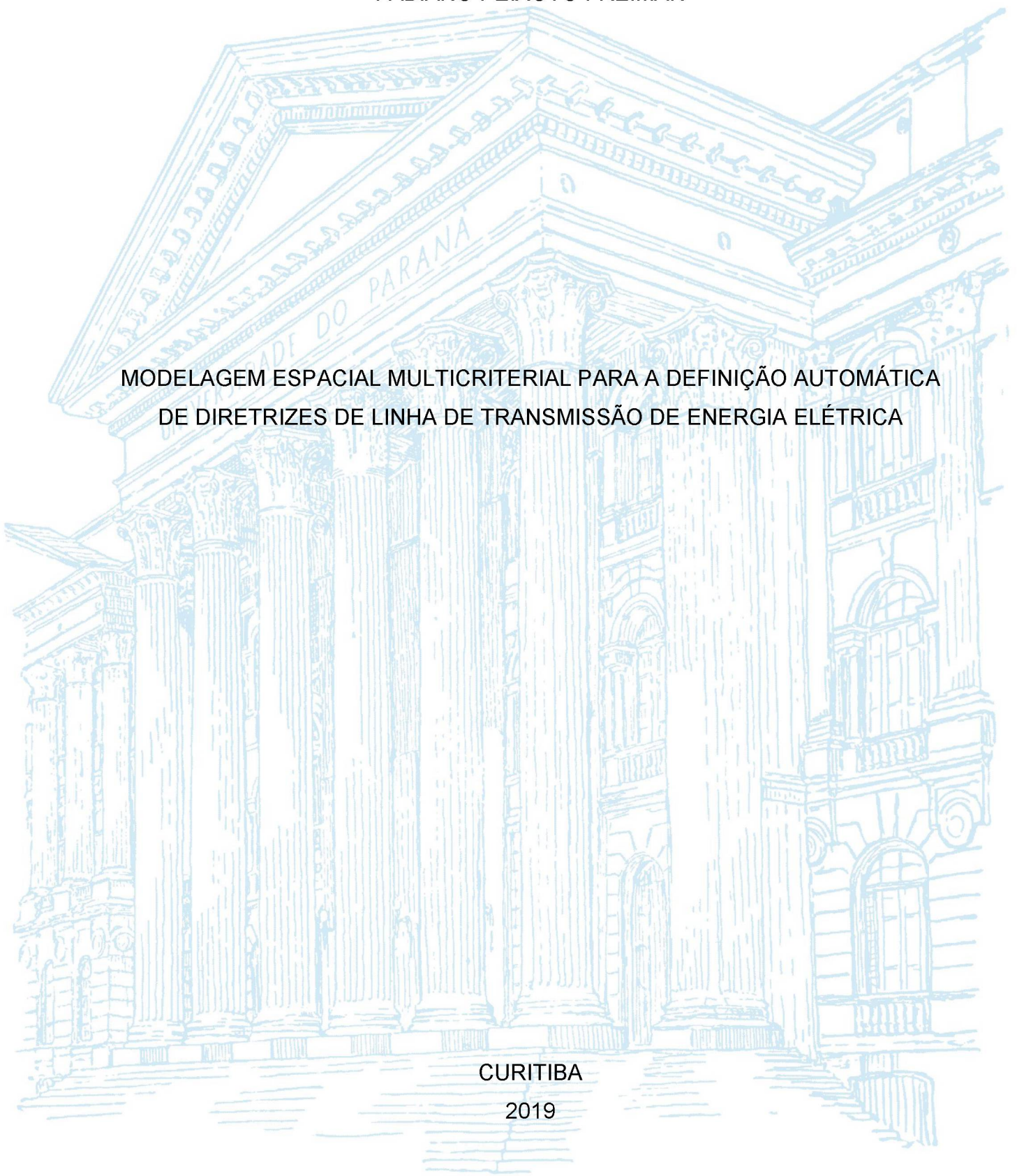
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABIANO PEIXOTO FREIMAN

MODELAGEM ESPACIAL MULTICRITERIAL PARA A DEFINIÇÃO AUTOMÁTICA
DE DIRETRIZES DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CURITIBA

2019



FABIANO PEIXOTO FREIMAN

MODELAGEM ESPACIAL MULTICRITERIAL PARA A DEFINIÇÃO AUTOMÁTICA
DE DIRETRIZES DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F865m Freiman, Fabiano Peixoto

Modelagem espacial multicriterial para a definição automática de diretrizes de linha de transmissão de energia elétrica [recurso eletrônico] / Fabiano Peixoto Freiman – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Daniel Rodrigues dos Santos

1. Sistema de Informação Geográfico. 2. Modelagem Multicriterial. 3. Linhas de transmissão – energia elétrica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Santos, Daniel Rodrigues dos. III. Título.

CDD: 526.31

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FABIANO PEIXOTO FREIMAN** intitulada: **MODELAGEM ESPACIAL MULTICRITERIAL PARA A DEFINIÇÃO AUTOMÁTICA DE DIRETRIZES DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2019.

DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

EDSON APARECIDO MITISHITA
Avaliador Interno (UFPR)

JOSÉ EDUARDO GONÇALVES
Avaliador Externo (SIMEPAR)

AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial Dulce Nogueira Peixoto e Alessandra Peixoto Freiman.

Ao Professor Dr. Daniel Rodrigues dos Santos, pela orientação, amizade e dedicação durante o curso de mestrado.

Aos professores membros da banca de defesa, Professor Dr. Edson Aparecido Mitishita e Professor Dr. José Eduardo Gonçalves.

Aos amigos Marcus Bitencourt, Loram Siqueira, Camila Rodrigues, Karina Braga, Camila Carvalho, Ihasmyn Herdy, Marciano Lima e Jaime Dias.

Aos colegas e amigos do curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, em especial aos amigos Jorge Felipe Euriques, Alan Gomes, José Roberto Pedrosa, Sérgio Alves, Eduardo Chiarani, Jaqueline Prunzel, Kauê Moraes, Nicolas Rafael Siqueira, Eliseu Martins e Lucas Ramiro Barbosa, .

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Aos professores do curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), em especial aos professores Paula Debiasi, Alessandra Baptista, Juliana Moullin Fosse e Luiz Guimarães pelo apoio e incentivo.

A Mônica, secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Agradeço a Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela oportunidade de aperfeiçoar a minha formação profissional e a CAPES pelo fornecimento da bolsa de estudos.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado uma análise da aplicação da modelagem espacial multicriterial para a definição do traçado automático de linhas de transmissão (LT) de energia elétrica. As dificuldades no processo de planejamento de uma nova LT e a necessidade de se buscar novas técnicas para facilitar o processo de definição de diretrizes de LT, minimizando erros de planejamento e possíveis retrabalhos são as questões motivadoras deste trabalho. Basicamente dois pontos são discutidos: a definição dos critérios relevantes no processo de planejamento de uma nova rota de LT de energia elétrica e a utilização de Métodos de Análise Multicritério (MAM) associados ao Sistema de Informação Geográfico (SIG) para a definição automática de diretrizes de LT. A definição dos critérios foi realizada a partir da análise de trabalhos relacionados ao tema e ao estudo da legislação vigente no Brasil. A modelagem espacial multicriterial se baseou na utilização de dados geográficos associados ao MAM *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Para avaliar a eficiência da modelagem espacial multicriterial dois estudos de caso (localizados no estado do Paraná) foram conduzidos: (1) LT de energia elétrica que liga a Subestação de Sarandi à Subestação de Londrina e; (2) LT de energia elétrica que liga a Subestação de Figueira à Subestação de Ponta Grossa Norte. Os resultados obtidos mostraram que a modelagem espacial multicriterial é aplicável na etapa de planejamento de novos traçados de LT, auxiliando os analistas na agregação dos diferentes critérios em um único problema de otimização, minimizando a complexidade da etapa de planejamento e auxiliando no processo de tomada de decisão.

Palavras-chave: Linhas de transmissão. Planejamento. Otimização. SIG. Modelagem Multicriterial.

ABSTRACT

In this work presents an analysis of the application of multicriteria spatial modeling for the definition of the automatic tracing of electric power transmission lines (TL). The difficulties in the planning process of a new TL and the need to seek for new techniques to facilitate the LT guidelines definition process, reducing planning errors and possible reworkings are the motivating issues of this work. Basically, two points are discussed: the definition of the relevant criteria on the planning process of a new electric energy TL route and the use of Multicriteria Analysis Methods (MAM) associated to the Geographic Information System (SIG) for the guidelines TL automatic definition. The definition of the criteria was made based on the analysis of papers related to the topic and the study of the current legislation in Brazil. The multicriteria spatial modeling was based on the use of geographic data associated with the MAM Analytic Hierarchy Process (AHP). To evaluate the efficiency of multicriteria spatial modeling, two case of studies (located in the state of Paraná) were conducted: (1) electric power TL connecting the Sarandi Substation to the Londrina Substation; (2) TL of electric power linking the Figueira Substation to the Ponta Grossa Norte Substation. The results showed that multicriteria spatial modeling is applicable in the planning stage of new TL, helping analysts to merge the different criteria into a single optimization problem, minimizing the complexity of the planning steps and assisting in the decision.

Keywords: Transmission lines. Planning. Optimization. SIG. Multicriterial Modeling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FATORES CONSIDERADOS NA ETAPA DE PLANEJAMENTO DE UMA LT	17
FIGURA 2 – MODELAGEM DA SUPERFÍCIE DE CUSTO.....	24
FIGURA 3 – INTERLIGAÇÃO DOS SUBSISTEMAS ELÉTRICOS NO BRASIL.....	26
FIGURA 4 – INTERFERÊNCIAS SOCIOAMBIENTAIS	28
FIGURA 5 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO.....	31
FIGURA 6 – ÁLGEBRA DE MAPAS	33
FIGURA 7 – RELAÇÃO ENTRE AS CÉLULAS DA BASE MATRICIAL	37
FIGURA 8 – EXEMPLO DE UM GRAFO COM FUNÇÃO DE CUSTO SOBRE AS ARESTAS (a) CONSTRUÇÃO DO GRAFO (b) DEFINIÇÃO DO TRAÇADO OTIMIZADO.....	40
FIGURA 9 – DIAGRAMA DO MÉTODO PROPOSTO	45
FIGURA 10 – ÁLGEBRA DE MAPAS	46
FIGURA 11 – PROCESSO DE PONDERAÇÃO COM O AHP	48
FIGURA 12 – SUPERFÍCIE DE ADEQUABILIDADE – CENÁRIO 1.....	58
FIGURA 13 – SUPERFÍCIE DE CUSTO ACUMULADO – CENÁRIO 1.....	59
FIGURA 14 – TRAÇADO DA DIRETRIZ DE LT DE ENERGIA ELÉTRICA – CENÁRIO 1	60
FIGURA 15 – DIFERENÇAS ENTRE OS TRAÇADOS – CENÁRIO 1 (a) INFLUÊNCIA DA.....	61
FIGURA 16 – DESVIO DO ASSENTAMENTO RURAL – CENÁRIO 1.....	62
FIGURA 17 – SUPERFÍCIES CENÁRIO 2 (a) ADEQUABILIDADE	64
FIGURA 18 – TRAÇADOS OBTIDOS PARA O CENÁRIO 2	65
FIGURA 19 – DIFERENÇAS ENTRE OS TRAÇADOS – CENÁRIO 2 (a) DECLIVIDADE	66
FIGURA 20 – DIFERENÇAS ENTRE OS TRAÇADOS – CENÁRIO 2 (a) REMANESCENTES.....	67
FIGURA 21 – ÁREAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL	68
FIGURA 22 – ÁREA DE ANÁLISE – CENÁRIO 1.....	69
FIGURA 23 – ÁREA DE ANÁLISE – CENÁRIO 2.....	71

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – TRABALHOS RELACIONADOS.....	23
QUADRO 2 – IMPACTOS CAUSADOS PELA CONSTRUÇÃO DE UMA LT	27
QUADRO 3 – ÁREA PARA A ANÁLISE DE INTERFERÊNCIAS.....	29
QUADRO 4 – REQUISITOS MÍNIMOS PARA LT DE ENERGIA ELÉTRICA.....	30
QUADRO 5 - CRITÉRIOS CONSIDERADOS NO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO...	42
QUADRO 6 – INDICADORES PARA ANÁLISE QUANTITATIVA.....	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESCALA DE PONDERAÇÃO	47
TABELA 2 – ESCALA DE PONDERAÇÃO MÉTODO AHP	49
TABELA 3 – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIA.....	50
TABELA 4 – PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS	55
TABELA 5 – COEFICIENTES DE CONSISTÊNCIA	55
TABELA 6 – PONDERAÇÃO TOTAL.....	56
TABELA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE AS ROTAS - CENÁRIO 1	63
TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE AS ROTAS - CENÁRIO 2	68

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AHP	- <i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
APA	- Área de Proteção Ambiental
DUP	- Declaração de Utilidade Pública
EIA	- Estudos de Impacto Ambiental
ELECTRE	- <i>Elimination et Choix Traudisant la Réalité</i>
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
FCP	- Fundação Cultural Palmares
FUNAI	- Fundação Nacional do Índio
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INCRA	- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPHAN	- Instituto do Patrimônio Histórico Artístico Nacional
LT	- Linha de Transmissão
MAM	- Métodos de Análise Multicritério
MAUT	- <i>Multiple Attribute Utility Theory</i>
NASA	- <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
PD	- Programação Dinâmica
PLI	- Programação Linear Inteira
POC	- Problema de Otimização Combinatória
PROMETHEE	- <i>Preference Ranking Organization Method Enrichment Evaluations</i>
RIMA	- Relatório de Impacto Ambiental
RPPN	- Reserva Particular do Patrimônio Natural
SE	- Subestação
SIG	- Sistema de Informação Geográfico
SIN	- Sistema Interligado Nacional
SRTM	- <i>Shuttler Radar Topographic Mission</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.3	JUSTIFICATIVA.....	18
1.4	OBJETIVO GERAL.....	19
1.4.1	Objetivos específicos.....	19
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	ESTADO DA ARTE	21
2.1.1	Discussão do estado da arte	23
2.2	SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO.....	25
2.2.1	Aspectos do planejamento de uma nova LT de energia elétrica	27
2.3	MODELAGEM MULTICRITERIAL.....	31
2.3.1	Métodos de Análise Multicritério.....	34
2.3.1.1	AHP	34
2.3.1.2	ELECTRE I.....	34
2.3.1.3	PROMETHEE I.....	35
2.4	OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADOS DE LT	36
2.4.1	Problema de caminho mínimo	38
2.4.2	Algoritmo de Dijkstra.....	39
3	MATERIAIS E MÉTODO.....	41
3.1	MATERIAIS	41
3.1.1	Dados	41
3.1.2	Critérios de otimização	42
3.1.2.1	Social.....	42
3.1.2.2	Ambiental.....	43
3.1.2.3	Econômico.....	43
3.2	MÉTODO.....	45
3.2.1	Estratégia de otimização	45
3.2.2	Ponderação dos critérios.....	47
3.2.2.1	Aplicação do Método AHP.....	48
3.2.3	Construção da superfície de adequabilidade.....	51
3.2.4	Definição do traçado otimizado	51

4	EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
4.1	EXPERIMENTOS	54
4.1.1	Processo de modelagem espacial multicriterial.....	54
4.1.2	Cenário 1 – LT 530 kv (Sarandi – Londrina).....	57
4.1.3	Cenário 2 – LT 230 kv (Figueira – Ponta Grossa Norte).....	63
4.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	69
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	72
5.1	CONCLUSÕES.....	72
5.2	RECOMENDAÇÕES	73
	REFERÊNCIAS.....	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O Brasil possui um sistema de transmissão de energia elétrica extenso e complexo que se expande continuamente em função do crescimento econômico e populacional. Para assegurar a existência de recursos energéticos e garantir futuras demandas, é necessário construir novas instalações de linhas de transmissão (LT) de energia elétrica e subestações em todo o território nacional. Basicamente, o planejamento do traçado de diretrizes de LT (definição traçado inicial e experimental) envolve o conhecimento prévio de fatores restritivos presentes na área de instalação do empreendimento.

Segundo Monteiro et al (2005), o processo de planejamento do traçado de uma diretriz é definido como o estágio antecessor ao projeto de uma nova LT, no qual o planejador decide a geometria do traçado e as áreas que serão atravessadas pelo empreendimento. Conforme Bachmann (2018), esse processo é desafiador, principalmente devido à dimensão linear da LT, que geralmente atravessa diferentes municípios e estados com interesses políticos divergentes. Ademais, áreas de preservação ambiental, remanescentes florestais e outros tipos de áreas protegidas por lei devem ser evitadas, além da consideração de barreiras físicas como o percentual de declividade, rios, áreas alagadas, etc.

Em abordagens convencionais esse planejamento é realizado de forma manual, podendo gerar inconsistências. Para automatizar o processo de definição do traçado de uma LT, é necessário integrar informações geográficas detalhadas e conhecimento técnico especializado, a fim de reduzir o tempo de planejamento, inconsistências de projeto e de custos de instalação. Nesse contexto, a aplicação de Métodos de Análise Multicritério (MAM) associados ao Sistema de Informações Geográfico (SIG) fornece soluções que permitem compreender os fatores inerentes a otimização do traçado de uma LT de energia elétrica, auxiliando na identificação das variáveis e suas influências na obtenção de resultados fundamentados em modelos espaciais realistas (BAGLI et al., 2011).

Segundo EPE (2005), no processo de definição de diretrizes de LT o mais indicado é utilizar um enfoque estratégico considerando critérios sociais, ambientais e econômicos. Os principais norteadores para a definição da geometria do traçado é a

minimização da interferência com áreas urbanas ou protegidas por lei e priorização de áreas próximas e paralelas a rodovias e linhas de transmissão existentes. Esses norteadores são suficientes para estimar um traçado inicial, porém devem ser complementados com a consideração de critérios técnicos, como declividade, tipo de solo e ângulos de deflexão.

O processo de definição de diretrizes de LT é complexo, uma vez que envolve critérios conflitantes. Para a minimização da complexidade do procedimento, neste trabalho é proposto a utilização da modelagem espacial multicriterial para auxiliar na definição automática do traçado da diretriz da LT de energia elétrica, proporcionando maior agilidade no processo de coleta, documentação e associação dos critérios relevantes na etapa de planejamento do empreendimento. Especificamente, o trabalho visa determinar os traçados de diretrizes de LT de forma automática e objetiva, com economia de tempo e de recursos humanos, diminuindo a necessidade de visitas a campo e possíveis retrabalhos.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Determinar a diretriz do traçado ideal para uma nova LT corresponde a definir àquela que apresente menores custos de construção. Segundo Bagli et al. (2011), esses custos não são necessariamente de natureza monetária, e devem ser entendidos em um sentido abstrato de acordo com os impactos gerados pela construção do empreendimento. De acordo com a EPE (2018), o planejamento de uma nova LT deve considerar 3 fatores, como ilustrado na FIGURA 1.

FIGURA 1 – FATORES CONSIDERADOS NA ETAPA DE PLANEJAMENTO DE UMA LT



FONTE: O autor (2018).

A construção e operação de uma LT gera impactos sobre o meio ambiente, devido a fatores como poluição eletromagnética, desmatamento, fragmentação de habitat natural e poluição visual. No Brasil, o fator ambiental deve ser considerado de acordo com as normas definidas pela legislação brasileira junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) e o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) para a obtenção do licenciamento e definição da localização do empreendimento. O fator social diz respeito em como a nova LT poderá afetar o ambiente humano em termos de proximidade, visibilidade e desapropriações. O fator econômico está relacionado aos aspectos técnicos do empreendimento, que são determinados a partir das características físicas (tipo de solo, condições meteorológicas, etc.) do local de instalação.

O principal problema está no equacionamento desses fatores, que torna o processo de definição do traçado de diretrizes de LT complexo, uma vez que deve ser tratado como um problema de multicritérios, no qual o caminho otimizado não é aquele que apresente a menor dimensão linear, mas aquele que apresente o menor impacto social, ambiental e econômico. Além disso, os métodos convencionais para a seleção do caminho ótimo para o roteamento de diretrizes de LT são realizados com base em visitas a campo percorrendo toda a área de estudo, tornando o processo caro e demorado.

1.3 JUSTIFICATIVA

Considerando que o processo de definição do traçado locacional de diretrizes de LT é complexo (devido envolver critérios conflitantes), com a utilização da modelagem espacial multicriterial é possível realizar o equacionamento dos critérios envolvidos a partir da integração de variáveis quantitativas e qualitativas e diferentes pontos de vista (especialistas) em um único problema de otimização, fato que possibilita minimizar custos, tempo e eliminar possíveis retrabalhos. Pontualmente, é possível justificar este trabalho a partir dos seguintes benefícios:

- a) Utilização de ferramentas SIG, possibilitando a realização de consultas rápidas para a obtenção de informações sobre as principais restrições que impactam a definição do traçado de LT de energia elétrica, possibilitando a

geração de diretrizes de faixas de domínio em projetos de LT de forma rápida e precisa dentro dos parâmetros estipulados;

b) O tempo economizado na fase de definição do traçado de diretrizes de LT, que possibilita aos analistas avaliar com maiores detalhes todos os pontos que poderão ser impactados com a construção do empreendimento. Assim, a diminuição de custos no processo ocorrerá através da redução do tempo gasto e da sistematização para a definição de traçados precisos, tanto para a participação das concessionárias em leilões promovidos pela ANNEL, quanto para a definição da diretriz do traçado em projetos.

1.4 OBJETIVO GERAL

Investigar uma estratégia automática de definição do traçado de diretrizes de LT baseada em modelagem espacial multicriterial.

1.4.1 Objetivos específicos

- a) Propor um modelo conceitual para a otimização da diretriz do traçado locacional de LT;
- b) Avaliar a influência das restrições utilizadas para a determinação da solução ótima;
- c) Determinar rotas de diretrizes de LT por meio de algoritmos de otimização;
- d) Avaliar os resultados obtidos na etapa (c) com traçados de LT existentes e discutir as potencialidades da modelagem espacial multicriterial para a definição do traçado de diretrizes de LT.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está dividido em 5 Capítulos. O primeiro Capítulo refere-se à apresentação do tema a ser discutido, definição do problema e apresentação dos objetivos geral e específicos. No segundo Capítulo é realizado o levantamento e descrição dos principais conceitos relacionados a temática de estudo. No terceiro Capítulo são descritos os materiais utilizados e o método proposto para a otimização do traçado de LT de energia elétrica. No quarto Capítulo são apresentadas as

discussões relacionadas aos resultados obtidos. No quinto e último Capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações futuras.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a fundamentação teórica do processo de otimização do traçado de LT de energia elétrica. Primeiramente é apresentado o estado da arte em modelagem espacial multicriterial para a otimização do traçado de LT de energia elétrica. Em seguida, o sistema elétrico brasileiro e os aspectos do planejamento de uma nova LT são apresentados, seguidos pela apresentação dos métodos de análise multicritério aplicados ao processo de modelagem espacial multicriterial. Posteriormente o processo de otimização do planejamento de novos traçados de LT é descrito. Finalmente, é apresentado o algoritmo de Dijkstra (1959).

2.1 ESTADO DA ARTE

Nesta Subseção é apresentado o estado da arte no processo de definição automática de diretrizes de traçado de LT de energia elétrica. Esse processo é clássico na etapa de planejamento e, muitas vezes, é realizado de forma manual pelas concessionárias. Para automatizar o processo e torná-lo mais dinâmico, diversos trabalhos da literatura especializada propõem a utilização de modelos matemáticos associados ao SIG para a representação de restrições existentes na área de implantação do empreendimento.

Shu et al (2012) propuseram um método para a definição de diretrizes de LT considerando variáveis ambientais. A proposta é baseada em Programação Linear (PL) associado ao SIG, objetivando a minimização de custos de construção da LT de energia elétrica. Monteiro et al (2005) utilizaram variáveis geográficas associadas a valores de construção para a definição de diretrizes de LT. O traçado foi obtido com a aplicação de algoritmos baseados em Programação Dinâmica (PD). EPRI (2006) combinou a utilização de MAM associado ao SIG para a definição do caminho mínimo entre subestações. A abordagem foi realizada a partir da construção de três superfícies de custo (ambiental, social e econômico) combinadas a partir da aplicação de álgebra de mapas.

Schimdt (2009) utilizou um conjunto de imagens representando as restrições existentes no local de implantação do empreendimento. O principal objetivo foi automatizar a metodologia utilizada pelos técnicos do setor de planejamento do

traçado de diretrizes de LT para tornar a definição do traçado mais objetiva. Segundo o autor, o método foi capaz de identificar as principais restrições observadas nos mapas e definir diretrizes que evitassem essas áreas. No entanto, necessitava da identificação manual de obstáculos verticais.

Lima et al. (2016) utilizou o algoritmo de Dijkstra (1959) para a determinação do traçado otimizado de LT. A contribuição do trabalho foi o desenvolvimento de um método de ponderação baseado nos custos monetários (R\$/km) de construção. Thiam e Demarco (2016), utilizaram o Método de Análise Hierárquica (AHP, do inglês *Analytic Hierarchy Process*) associado a técnica *Delphi* para validar a consistência dos pesos atribuídos aos critérios sociais, ambientais e econômicos.

Grassi et al (2014) e Li et al (2016), além dos critérios tradicionais inseridos normalmente nos processos de otimização do traçado de diretrizes de LT, propuseram a inserção de dados adicionais para aprimorar a metodologia e minimizar os custos. O primeiro inseriu dados relacionados a poluição visual causados pelo empreendimento, e o segundo inseriu restrições relacionadas aos riscos de descargas atmosféricas na região de implantação. Bagli et al. (2011) definiram o traçado otimizado de LT a partir da construção de uma superfície de custo com base na densidade populacional, custo de implementação e proximidade de construções. Além disso, os autores realizaram uma investigação de sensibilidade do modelo a mudanças nas posições dos pontos finais e iniciais dos traçados, encontrando diferenças significativas entre os traçados obtidos. Os três métodos utilizaram o algoritmo de Dijkstra (1959) para a definição do traçado otimizado.

Bachmann et al (2018) desenvolveu uma ferramenta de análise espacial para a definição do traçado automático de diretrizes de LT de energia elétrica. Nessa abordagem as camadas utilizadas são divididas em grupos, os quais são ponderados de acordo com a prioridade de minimização de impactos. Foram utilizadas camadas referentes a eficiência econômica, uso e ocupação do solo e áreas de preservação ambiental. Os pesos foram atribuídos de acordo com as restrições impostas pela legislação Alemã e aplicado o algoritmo de Dijkstra (1959) para a definição da diretriz final. A principal vantagem do método é a possibilidade de iteração e quantificação dos impactos gerados pelo empreendimento no momento da modelagem da diretriz.

No QUADRO 1 são apresentadas as principais características dos métodos abordados no estado da arte.

QUADRO 1 – TRABALHOS RELACIONADOS

Autores	Observações
Monteiro et al (2005)	Utilização da PD. Utiliza fatores ambientais, sociais e econômicos. Permite a modelagem dos custos relativos a mudanças de inclinação do terreno.
EPRI (2006)	Utiliza fatores ambientais, sociais e econômicos. Definição de macro corredores e diretrizes preferenciais.
Schmidt (2009)	Utilização do algoritmo de Dijkstra (1959). Utilização de fatores ambientais, sociais e econômicos.
Bagli et al. (2011)	Utilização do algoritmo de Dijkstra (1959). Insere no modelo a distância mínima dos centros populacionais para a construção segura de LT e rotas de migração de pássaros.
Shu et al (2012)	Utilização de parâmetros ambientais. Busca a minimização dos custos relacionados a construção do empreendimento.
Grassi et al. (2014)	Utilização do algoritmo de Dijkstra (1959) Além dos critérios tradicionais inseriu restrições de poluição visual.
Li et al. (2016)	Utilização do algoritmo de Dijkstra (1959) A principal contribuição foi a inserção de dados de descargas atmosféricas no processo de otimização.
Lima et al. (2016)	Utilização do algoritmo de Dijkstra (1959). A principal contribuição foi a minimização da subjetividade do processo de ponderação.
Bachmann et al. (2018)	Utilização do algoritmo de Dijkstra (1959). Desenvolvimento de uma ferramenta de ponderação, visualização e otimização de traçados entre dois pontos geográficos definidos.

FONTE: O autor (2019).

2.1.1 Discussão do estado da arte

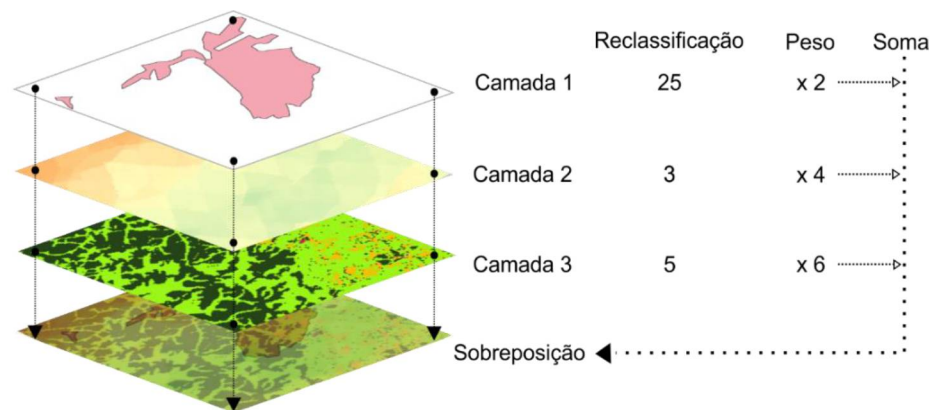
Segundo Weedy (1989) os métodos de análise espacial são ferramentas fundamentais no processo de planejamento do traçado de diretrizes de LT de energia elétrica, uma vez que possibilita analisar as características do local de implantação e definir quais os possíveis impactos causados na localidade pela construção do empreendimento. Esse processo é realizado a partir da consideração de variáveis sociais, econômicas e ambientais que são associadas para a definição do traçado de diretrizes de LT. No estado da arte, observa-se que tipicamente é empregada a técnica de modelagem multicriterial para a realização de avaliações espaciais e determinação da adequabilidade da localidade para a construção do futuro empreendimento.

A modelagem espacial multicriterial é o processo de representação da realidade geográfica em um número finito de registro (GOODCHILD, 1993) realizada a partir da aplicação de modelos matemáticos associados ao SIG para a representação das feições naturais e artificiais, facilitando a compreensão da configuração espacial do ambiente e conseqüentemente o planejamento de projetos de engenharia. No caso da otimização de diretrizes LT, a modelagem é realizada com base em um modelo de avaliação, a partir do qual é possível relacionar a construção do empreendimento com os impactos/custos gerados em cada variável geográfica

considerada no problema de definição das características geométricas do novo empreendimento.

Neste procedimento, cada variável geográfica é associada a uma camada matricial, composta por unidades mínimas de áreas (*pixels*), que serão definidas de acordo com a escala de obtenção dos dados geográficos. Aos *pixels* são atribuídos valores relacionados aos custos de atravessamento da célula pelo empreendimento a partir do processo denominado de reclassificação. Cada camada considerada no processo de otimização do traçado de LT é ponderada de acordo com a sua influência nos custos de construção para posteriormente somá-las em uma única superfície denominada de superfície de adequabilidade (realização do processo denominado de álgebra de mapas), sobre a qual é definido o traçado otimizado. No estado da arte, apresentado na Subseção 2.1, observa-se que a utilização de camadas matriciais e a aplicação de álgebra de mapas é amplamente utilizada devido a eficiência computacional e a simplicidade da metodologia. Esse processo é ilustrado na FIGURA 2.

FIGURA 2 – MODELAGEM DA SUPERFÍCIE DE CUSTO



FONTE: O autor (2019).

A qualidade do modelo de adequabilidade ao empreendimento está relacionada a consistência das ponderações destinadas a cada critério utilizado. O processo de ponderação é realizado a partir da atribuição de níveis de adequabilidade propostos por especialista ou pela aplicação de MAM. Os critérios considerados com maior frequência são a proximidade de áreas urbanas (GRASSI et al, 2014), áreas de proteção ambiental, degradação da paisagem (BAGLI et al; 2011; GRASSI et al,

2014), limitações de engenharia (MONTEIRO et al, 2005) e custos associados a construção do empreendimento (SHU et al, 2012; LIMA et al, 2016). O modelo de adequabilidade é o principal dado de entrada para os algoritmos de caminho mínimo aplicados para a definição do traçado final. Nas abordagens destacadas na Subseção 2.1, o algoritmo de Dijkstra (1959) é o mais utilizado. A vantagem deste algoritmo é a facilidade de implementação e adequação do método a diferentes problemas de otimização em rede, além de convergir rapidamente para uma solução considerada ótima.

Apesar do problema de definição de diretrizes de LT ser antigo, observa-se que a discussão acerca da temática ainda é limitada e apresenta desafios, como: a subjetividade do processo de ponderação e dos MAM, a aquisição de dados geográficos em uma escala de representação adequada e a consideração de aspectos técnicos de construção no processo de definição do traçado de uma nova diretriz. Na Subseção 2.2 são apresentados os aspectos gerais do Sistema Elétrico Brasileiro.

2.2 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

A geração de energia elétrica compreende todo o processo de transformação de uma fonte primária de energia em eletricidade (REIS; CUNHA, 2006). No Brasil, a principal fonte primária para a geração de energia elétrica são as usinas hidrelétricas, correspondendo a 60% da capacidade instalada em operação no país, seguidas por usinas térmicas e eólicas (EPE, 2018). Uma vez gerada, a energia deve ser transportada até os centros de distribuição de energia elétrica. O Brasil conta com uma grande rede de LT, denominada de Sistema Interligado Nacional (SIN). Essa rede se estende por boa parte do país interligando os 4 subsistemas existentes (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul), como esquematizado na FIGURA 3.

Além dos 4 subsistemas que compõem o SIN, existem os Sistemas Isolados que estão localizados (em maioria) na região Amazônica (ver FIGURA 3) devido às dificuldades de construção de LT impostas pelas características naturais da região. Segundo a EPE (2018), o Sistema Elétrico Brasileiro (em março de 2018), totalizou 142.942 km de LT com tensão igual ou superior a 230 kv e tem como funções:(a) transmissão da energia para os centros de carga, (b) Integração entre os diversos elementos do sistema elétrico para garantir estabilidade e confiabilidade da rede, (c)

Interligação entre as bacias hidrográficas de modo a otimizar a geração hidrelétrica e
 (d) Integração energética com países vizinhos.

FIGURA 3 – INTERLIGAÇÃO DOS SUBSISTEMAS ELÉTRICOS NO BRASIL



FONTE: O autor (2019).

Devido ao crescimento do país e a necessidade de renovação do sistema de transmissão de energia elétrica é necessário a construção de novas LTs para o transporte de energia elétrica para os centros consumidores, que envolvem custos associados a valores de construção, indenizações e processo de mitigação de impactos no meio ambiente. Para minimizá-los, no processo de planejamento são considerados diferentes aspectos a fim de otimizar a definição do traçado de LT. Na Subseção 1.2 são descritos os aspectos que devem ser considerados no planejamento para a definição de um novo traçado de diretriz de LT.

2.2.1 Aspectos do planejamento de uma nova LT de energia elétrica

Frente a crescente demanda por energia elétrica, novas LT devem ser construídas para conectar as usinas geradoras com as regiões consumidoras. O processo de seleção do melhor trajeto para abrigar a LT é complexo, visto que envolvem grandes extensões e um grande número de fatores devem ser considerados no processo de planejamento do traçado. Como descrito na Subseção 1.2, a definição de uma rota ideal de uma nova diretriz de LT corresponde definir àquela que apresente menores custos, relacionados a valores monetários de construção e aos impactos sociais e ambientais causados na área de influência do empreendimento.

Devido a esses fatores, os projetos relacionados a construção de uma nova LT não deve necessariamente optar pelo “menor caminho” (distância), mas por aquele que gere impactos mínimos na região de instalação e os custos de construção estejam abaixo de um certo limiar econômico definido. Para a definição das novas diretrizes de LT, os meios físico, biótico, socioeconômico e cultural devem ser avaliados, além de levantamentos meteorológicos e geotécnicos para a escolha da alternativa que minimize os impactos e custos associados a construção do empreendimento. No QUADRO 2 são listados os principais impactos relacionados a construção de uma LT.

QUADRO 2 – IMPACTOS CAUSADOS PELA CONSTRUÇÃO DE UMA LT

Meio	Impactos
Físico	Erosão do solo Interferência com recursos hídricos Interferência com áreas legalmente protegidas
Biótico	Retirada de cobertura vegetal Interferência na fauna e na flora Interferência na rota de migração de pássaros
Socioeconômico e cultural	Degradação da paisagem Desapropriações de terras Limitação do uso do solo (servidões) Deslocamento nas populações afetadas Interferência nas atividades agropecuárias Influência em populações indígenas/quilombolas Interferências em locais de interesse histórico e cultural

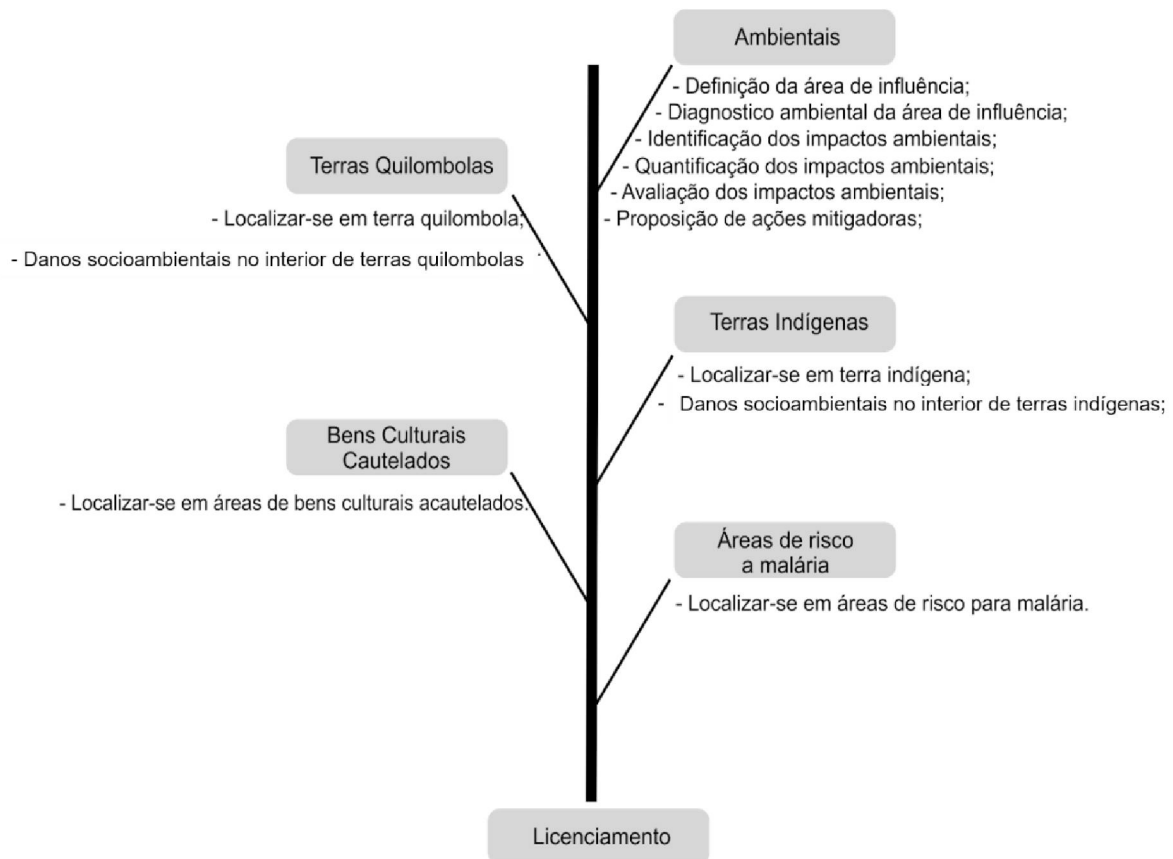
FONTE: Adaptado de Reis e Cunha (2006).

Para minimização dos impactos apresentados no QUADRO 2, as concessionárias devem seguir a legislação vigente no país (Federal, Estadual e Municipal), realizando os estudos relacionados aos impactos ambientais, sociais e de engenharia (viabilidade econômica). Em relação aos aspectos legais, cabe ressaltar

a Portaria Interministerial nº 419/2011 de 26 de outubro de 2011 que tem por função a regulamentação dos órgãos e entidades da Administração Pública Federal (Fundação Nacional do Índio (FUNAI), Fundação Cultural Palmares (FCP), Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) e o Ministério da Saúde) envolvidos no processo de licenciamento ambiental.

Segundo a Portaria nº 419/2011, as empresas devem realizar o planejamento de seus projetos considerando as restrições da área de instalação. Na FIGURA 4 são apresentados os principais componentes relacionados a construção do empreendimento que cause interferências socioambientais.

FIGURA 4 – INTERFERÊNCIAS SOCIOAMBIENTAIS



FONTE: O autor (2019).

A etapa inicial do processo de licenciamento envolve a confecção do Estudo de Impacto Ambiental (EIA), atestando a viabilidade ambiental do empreendimento a partir da publicação do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). Em paralelo com esses estudos, realiza-se uma análise da área de influência identificando possíveis áreas indígenas, quilombolas ou que apresentem bens culturais cautelados. Caso a

área apresente esses componentes, o empreendimento deverá ser adaptado para que seja minimizada (ou extinta) a interferência social, cultural e ambiental.

A Portaria nº 419/2011 também define a área de abrangência dos estudos relacionados aos componentes de restrição de acordo com a tipologia do empreendimento, conforme apresentado no QUADRO 3.

QUADRO 3 – ÁREA PARA A ANÁLISE DE INTERFERÊNCIAS

Tipologia	Área de abrangência	
	Amazônia Legal ¹	Demais Regiões
Empreendimentos lineares (exceto rodovias)		
Ferrovias	10 km	5 km
Dutos	5 km	3 km
LT	8 km	5 km
Rodovias	40 km	10 km
Empreendimentos pontuais (Portos, mineração, termoelétricas)	10 km	8 km
Aproveitamento hidrelétrico	40 km ou áreas de contribuição direta ou reservatórios acrescidos de 20 km a jusante	15 km ou área de contribuição direta ou reservatório acrescido de 20 km a jusante.

FONTE: Adaptado da Portaria Interministerial nº 419/2011 (2011).

Outro fator relevante na etapa de planejamento de LT é a liberação fundiária que consiste na realização de serviços técnicos para a definição da faixa de segurança e determinação de desapropriações para determinar a faixa de passagem para a LT. Devido a desacordos entre proprietários e concessionárias na negociação dos valores das indenizações relativos aos danos causados às propriedades, o processo de liberação fundiária pode gerar atrasos na construção do empreendimento.

Para agilizar essa etapa, pode-se utilizar da Declaração de Utilidade Pública (DUP) (Lei nº 3365, de 21 de junho de 1941) que é um ato administrativo que declara que um determinado objeto será necessário para a prestação de um serviço público. No caso da determinação de servidões de passagem para LT, segundo a Lei 9.074, de 7 de julho de 1995, fica a cargo da ANNEL determinar os contratos de concessão de uso de bem público.

O planejamento de LT também considera os requisitos técnicos, pois influenciarão nos custos e a rota do novo empreendimento. No QUADRO 4 são

¹ Entende-se por Amazônia Legal, segundo a Lei nº 12651 de 2012, os Estados do Acre, Pará, Amazonas, Roraima, Rondônia, Amapá e Mato Grosso e as regiões situadas ao norte do paralelo 13° S, dos Estados de Tocantins e Goiás, e ao norte do meridiano de 44° W, do Estado do Maranhão.

apresentados os requisitos mínimos que devem ser considerados no processo de planejamento de uma diretriz de LT apresentado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2009).

QUADRO 4 – REQUISITOS MÍNIMOS PARA LT DE ENERGIA ELÉTRICA.

Requisitos Gerais	Requisitos Específicos
Elétricos	Capacidade de corrente das fases; Capacidade de corrente dos cabos para-raios; Perda de energia; Tensão máxima operativa; Coordenação de isolamento; Isolamento para tensão máxima operativa; Isolamento para manobras; Desempenho a descargas atmosféricas; Emissão eletromagnética (corona visual, radio-interferência, ruído audível); Campo elétrico e magnético; Travessia com LT da rede elétrica existentes.
Mecânicos	Parâmetros de vento; Carga mecânica sobre os cabos; Estado de tração normal; Cargas mecânicas sobre as estruturas; Fadiga mecânica dos cabos; Fundações.
Eletromecânicos	Descargas atmosféricas; Corrosão eletrolítica; Corrosão ambiental.

FONTE: ONS (2009).

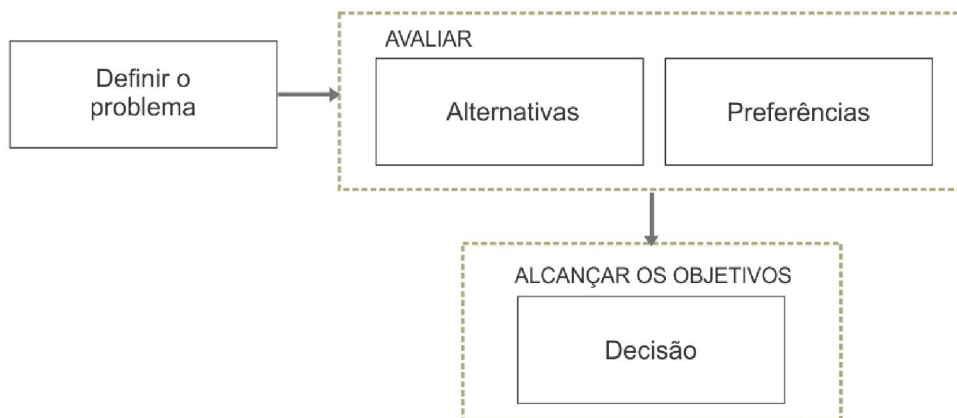
Para a definição do traçado de uma LT, os requisitos mecânicos são relevantes e devem ser desenvolvidos seguindo as diretrizes da *International Electrotechnical Commission: Loading and Strength of Overhead Transmission Lines* (IEC 60826). Como exemplos, pode-se citar a declividade do terreno ou o tipo de solo da região de implantação da LT, que estão diretamente relacionados aos custos e dimensionamento do empreendimento. Construir uma LT em um terreno que apresente uma declividade acentuada, apesar de ser tecnicamente possível, é complicado e os custos são elevados. As propriedades do solo influenciarão nos requisitos técnicos para o dimensionamento das fundações das torres, elementos que apresentam os maiores custos de construção.

Na Subseção 2.3 é discutido o processo de modelagem multicriterial.

2.3 MODELAGEM MULTICRITERIAL

Os projetos de engenharia estão sujeitos a limitações econômicas e restrições sociais e ambientais, sendo necessário a realização de um planejamento estratégico para a obtenção de um projeto eficiente (MUNIER; 2011). No processo de planejamento são considerados diferentes critérios que geralmente são conflitantes, o que torna impossível otimizá-los simultaneamente (RASMAK; AOUNI, 2014). Devido a existência desses conflitos é necessário ponderar os critérios e associá-los em um único problema, a fim de obter uma alternativa satisfatória para todas as variáveis consideradas (definição de alternativas preferencias e tomada de decisão). O processo de planejamento estratégico é ilustrado na FIGURA 5.

FIGURA 5 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO



FONTE: O autor (2019).

No contexto do planejamento e tomada de decisão, surgem os Métodos de Análise Multicritério (MAM) para auxiliar os analistas na escolha de uma solução viável. Esses métodos são divididos em duas etapas: (1) formulação de uma matriz de adequabilidade, formulada a partir da atribuição de pesos padronizados a cada critério utilizado na modelagem; e (2) formulação de um vetor de ponderação, formado a partir dos valores de prioridade associados a cada critério considerado. A matriz de adequabilidade (A) e o vetor de ponderação (w) são definidos matematicamente como segue:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1,J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I,1} & \dots & a_{I,J} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$w = [w_1, \dots, w_j] \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J w_j = 1 \quad (3)$$

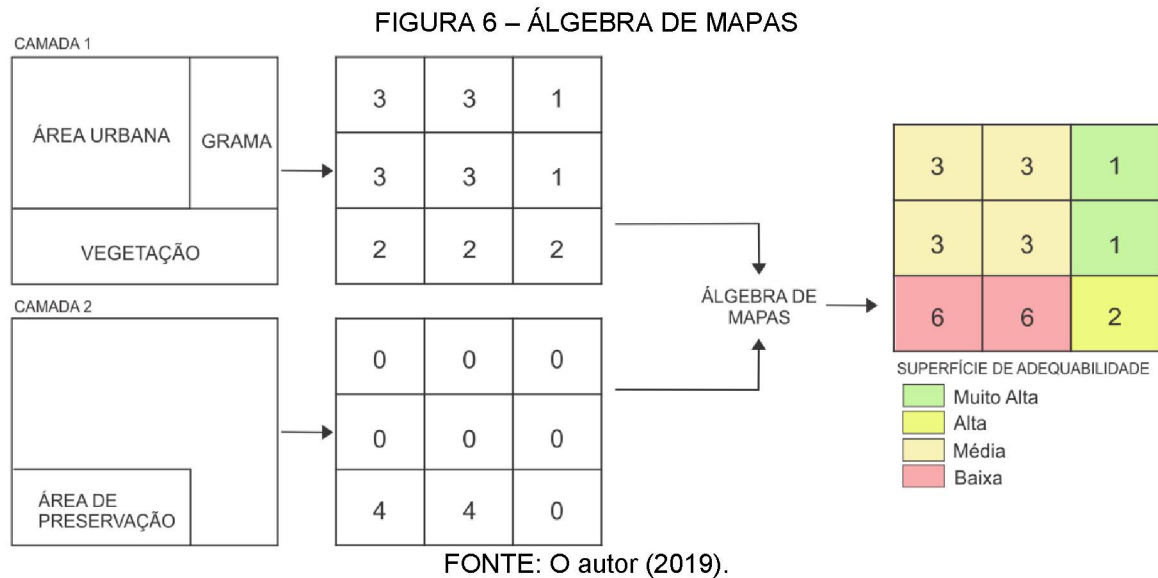
Em que α é a ponderação dos critérios, I é o conjunto de alternativas e J é o conjunto de critérios considerados na modelagem do problema. Segundo Jankowsk e Richard (1994), os MAMs frequentemente utilizados realizam a ponderação com base em comparações pareadas a partir da utilização de uma escala de ponderação e os critérios são agregados por adição. A comparação pareada é baseada no cálculo da medida de concordância entre as análises, que representa o grau de dominância de uma alternativa i sobre a alternativa j .

Segundo Jakeman et al. (2008), o processo de modelagem é realizado a partir da organização sistemática de dados, suposições, geração e compartilhamento de conhecimento para a gestão operacional ou desenvolvimento de políticas estratégicas. A modelagem é um processo científico de simplificação da realidade e podem ser utilizados para prever comportamentos e testar hipóteses acerca de uma temática específica.

A modelagem multicriterial pode ser associada a dados geográficos (modelagem espacial multicriterial), permitindo realizar múltiplas análises considerando aspectos físicos, sociais e econômicos. Com a utilização do SIG é possível aplicar operações de análise espacial e compor o cenário de estudo com a aplicação de operadores lógicos, possibilitando a determinação da solução que satisfaça as restrições físicas e quantitativas impostas pelo projeto.

Os MAMs são utilizados para reclassificar os atributos internos de uma base dados cartográfico (pontos, linhas, polígonos ou dados matriciais) a partir da aplicação de ferramentas disponibilizadas em um software SIG (JAKEMAN et al; 2008). Comumente, os processos de modelagem espacial multicriterial são organizados em matrizes, compostas por unidades mínimas de área (*pixels*) georreferenciadas e que representam uma determinada variável considerada no processo de otimização. A utilização do formato matricial simplifica o processo de ponderação, bem como o cruzamento dos diferentes planos de informação utilizados para a construção do

modelo espacial de adequabilidade relativo a um determinado tema, como ilustrado na FIGURA 6.



No exemplo da FIGURA 6, observa-se que são utilizadas duas camadas de informação, organizadas em formato matricial. Existem 4 variáveis cartográficas (área urbana, grama, vegetação e áreas de preservação ambiental) associadas aos pixels das bases matriciais, representadas quantitativamente a partir das ponderações realizadas por analistas. A associação das camadas em uma única superfície (S) (denominada de superfície de adequabilidade) é realizada a partir do processo de álgebra de mapas (utilização de um conjunto de operadores matemáticos para a manipulação de campos geográficos). No caso da construção da superfície de adequabilidade, utiliza-se frequentemente a combinação linear ponderada, como segue:

$$S = \sum_{1}^{n} w_i x_i \quad (4)$$

Em que w_i é o peso atribuído a variável cartográfica i , x_i o valor normalizado para a mesma variável e n o número de variáveis utilizadas no processo de construção da superfície de adequabilidade. Na Subseção 2.3.1 são apresentados os MAMs frequentemente utilizados no processo de modelagem espacial multicriterial.

2.3.1 Métodos de Análise Multicritério

Dentre os MAMs, no processo de modelagem multicriterial espacial, destacam-se os seguintes métodos: o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (SAATY, 1980), o método ELECTRE (*Elimination et Choix Traudisant la Réalité*) (ROY; 1968), e o método PROMETHEE (BRANS, VINCKE; 1985) (*Preference Ranking Organization Method Enrichment Evaluations*). Esses métodos são descritos nas Subseções 2.3.1.1, 2.3.1.2, 2.3.1.3 e 2.3.1.4, respectivamente.

2.3.1.1 AHP

O AHP é um método de fácil implementação e entendimento, pois estrutura o problema de otimização em uma hierarquia de importância a partir da realização de comparações pareadas e possibilita a análise da consistência das ponderações atribuídas a cada critério pelo analista, sendo um MAM largamente utilizado no processo de modelagem espacial multicriterial. O processo de ponderação ocorre através da aplicação da escala fundamental de Saaty (1980) (apresentada na TABELA 2, Subseção 3.2.2.1). Os valores das ponderações são alocados em uma matriz de comparação (A), conforme apresentada na EQUAÇÃO 1. A principal vantagem da aplicação deste método é a possibilidade de se calcular o índice de consistência ($IC \leq 0,10$) entre as ponderações atribuídas a cada alternativa considerada, o que possibilita confirmar a consistência do processo de ponderação.

Neste trabalho o método AHP foi aplicado no processo de modelagem espacial multicriterial e é apresentado com maiores detalhes na Subseção 3.2.2.1.

2.3.1.2 ELECTRE I

O método ELECTRE I tem como objetivo reduzir o tamanho do conjunto de alternativas, explorando o conceito de dominância. A aplicação deste método consiste na definição de dois índices: (1) concordância ($C_{(t,b)}$) (mede a vantagem relativa de uma alternativa (t) em relação a uma alternativa (b), dado pela EQUAÇÃO 5) e; (2) discordância ($D_{(t,b)}$) (mede a desvantagem relativa de t em relação a b , dado pela EQUAÇÃO 6) (POHEKAR, RAMACHANDRAN; 2003).

$$C_{(t,b)} = \sum_{\{j:h_j(t) \geq h_j(b)\}} w_j \quad (5)$$

$$D_{(t,b)} = \max_{\{j:h_j(t) < h_j(b)\}} \{h_j(b) - h_j(t)\} \quad (6)$$

Em que $h_j(t)$ é a vantagem relativa da alternativa t no critério j , $h_j(b)$ é a vantagem relativa da alternativa b no critério j e w_j é o peso normalizado do critério j . O estabelecimento das relações de ponderação entre as alternativas é realizada a partir da definição de um limiar de concordância (ρ) e de discordância (ω), e são organizadas em uma matriz s (em que os elementos que a compõem serão 0 ou 1). As relações de sobreclassificação são estabelecidas como segue:

$$tsb \text{ se somente se } \begin{cases} C(t,b) \geq \rho \\ D(t,b) \leq \omega \end{cases} \quad (7)$$

Quando $\omega = 0$, indica que não existe discordância entre as alternativas e quando $\rho = 1$, indica que existe concordância plena entre as alternativas. Existem várias ramificações do método ELECTRE I que não serão abordadas neste trabalho, maiores informações podem ser adquiridas em Bouyssou et al. (2006).

2.3.1.3 PROMETHEE I

O método PROMETHEE I é considerado uma ramificação do ELECTRE I que organiza os critérios a partir de um ranking em graus de preferência realizado a partir da identificação de uma função de preferência entre pares de critérios. Segundo Brans e Vincke (1985), o método consiste na construção de relações binárias entre alternativas em análise, atribuindo a cada critério um peso relativo a sua importância no processo de otimização a partir de uma função de preferência $P_j(t,b)$ que é uma função da diferença d_j entre duas alternativas para qualquer critério j, i considerado, em que $d_j = f(t,j) - f(b,j)$ e $f(t,j)$ e $f(b,j)$ são valores atribuídos as alternativas t e b para o critério j . Segundo Pohekar e Ramachandran (2003), os valores de preferencias $\pi(t,b)$ é definida conforme EQUAÇÃO 8:

$$\pi(t, b) = \frac{\sum_{j=1}^J w_j P_j(t, b)}{\sum_{j=1}^J w_j} \quad (8)$$

Em que J é o número de critérios e w_j é o peso para o critério j .

Destaca-se que em um conjunto de alternativas (T), para cada alternativa, dois índices são calculados: (1) índice de fluxo positivo (Φ^+) (Equação 9) e; (2) índice de fluxo negativo (Φ^-) (EQUAÇÃO 10).

$$\Phi^+(t) = \sum_T \pi(t, b) \quad (9)$$

$$\Phi^-(t) = \sum_T \pi(b, t) \quad (10)$$

A grandeza $\Phi^+(t)$ representa o quanto a alternativa t supera todas as demais pertencentes ao conjunto T ; e $\Phi^-(t)$ indica quanto t é superada pelas demais alternativas pertencentes a T . Uma alternativa t supera uma alternativa b , se o fluxo líquido de t ($\Phi(t) = \Phi^+(t) - \Phi^-(t)$) for maior que o fluxo de b . Caso $\Phi(t) = \Phi(b)$, então t é indiferente a b . Como para o método ELECTRE I, existem várias ramificações do método PROMETHEE I que não serão abordadas neste trabalho, maiores informações podem ser adquiridas em Bouyssou et al. (2006).

Na Subseção 2.4 é apresentado o processo de otimização do traçado de LT de energia elétrica, baseado em modelagem espacial multicriterial.

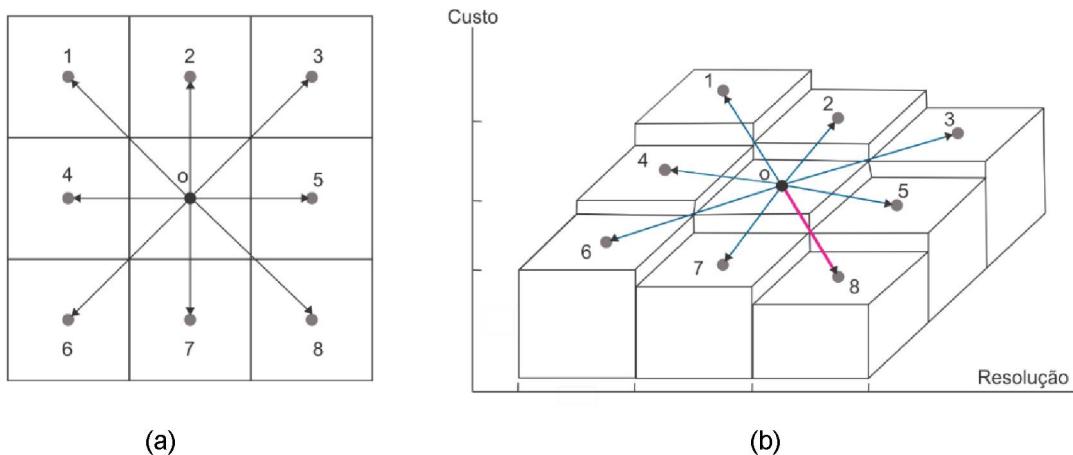
2.4 OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADOS DE LT

O processo de otimização do traçado de diretrizes de LT utilizando modelagem espacial multicriterial é tratado como um problema de otimização em rede de caminho mínimo. Segundo Longley et al. (2013) em uma estrutura de rede, definido uma origem e um destino, o problema de caminho mínimo consiste em minimizar a distância ou alguma outra medida baseada na distância, como tempo ou custos de deslocamento. Esse problema pode ser organizado em uma estrutura matemática denominada de

grafo $G = (V, L)$, composto por dois conjuntos finitos $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ e $L = \{a_1, \dots, a_n\}$, cujos elementos são definidos como vértices e arestas, respectivamente.

No caso da modelagem espacial multicriterial, o grafo é construído com base em uma superfície de adequabilidade organizada em uma base matricial em que cada pixel que a compõe é associado a um peso atribuído aos critérios utilizados no processo de otimização. Ao centroide de cada célula desta superfície é atribuído um vértice do grafo, o qual é interligado (pelas arestas) aos seus oito vértices diretamente adjacentes (FIGURA 7a). A ponderação das arestas é realizada a partir do cálculo da média entre os pesos atribuídos a dois pixels vizinhos multiplicada pela resolução espacial do modelo (aos vizinhos diagonais, a média entre os dois *pixels* é multiplicada por $\sqrt{2}$).

FIGURA 7 – RELAÇÃO ENTRE AS CÉLULAS DA BASE MATRICIAL



FONTE: O autor (2019).

O grafo ponderado é denominado de superfície de custo acumulado, sobre a qual é possível calcular o custo de atravessamento do empreendimento a partir de algoritmos de otimização. Na FIGURA 7b é exemplificado o processo de definição de caminho mínimo, pode-se observar que o vértice 0 (origem) é conectado com os seus 8 vértices vizinhos (vértices de análise) por arestas ponderadas (custo de atravessamento). A aresta que apresentar o menor valor de ponderação (no exemplo em questão, linha em rosa) será denominada como preferencial e definida como parte do traçado final. O vértice de análise diretamente conectado pela aresta selecionada é definido como a nova origem (vértice 8) e são analisados os seus 8 vértices vizinhos. Esse processo é repetido até que se atinja o vértice definido como ponto de parada.

Na subseção 2.4.1 é apresentada a formulação do problema de caminho mínimo.

2.4.1 Problema de caminho mínimo

Dado um grafo $G = (V, L)$ com origem em $s \in V$ e destino $d \in V$ em que cada aresta está associado a um valor (c_{ij}) que se refere ao custo de atravessamento do vértice $i \in V$ para o vértice $j \in V$. Seja c_p o custo de atravessamento de s para d e P o conjunto de todos os caminhos possíveis de s até d no grafo G , a aplicação de algoritmos de definição de caminho mínimo visa determinar a rota otimizada ($r \in P$) que gere o menor custo acumulado, de modo que $c_p \leq c_t$ para todo $t \in P$. Esse processo é formulado como um Problema de Otimização Combinatória (POC), como segue (CARAMAIA, DELL'OLMO, 2008):

$$\min\{c_p: r \in P\} \quad (11)$$

Em casos que não existam ciclos de comprimentos negativos, o problema ainda pode ser formulado como de Programação Linear Inteira (PLI), como segue:

$$\min \sum_{(i,j) \in V} c_{ij} x_{ij} \quad (12)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j:(s,j) \in V} x_{sj} = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{j:j,(t) \in V} x_{jt} = 1 \quad (14)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in V} x_{ij} - \sum_{k:(i,j) \in V} x_{jk} = 0, \forall j \in V - \{s, t\} \quad (15)$$

Em que,

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } L(i, j) \text{ pertence ao caminho,} \\ 0, & \text{se } L(i, j) \text{ não pertence ao caminho} \end{cases} \quad \forall (i, j) \in L$$

Com a organização do problema em uma estrutura de grafos, aplica-se algoritmos para a resolução do problema de caminho mínimo. Na Subseção 2.4.2 é apresentado o algoritmo de Dijkstra (1959).

2.4.2 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo de Dijkstra (1959) se aplica em grafos orientados ou não. Admite que todas as arestas possuem pesos não negativos e é suposto que exista pelo menos um caminho entre o ponto de partida e de destino. Seja c_i o menor custo de atravessamento do vértice de origem s ao vértice i , e define-se $c_{ij} (\geq 0)$ como o custo de atravessamento da aresta (i, j) , o algoritmo define o rótulo para o vértice posterior, j , como (TAHA, 2008):

$$[c_j, j] = [c_i + c_{ij}, j], c_{ij} \geq 0 \quad (16)$$

Para a definição do caminho otimizado o algoritmo de Dijkstra (1959) se baseia no processo de rotulação dos vértices. O rótulo inicial será definido como $[0, -]$, indicando que não existe um vértice predecessor ao vértice raiz (s). Aos demais vértices são classificados de vértices temporários. Ao vértice que apresentar a aresta com o menor custo de atravessamento (c_{ij}) é rotulado como vértice permanente.

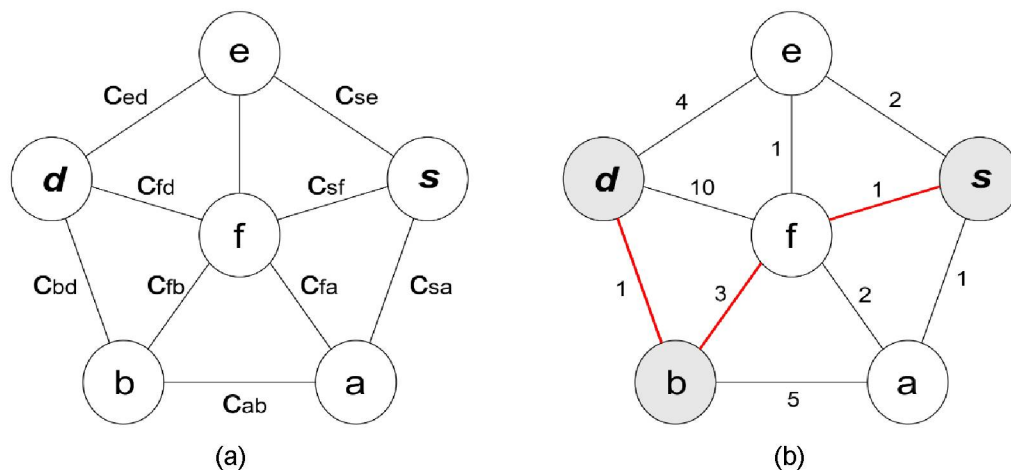
Segundo Taha (2008), o algoritmo de Dijkstra (1959) é dividido em três etapas:

- a) Rotula o vértice de origem (s) como rotulo permanente $[0, -]$. Determina $i = 1$;
- b) Calcula os rótulos temporários $[c_i + c_{ij}, j]$ para cada vértice j imediatamente adjacente ao vértice i e rotulado como temporário. Caso o vértice j estiver rotulado com $[c_j, k]$, passando por um outro vértice k e se $c_i + c_{ij} < c_j$, substitui $[c_j, k]$ por $[c_i + c_{ij}, j]$. Os empates são resolvidos arbitrariamente.

c) O algoritmo encerra o processo iterativo quando todos os vértices forem rotulados como permanentes. Caso contrário, o algoritmo seleciona $[c_r, s]$, cujo custo de atravessamento (c_r) é o mínimo entre todos os vértices rotulados como temporários. Determina $i = r$ e repete a etapa i .

Para exemplificação, pode-se observar a FIGURA 8. Busca-se definir o caminho mínimo entre o vértice s (origem) e o vértice d (destino). A cada aresta que liga dois vértices adjacentes são definidos os custos de atravessamento (FIGURA 8a).

FIGURA 8 – EXEMPLO DE UM GRAFO COM FUNÇÃO DE CUSTO SOBRE AS ARESTAS (a) CONSTRUÇÃO DO GRAFO (b) DEFINIÇÃO DO TRAÇADO OTIMIZADO.



FONTE: O autor (2018).

Na primeira iteração o algoritmo designa o rótulo permanente $[0, -]$ a s . Na segunda iteração os vértices a , e e f são rotulados como temporários e são analisados os valores associados as arestas c_{sa} , c_{se} e c_{sf} . Para os três vértices temporários, f apresenta o menor custo de atravessamento, assim o rótulo de f muda para permanente (FIGURA 8b). Com base no vértice f os vértices e , b e d podem ser alcançados e são classificados como temporários. Esse processo se repete até que o vértice de destino (d) seja atingido finalizando o processo de otimização. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e método proposto neste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODO

No Capítulo 2 foram apresentadas as características do SIN, os aspectos do processo de planejamento do traçado e de otimização do traçado de diretrizes LT, além da apresentação geral dos métodos de análise multicritério e do estado da arte relacionado ao tema desta pesquisa. Neste Capítulo são apresentados os materiais (Subseção 3.1) e o método (Subseção 3.2) utilizado para a definição do traçado automático da diretriz de LT.

3.1 MATERIAIS

Para a realização dos experimentos foi utilizado um Microcomputador desktop com processador Intel Core TM 2 Quad, 2Gb de Ram e 260 Gb de espaço em disco. Foram utilizados os softwares gratuitos e de código aberto QGIS 2.18.27 e GRASS 7.4.2, o sistema operacional Ubuntu OSGeoLive 12.0 e a biblioteca GDAL 2.0. Na Subseção 3.1.1 são apresentados os dados utilizados para a realização do experimento.

3.1.1 Dados

Todos os dados utilizados neste trabalho (QUADRO 5) foram adquiridos por meio de órgãos públicos disponibilizados gratuitamente em plataformas *online*. Os dados adquiridos em formato vetorial foram convertidos para o formato matricial para possibilitar a realização do processo de álgebra de mapas. Como as escalas dos dados não são iguais, necessitou-se compatibilizar todos os dados para uma escala coincidente sendo reamostrados para a escala menos detalhada dentre os insumos utilizados (1:180000). Os critérios considerados foram divididos em três grupos: ambiental, econômico e social. Foi utilizado o sistema de coordenadas no Fuso 22 S da Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000).

QUADRO 5 - CRITÉRIOS CONSIDERADOS NO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Grupo	Critérios	Escala	Formato
Ambiental	Unidades de conservação	Não informado	Vetorial
	Remanescentes florestais	1:40000	Vetorial
	Áreas de proteção ambiental	1:40000	Vetorial
	Terras indígenas/Quilombolas	Não informado	Vetorial
Social	Áreas urbanas e periurbanas ²	1:60000	Matricial
	Assentamentos	Não informado	Vetorial
	Impacto visual da paisagem ²	1:60000	Matricial
	Fragmentação da agricultura ²	1:60000	Matricial
Econômico	Áreas alagadas ²	1:60000	Matricial
	Declividade	1:60000	Matricial
	Paralelismo com outros empreendimentos lineares	1:180000	Vetorial
	Mapa de velocidade de vento	1:180000	Matricial

FONTE: O autor (2018).

Na Subseção 3.1.2 são descritos os critérios de otimização utilizados neste trabalho.

3.1.2 Critérios de otimização

Os critérios utilizados neste trabalho foram divididos em três grupos: social, ambiental e econômico, apresentados, respectivamente, nas Subseções 3.2.2.1, 3.2.2.2 e 3.2.2.3.

3.1.2.1 Social

Os critérios sociais dizem respeito a como o empreendimento pode afetar a população residente na área de influência do empreendimento. A construção de uma nova LT causa poluição visual (GRASSI et al., 2014), desvalorização dos imóveis, riscos à saúde da população mais próxima do empreendimento (BAGLI et al., 2011) e a necessidade de desapropriações de áreas agrícolas e residenciais. Todos esses fatores causam custos monetários a concessionária e resistência da população em relação a instalação do empreendimento no local. Neste trabalho, foram considerados quatro critérios sociais: áreas urbanas e periurbanas, assentamentos, impacto visual

² Critérios obtidos a partir da classificação supervisionada de imagens de satélite (*Landsat 8*)

da paisagem e fragmentação da agricultura. Os critérios de áreas urbanas e periurbanas e impacto visual da paisagem estão relacionadas a distância em relação a população residente na área de influência do empreendimento. Esses critérios foram obtidos a partir da realização da classificação supervisionada de imagens de satélite *Landsat 8* obtidas no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2018). A redor de cada mancha urbana identificada foi realizado um *buffer* de 360 m de diâmetro, dividido em 4 subcritérios (de 90 m em 90 m). Quanto mais próximo de ambientes construídos menor é a adequabilidade da região para a instalação de uma LT de energia elétrica, sendo considerado como critério de repulsão. O critério assentamento, obtido no site do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA, 2018), também foi considerado como área de repulsão.

3.1.2.2 Ambiental

Os critérios ambientais são definidos para a realização de um desenvolvimento sustentável. Inclui políticas de mitigação de interferência no meio ambiente, preservando a fauna e a flora da região. A Portaria nº 421, de 26 de outubro de 2011 estabelece as diretrizes gerais para o licenciamento e a regularização ambiental federal dos sistemas de transmissão de energia elétrica. Segundo essa portaria, os empreendimentos considerados de impacto significativos deverão realizar estudos de impacto ambiental e deverá ser requerida a Autorização para a Supressão de Vegetação (ASV) juntamente com a licença de instalação emitida pelo IBAMA após apresentação da declaração de utilidade pública (DUP), quando for necessário. Além disso, áreas de preservação ambiental, quilombolas, indígenas, devem ser evitadas. Para buscar a minimização desses impactos, neste trabalho foram considerados 3 critérios de caráter ambiental: remanescentes florestais (IAP, 2018), áreas de preservação ambiental (IAP, 2018), quilombolas e indígenas (INCRA, 2018).

3.1.2.3 Econômico

Os critérios econômicos estão relacionados aos custos de construção da rede e podem ser entendidos em duas partes: (1) elétricos e eletromagnéticos e (2) mecânicos. Neste trabalho serão abordados somente os mecânicos, uma vez que são os critérios que exercem influência na definição do traçado de diretrizes de LT de

energia elétrica. Nesta perspectiva a declividade deve ser considerada, pois a instalação de LT em terrenos irregulares podem aumentar os custos de construção das torres e suas fundações. O mapa de declividade foi construído com base nos dados do projeto Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), obtido no site da Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA) (MIRANDA, 2005).

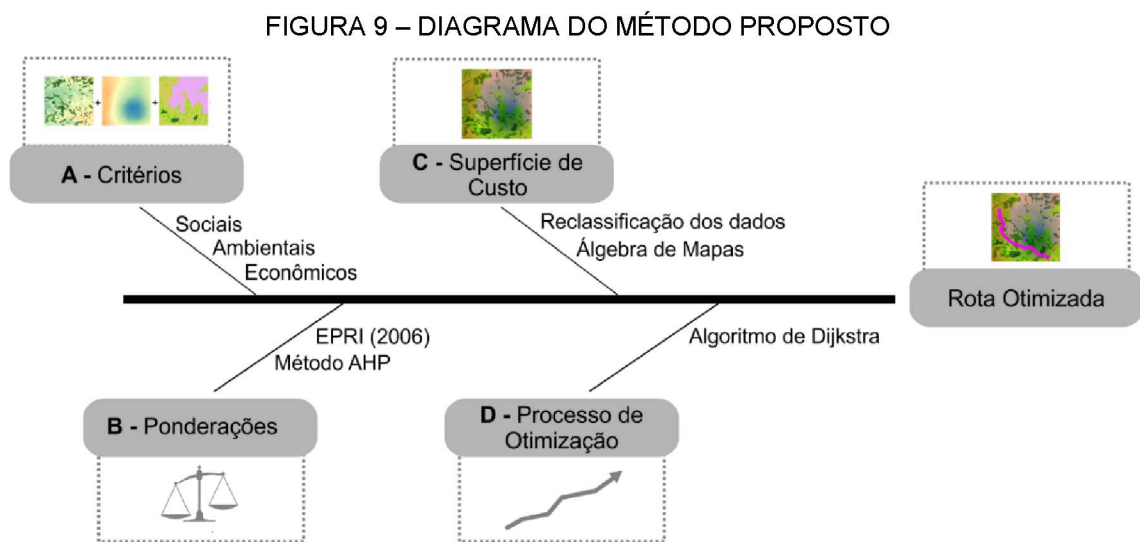
Segundo a portaria nº 421, de 26 de outubro de 2011, o desenvolvimento de LT ao longo da faixa de domínio de rodovias, ferrovias, LT já instaladas, ainda que situadas em território quilombola, indígena ou em unidade de conservação é considerado de pequeno potencial de impacto ambiental, diminuindo os custos associados a estudos de impacto ambiental, ações mitigadoras, desapropriações e aberturas de novas vias para acesso ao local de construção. Nesse aspecto, as áreas paralelas a empreendimentos lineares foram consideradas como adequadas para a instalação de uma nova LT. Foram utilizados dois conjuntos de dados: LT existentes (EPE, 2018b) e rodovias (DNIT, 2018).

Além desses critérios, neste trabalho foi proposto a utilização de dados relacionados a velocidade de vento da região de implantação do empreendimento, considerando adequadas as regiões que apresentem velocidades médias maiores. Esse critério é importante uma vez que a temperatura dos condutores das LT deve ser considerada para que a capacidade máxima de condução de corrente elétrica (ampacidade) das instalações não ultrapasse a temperatura limite de projeto, comprometendo a segurança do empreendimento. Segundo Castilho (2010), elementos ambientais como a velocidade do vento auxiliam no processo de dissipação de calor e resfriamento dos componentes elétricos.

O modelo de velocidade de vento média utilizado para a região de estudo foi obtido pela utilização do software desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (WindNinja). Para a construção do campo de vento foi inserido no software o MDT e o modelo climático de mesoescala obtido no site do Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos (*National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) – (<https://www.noaa.gov/>)). A Na Subseção 3.2 é apresentado o método proposto neste trabalho.

3.2 MÉTODO

O método proposto está dividido em 4 tarefas, como ilustrado na FIGURA 9. Primeiramente foram definidos os critérios a serem otimizados no processo de definição do traçado de diretriz de LT (Etapa A). A identificação de áreas adequadas foi realizada a partir da aplicação do sistema de ponderação proposto por EPRI (2006) nas subclasses dos critérios utilizados. O método AHP (SAATY, 1980) foi aplicado para definir o grau de importância de cada critério na participação do processo de otimização (Etapa B). O software QGIS 2.18.27 e o GRASS 7.4.2 foram utilizados na Etapa (C) para a realização da reclassificação dos dados de acordo com os pesos obtidos na Etapa B, bem como a construção da superfície de adequabilidade a partir da aplicação de álgebra de mapas. Finalmente o algoritmo de Dijkstra (1959) é aplicado (Etapa D) para a determinação da rota otimizada.



FONTE: O autor (2019).

Na Subseção 3.2.1 são apresentados os critérios de otimização utilizados neste trabalho.

3.2.1 Estratégia de otimização

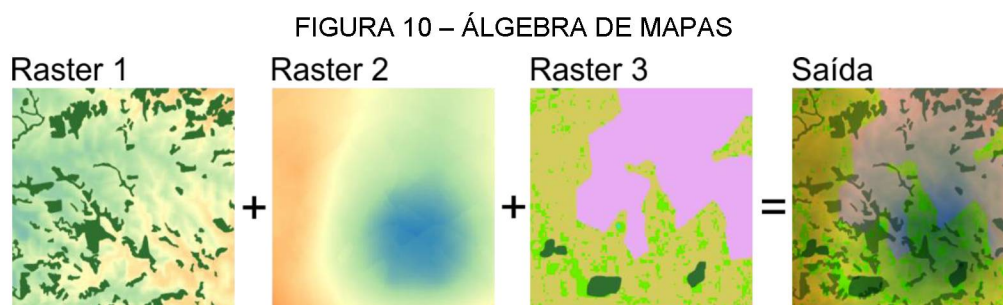
O modelo matemático de otimização considera um espaço de busca discreto sobre uma superfície de custo construída em formato matricial (*raster*). Cada célula dessa superfície representa um valor relacionado a um determinado local, no caso da

otimização de diretrizes de LT de energia elétrica são representados os custos de atravessamento pelo empreendimento. Esse processo é realizado a partir da combinação de dados geográficos (critérios) e MAM para auxiliar no processo de identificação da alternativa ideal e otimização do problema.

Segundo Aissi et al. (2012), isso permite modelar o problema em relação a um conceito particular de otimização, em que a aplicação de MAM permite avaliar uma alternativa (θ) em relação a um critério g_i , sendo denotado por $g_i(\theta)$. Nesse processo, cada critério é representado por um conjunto de células (U_i) quantificadas a partir de uma escala (ε_i) de avaliação e associado a uma camada (m_i), em que m_i é o conjunto $\{(s, g_i(s)): s \in U_i\}$, em que:

$$g : \begin{array}{l} U_i \rightarrow \varepsilon_i \\ s \rightarrow g_i(s) \end{array} \quad (17)$$

Caso o problema de otimização apresente um conjunto de camadas relacionadas a diferentes critérios, é necessário combiná-las em uma única superfície denominada de superfície de adequabilidade. Neste trabalho foi utilizado o processo de álgebra de mapas que consiste na combinação célula-a-célula de diferentes camadas de dados matriciais, empilhadas umas sobre as outras a partir da aplicação de uma função matemática, como ilustrado na FIGURA 10. O valor gerado na superfície de saída é uma função dos valores da célula na mesma localização nas camadas de entrada.



FONTE: O autor (2019).

Associado ao processo de álgebra de mapas foi aplicada uma escala de ponderação para quantificar os critérios (camadas) em uma escala de adequabilidade relacionada ao processo de definição do traçado de diretrizes de LT de energia

elétrica. Foram utilizadas as escalas de ponderação propostas por EPRI (2006) para a quantificação dos subcritérios de cada camada considerada no processo de modelagem espacial multicriterial combinada com o método AHP, utilizado para quantificar cada critério em relação a sua adequabilidade para a instalação de uma LT de energia elétrica. A metodologia empregada para a ponderação dos critérios é apresentada na Subseção 3.2.2.

3.2.2 Ponderação dos critérios

O processo de ponderação dos critérios foi dividido em duas etapas. Primeiramente foi aplicado uma escala de ponderação proposto por EPRI (2006) para identificar áreas adequadas à definição de diretrizes de LT de energia elétrica. Os valores para a ponderação variam de 1 a 9. O valor 1 indica áreas com maior adequação e 9 áreas inadequadas para a instalação de uma nova LT de energia elétrica. Segundo EPRI (2006), os valores de adequação podem ser atribuídos conforme apresentado na TABELA 1.

TABELA 1 – ESCALA DE PONDERAÇÃO

Adequação	Escala	Explicação
Áreas com alta adequação	1 a 3	Áreas que não apresentam nenhum tipo de restrição, como exemplo, pastagem e áreas paralelas a empreendimentos lineares existentes.
Áreas com média adequação	4 a 6	Áreas que apresentam restrições moderadas a implantação e operação de uma LT de energia elétrica. Geralmente necessita-se da aplicação de medidas mitigadoras.
Áreas com baixa adequação	7 a 9	Áreas que apresentam restrições significativas de construção de uma LT de energia elétrica. A construção de uma LT nessas áreas exige medidas específicas e apresentam custos elevados, a exemplo, pode-se citar áreas alagadas, de preservação ambiental e densamente povoadas.

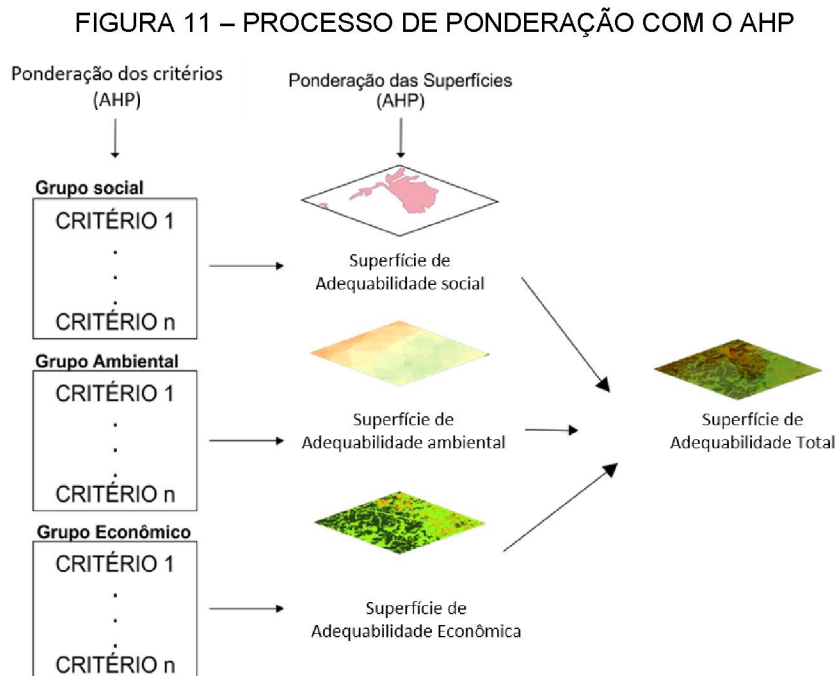
FONTE: Adaptado EPRI (2006).

Esse sistema de ponderação foi utilizado para realizar a reclassificação dos subcritérios utilizados para a otimização do traçado de LT de energia elétrica. Uma vez que os subcritérios foram reclassificados, utilizou-se o método AHP para definir uma escala de adequabilidade dos critérios (relativa aos custos gerados pelo atravessamento do empreendimento) no processo de definição de diretrizes de

traçado de LT de energia elétrica, bem como a ponderação de cada grupo considerado neste trabalho (social, ambiental e econômico). O processo de ponderação com o método AHP é apresentado na Subseção 3.2.2.1.

3.2.2.1 Aplicação do Método AHP

O método AHP reduz o problema em uma série de comparações entre pares, e depois sintetiza os resultados. A vantagem do método é a possibilidade de analisar variáveis quantitativas e qualitativas, além de possibilitar a verificação da consistência das avaliações. Neste trabalho o AHP foi aplicado para a definição dos pesos relacionados a cada critério que compõem um grupo (social, ambiental e econômico), bem como a ponderação das 3 superfícies de custo consideradas neste trabalho, como ilustrado na FIGURA 11.



FONTE: O autor (2019).

A aplicação do método AHP é realizado em duas etapas, como segue:

1) Cálculo do vetor dos pesos:

O cálculo dos pesos para os diferentes critérios é realizado a partir da criação de uma matriz A de comparação pareada de dimensão $m \times m$, em que m é o número

de critérios a ser avaliados. Cada componente de A (a_{ij}) representa a importância do critério j em relação ao critério i . Caso $a_{ij} > 1$, então critério j apresenta importância superior ao critério i , caso contrário, i apresentará maior relevância no processo de otimização e então $a_{ij} < 1$. Se os critérios j e i apresentarem importâncias equivalentes, então $a_{ij} = 1$. A análise da adequabilidade dos critérios é realizada a partir de uma escala numérica que varia de 1 a 9 (TABELA 2) proposta por Saaty (1980) e deverá ser atribuída na matriz de comparação A de acordo com as concepções do analista acerca do problema de otimização.

TABELA 2 – ESCALA DE PONDERAÇÃO MÉTODO AHP

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas variáveis contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

FONTE: SAATY (1980).

Para atribuir e interpretar os pesos relativos a cada critério, segundo Saaty (1980) é necessário normalizar a matriz A , fazendo-se igual a 1 a soma de cada coluna da matriz de comparação. Esse processo é realizado pela divisão de cada elemento de A pelo somatório dos valores da coluna que pertença, como segue:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{l=1}^m a_{il}} \quad (18)$$

A determinação da contribuição de cada critério no processo de otimização é calculada a partir do vetor de prioridade (w) que apresenta os pesos relativos entre os critérios e é obtido pela média dos valores apresentados em cada linha da matriz de comparação normalizada, como apresentado na EQUAÇÃO 19:

$$w = \frac{\sum_{l=1}^m \bar{a}_{il}}{m} \quad (19)$$

2) Avaliação da consistência:

Quando o processo de otimização envolver muitos critérios, inconsistências podem ser inseridas no processo de ponderação. O método AHP incorpora uma técnica para certificar que a consistência das avaliações realizadas pelo analista para a construção da matriz de comparação é adequada. A técnica consiste em calcular o índice de consistência (CI), conforme EQUAÇÃO 20.

$$CI = \frac{x - m}{m - 1} \quad (20)$$

Em que x é o somatório do produto de cada elemento do vetor de prioridade pelo total da respectiva coluna da matriz comparativa (A) e m o número de critérios avaliados. Ainda, para verificar se o índice de consistência encontrado é adequado, Saaty (1980) propôs a taxa de consistência (CR), determinada pela razão entre o valor do CI e o índice de consistência aleatória (RI) (EQUAÇÃO 21).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (21)$$

Consideram-se adequadas as ponderações quando $CR \leq 0,10$. O valor da RI tem como base o número ($m \leq 10$) de critérios avaliados. Os valores de RI são apresentados na TABELA 3.

TABELA 3 – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIA

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>RI</i>	0,00	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

FONTE: SAATY (1980).

O objetivo da aplicação das escalas de ponderação é avaliar a adequação de cada célula da grade matricial para a instalação de uma LT em que a cada pixel é atribuído um nível de adequação em uma escala ordinal. Com o processo de ponderação realizado, inicia-se a construção da superfície de adequabilidade, como descrito na Subseção 3.2.3.

3.2.3 Construção da superfície de adequabilidade

A partir dos critérios ponderados inicia-se o processo de construção da superfície de adequabilidade, que é realizado pela soma ponderada das camadas intermediárias, como segue:

$$c_x = \sum_{i=1}^n w_i \cdot c_{ix} \quad c_x \geq 1 \quad (22)$$

Na EQUAÇÃO 22, c_{ix} indica o custo associado a camada i causado pelo atravessamento da LT na localização x e w_i corresponde ao peso atribuído a camada i . A superfície resultante foi definida em uma base matricial com resolução espacial de 100 m (dentre os dados utilizados, a pior resolução espacial encontrada). A superfície de custo discreto é o dado principal para a definição do traçado otimizado da LT, como descrito na Subseção 3.2.4.

3.2.4 Definição do traçado otimizado

Com a modelagem da superfície de adequabilidade (Subseção 3.2.3) em uma grade matricial $N \times M$ e resolução espacial de 100 m, inicia-se o processo de otimização do traçado da diretriz da LT de energia elétrica. Nessa etapa é calculado o custo acumulado de cada célula a partir de um ponto de partida (início do traçado) até o ponto de destino, ou seja, a partir da definição de um ponto s (ponto inicial do trajeto) e de um ponto d (ponto final do trajeto) a superfície de adequabilidade é discretizada em um grafo ponderado e não direcionado $G = (V, L)$, modelando todos os caminhos possíveis entre os pontos $s \in V$ e $d \in V$. O conjunto de vértices (V) de G consiste nos centros de cada célula da superfície de adequabilidade, como segue:

$$v_{i,j} \in V \subseteq \mathbb{R}^2, i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, M\}, \quad (23)$$

O conjunto de arestas (L) denotam as relações existentes entre vértices vizinhos (as arestas relacionam cada vértice com seus oito vértices vizinhos) e consiste:

$$a_{i,j,k,l} = \{v_{i,j}, v_{k,l}\} | v_{i,j}, v_{k,l} \in V, |K - 1| = 1 \vee |l - j| = 1 \} \quad (24)$$

As arestas ($a \in L$) de G são ponderadas com um peso positivo ($w(a)$ - custo médio de atravessamento pelo empreendimento entre dois pixels vizinhos multiplicado pela resolução do modelo espacial). O caminho em G é uma sequência de arestas (a_1, \dots, a_k) (BACHMANN, 2018), tal que:

$$|a_i \cap a_{i+1}| = 1$$

Em que $1 \leq i \leq k - 1$

(25)

Segundo Bachmann (2018), dentro do conjunto (β) de caminhos possíveis entre os pontos $s = v_{i,j}$ e $d = v_{k,l}$ com $i, k \in \{1, \dots, N\}$ e $j, l \in \{1, \dots, M\}$, o custo ($c(r)$) de um caminho $r \in \beta$ é definido pela EQUAÇÃO 26:

$$c(r) = \sum_{a \in r} w(a) \quad (26)$$

No processo de otimização de diretrizes de LT os pesos são associados de acordo com o custo de atravessamento da célula da grade matricial pelo empreendimento. A rota ideal para o traçado será aquela que apresentar menores custos de atravessamento, isto é, determinar $p \in \beta$, tal que $c(p) \leq c(q)$, para todo $q \in \beta$. Neste trabalho, o processo de otimização consiste em minimizar a função objetivo apresentada na EQUAÇÃO 27, como segue:

$$\min z = \sum_{\substack{\text{para todas as} \\ \text{arestas definidas } (i,j)}} w_{ij}x_{ij} \quad (27)$$

Em que:

$$x_{ij} = \text{quantidade de fluxo na aresta } (i, j) \\ \begin{cases} 1, \text{ se a aresta } (i, j) \text{ for o mínimo;} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Para solucionar o problema foi aplicado o algoritmo de Dijkstra (1959), como descrito na Subseção 2.4.2. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta.

4 EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta Seção descreve os experimentos realizados e discute os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta. Para avaliar o método foram realizados dois estudos de caso no estado do Paraná, sendo escolhidas áreas que apresentassem LT existente: (1) Cenário 1 – LT 530 kv que liga a Subestação (SE) de Sarandi (SDI) à SE de Londrina (LNA); e (2) Cenário 2 – LT 230 kv que liga a SE Figueira (FRA) à SE de Ponta Grossa Norte (PGN). Para a validação, os resultados foram confrontados com o traçado da LT de energia elétrica existente e instalada na área de estudo. Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia são apresentados para os Cenários 1 e 2, respectivamente, nas Subseções 4.1.2 e 4.1.3.

4.1 EXPERIMENTOS

4.1.1 Processo de modelagem espacial multicriterial

O primeiro passo para a realização da modelagem espacial multicriterial foi a utilização do método AHP para a definição da relevância de cada critério e construção da superfície de adequabilidade para a definição de diretrizes de LT de energia elétrica. A partir de comparações pareadas foi definida a matriz de decisão para especificar os pesos de cada critério, classificados a partir de sua importância relativa.

A construção da superfície de adequabilidade se subdivide em três superfícies intermediárias, que foram divididas a partir da classificação dos critérios em ambientais, sociais e econômicos. Essa divisão foi realizada para a simplificação do processo de ponderação e minimização da existência de inconsistências. Para a construção da superfície ambiental, buscou-se a minimização de impactos ambientais do novo empreendimento durante as etapas de construção e operação. Para a construção dessa superfície são consideradas áreas de preservação ambiental, remanescentes florestais, áreas indígenas e quilombolas. Em relação a construção da superfície social, buscou-se a eliminação de interferência em áreas construídas e minimização de áreas próximas as zonas urbanas. Para a construção da superfície de custo econômica, buscou-se analisar a viabilidade técnica do terreno para o recebimento do empreendimento, minimizar os custos de instalação e simplificação de projeto. Os pesos definidos para cada critério são apresentados na TABELA 4.

TABELA 4 – PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS

Grupo	Critério	AHP
Social	Áreas urbanas	35
	Proximidade de áreas urbanas	20
	Assentamentos rurais	25
	Uso do solo	20
Ambiental	Remanescente florestal	28
	Área de preservação ambiental	36
	Áreas Indígenas\Quilombolas	36
Econômica	Áreas alagadas	25
	Empreendimentos Lineares	21
	Declividade	22
	Mapa de velocidade de vento	12

FONTE: O autor (2019).

A consistência das ponderações apresentadas na TABELA 4 foram analisadas a partir do cálculo do Coeficiente de Consistência (CR), que deve ser menor ou igual a 0,10. Os CRs obtidos são apresentados na TABELA 5. Além disso, foram consultados especialistas³ na definição de diretrizes de LT para analisar os pesos atribuídos a cada critério, os quais consideraram as ponderações adequadas.

TABELA 5 – COEFICIENTES DE CONSISTÊNCIA

Grupo	CR
Social	0,03
Ambiental	0,02
Econômica	0,05

FONTE: O autor (2019).

Com a ponderação dos critérios concluída, iniciou-se o processo de ponderação dos subcritérios. Para essa tarefa foi utilizado a escala de ponderação proposta por EPRI (2006) (ver TABELA 1). Essa escala varia de 1 a 9, em que 9 representa adequabilidade mínima da área para o recebimento do empreendimento e 1 adequabilidade máxima. Além disso, após as superfícies intermediárias serem construídas foi aplicado novamente o método de ponderação AHP para a definição da influência de cada uma delas na construção da superfície de custo acumulado. Como feito anteriormente, para analisar a consistência das ponderações realizadas com o

³ Reunião realizada em 18 de dezembro de 2018 na sede da COPEL Geração e Transmissão S/A.

método AHP foi utilizado o CR (0,02), além da análise das ponderações por especialistas. O resultado final do processo de ponderação é apresentado na TABELA 6.

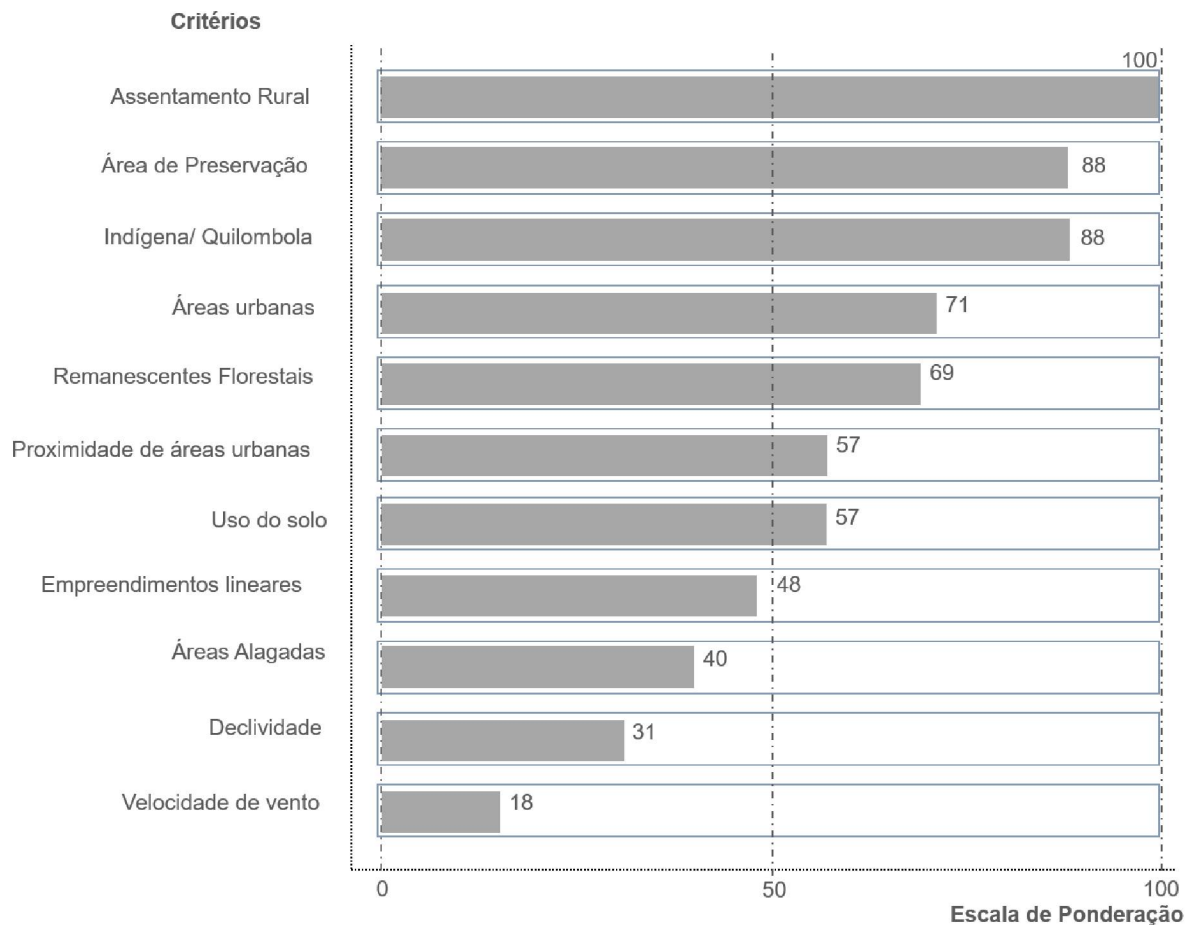
TABELA 6 – PONDERAÇÃO TOTAL

Grupo	AHP (grupo)	Critério	AHP	Subcritério	EPRI (2006)	Total
Social	42	Áreas urbanas	35	-	9	13230
		Assentamentos rurais	25	-	9	9450
		Uso do solo	20	Construído	9	7560
			Vegetação	5	4200	
			Agricultura	3	1680	
			Solo exposto	1	840	
		Proximidade de áreas urbanas	20	90 m	9	6720
				180 m	5	5880
				270 m	3	4200
				360 m	2	3360
Ambiental	36	Remanescente florestal	28	-	7	11340
		Área de preservação ambiental	36	-	9	17820
		Áreas Indígenas\Quilombolas	36	-	9	17820
Econômica	22	Áreas alagadas	27	-	9	5346
		Empreendimentos Lineares	32	-	1	704
		Declividade	21	0-15%	1	462
				15,01- 30%	2	924
				30,01-45%	5	2310
				>45%	9	4158
		Mapa de vento	12	0-1,5 m/s	4	1056
				1,5-3m/s	3	792
3-4,5m/s	2			528		
> 4,5m/s	1			264		

FONTE: O autor (2019).

A influência de cada critério na construção da superfície de adequabilidade final é apresentada no GRÁFICO 1. Observa-se que os critérios que exercem maior influência no processo de definição de diretrizes de LT são os pertencentes ao grupo social e ambiental, uma vez que inserem maiores restrições e custos no processo de construção de uma nova LT de energia elétrica. A partir da definição dos pesos para cada critério e subcritério, inicia-se o processo de reclassificação das imagens *raster*, em que as células da base matricial são reclassificadas de acordo com os pesos apresentados na TABELA 6 (coluna nominada de total) referentes a cada critério e subcritério que está sendo representado pelo dado geográfico.

GRÁFICO 1 – INFLUÊNCIA DOS CRITÉRIOS NO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO



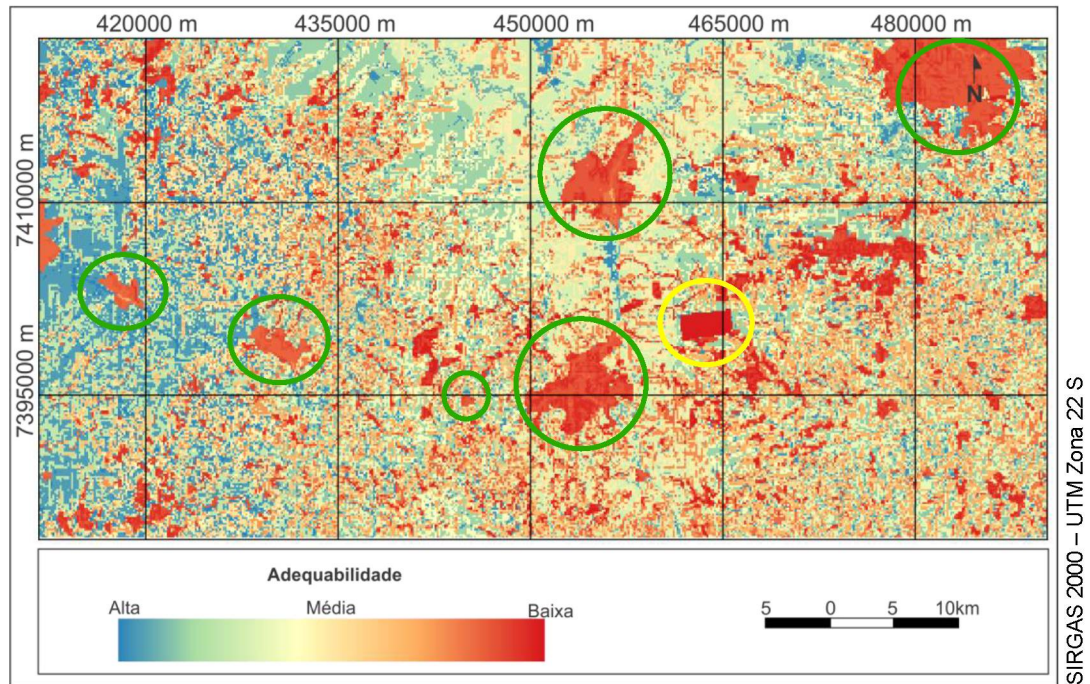
FONTE: O autor (2019).

Na Subseção 4.2 são apresentados os resultados relacionados a construção das superfícies de adequabilidade para o cenário 1.

4.1.2 Cenário 1 – LT 530 kv (Sarandi – Londrina)

O cenário 1 compreende toda a área de influência da LT que liga a SE SDI à SE LNA. O empreendimento está localizado no Estado do Paraná e compreende os seguintes municípios: Sarandi, Marialva, Mandaguari, Apucarana, Arapongas e Londrina. Após a realização do processo de reclassificação dos critérios e subcritérios, iniciou-se o processo de construção da superfície de adequabilidade. Esse processo foi realizado a partir da aplicação da soma das superfícies intermediárias (ambiental, social e econômica) realizando o processo denominado de álgebra de mapas. A superfície de adequabilidade obtida é apresentada na FIGURA 12.

FIGURA 12 – SUPERFÍCIE DE ADEQUABILIDADE – CENÁRIO 1



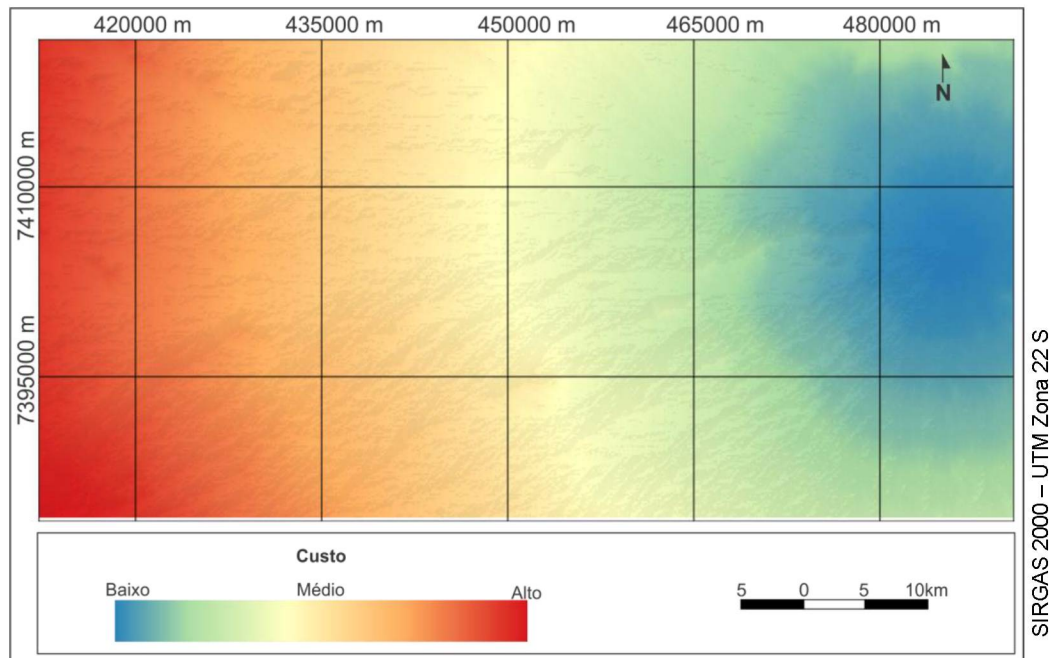
FONTE: O autor (2019).

Na FIGURA 12, observa-se que as áreas representadas pela cor vermelha são as menos adequadas para a definição uma diretriz de LT de energia elétrica. No estudo de caso em questão, as áreas com menor adequabilidade foram áreas urbanas (destacadas com os círculos verdes) e área de assentamento rural (Assentamento Rural Dorcelina Folador, localizado no município de Arapongas (área destacada com o círculo amarelo)) seguidas por áreas de preservação ambiental e remanescentes florestais. Confrontando o resultado com as alternativas de um estudo real, observa-se que o modelo de adequabilidade apresenta consistência, uma vez que a construção de LT em assentamentos rurais e áreas de conservação ambiental deve ser evitada e as concessionárias buscam a minimização ou até mesmo a eliminação do contato direto do empreendimento com a população residente na área de influência da nova LT de energia elétrica.

A partir da superfície de adequabilidade, inicia-se o processo de construção da superfície de custo acumulado. Essa superfície foi construída a partir do conhecimento das posições geográficas de dois pontos, ponto de início (Subestação de Sarandi) e de destino (Subestação de Londrina) do traçado. Esse processo é responsável por calcular o custo acumulado de todos os caminhos possíveis desde a origem até o ponto final do traçado, definido pelo usuário. A superfície de custo acumulado é

organizada em uma estrutura de grafos, em que as arestas são ponderadas com a média dos valores de adequabilidade de dois pixels vizinhos e aos vértices são atribuídas as coordenadas do centroide de cada pixel pertencente a superfície de adequabilidade. Esse processo foi realizado no software GRASS (7.4.2). A superfície de custo acumulado é apresentada na FIGURA 13.

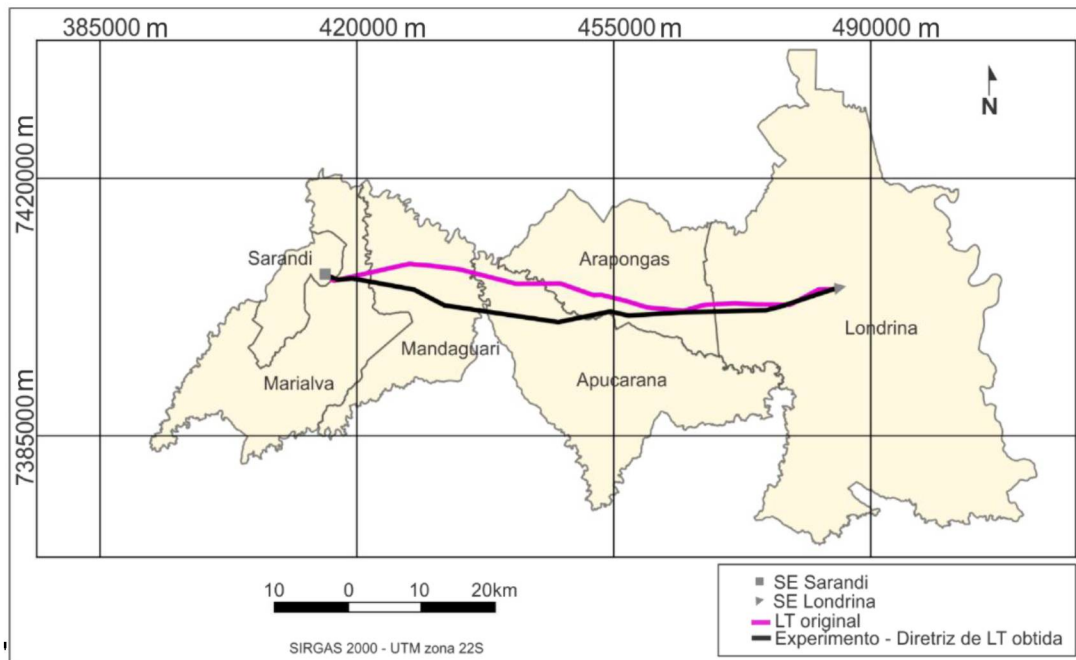
FIGURA 13 – SUPERFÍCIE DE CUSTO ACUMULADO – CENÁRIO 1



FONTE: O autor (2019).

A superfície de custo acumulado é o principal dado para a definição do traçado da diretriz de LT otimizado, uma vez que apresenta todas as alternativas associadas aos custos gerados pela escolha de uma determinada rota para o traçado final. O estabelecimento da diretriz ideal foi realizado com a aplicação do algoritmo de Dijkstra (1959). Esse algoritmo é responsável por definir, dentre as rotas possíveis, aquela que apresente o custo acumulado mínimo (sociais, ambientais e econômicos), apresentando maior adequabilidade para o recebimento do empreendimento em questão. Devido o traçado ser obtido por meio de uma base matricial, o traçado final pode apresentar um padrão serrilhado, para a minimização desse padrão foi aplicado o algoritmo de Douglas-Peucker. A diretriz otimizada obtida para o cenário 1 é ilustrada na FIGURA 14.

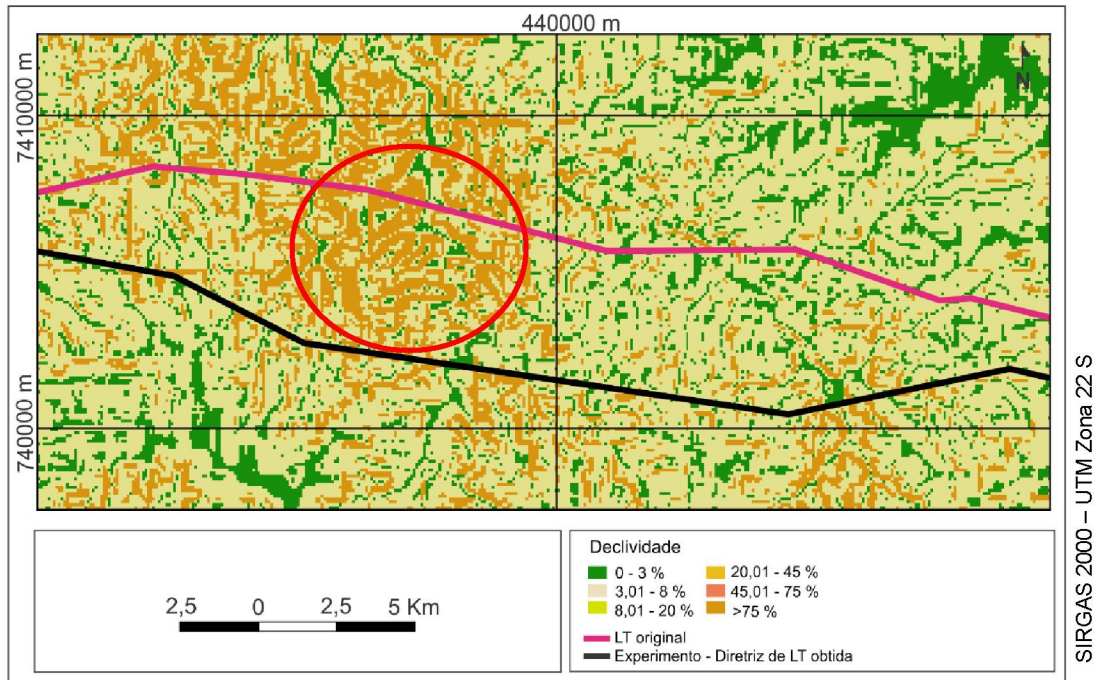
FIGURA 14 – TRAÇADO DA DIRETRIZ DE LT DE ENERGIA ELÉTRICA – CENÁRIO 1



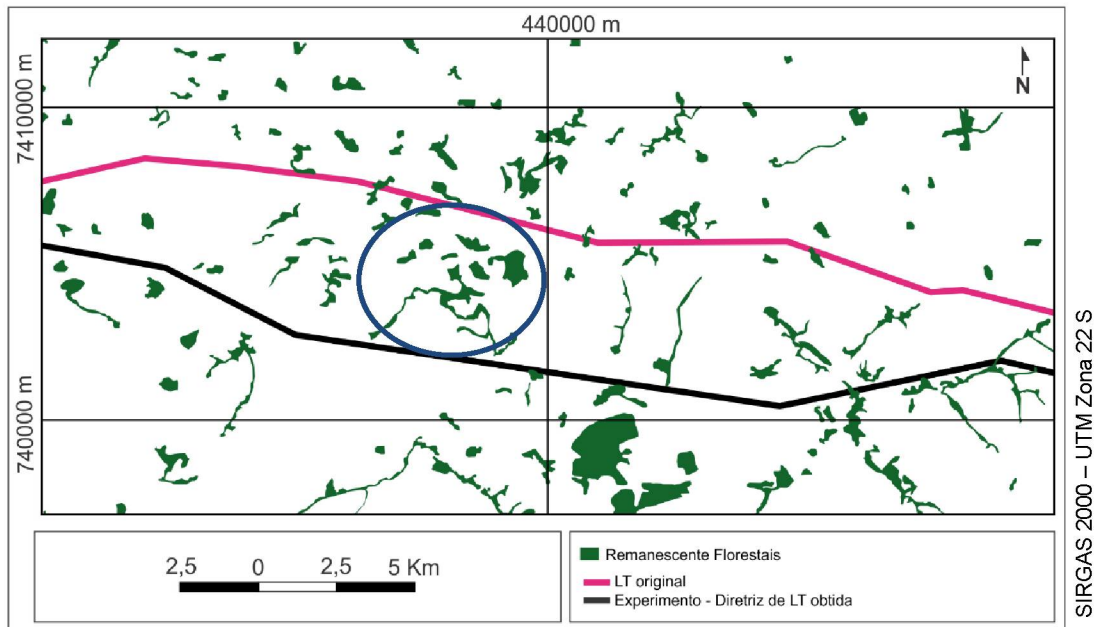
FONTE: O autor (2019).

O traçado de LT original apresenta extensão linear de 75,5 km. Em comparação, o traçado obtido com a modelagem espacial multicriterial apresentou extensão linear de 76,5 km. A rota obtida apresenta semelhanças com o traçado da LT original, porém algumas diferenças podem ser observadas, principalmente entre os municípios de Apucarana e Mandaguari. Essa mudança de percurso ocorreu devido a influência dos critérios de declividade e de remanescentes florestais. Observa-se que o algoritmo de otimização buscou desviar das localidades com maiores percentuais de declividade, como pode ser observado na FIGURA 15a, área destacada pelo círculo em vermelho. Além disso, observa-se a presença de remanescentes florestais, áreas consideradas como restrições de passagem no processo de definição do traçado de diretrizes de LT de energia elétrica, como observa-se na FIGURA 15b (círculo azul).

FIGURA 15 – DIFERENÇAS ENTRE OS TRAÇADOS – CENÁRIO 1 (a) INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE (b) INFLUÊNCIA DE REMANESCENTES FLORESTAIS



(a)



(b)

FONTE: O autor (2019).

Além da análise visual os traçados foram comparados quantitativamente em relação as três perspectivas consideradas neste trabalho: social, ambiental e econômica. Para a realização do processo de análise quantitativa foram definidos indicadores para cada perspectiva, como apresentados no QUADRO 6.

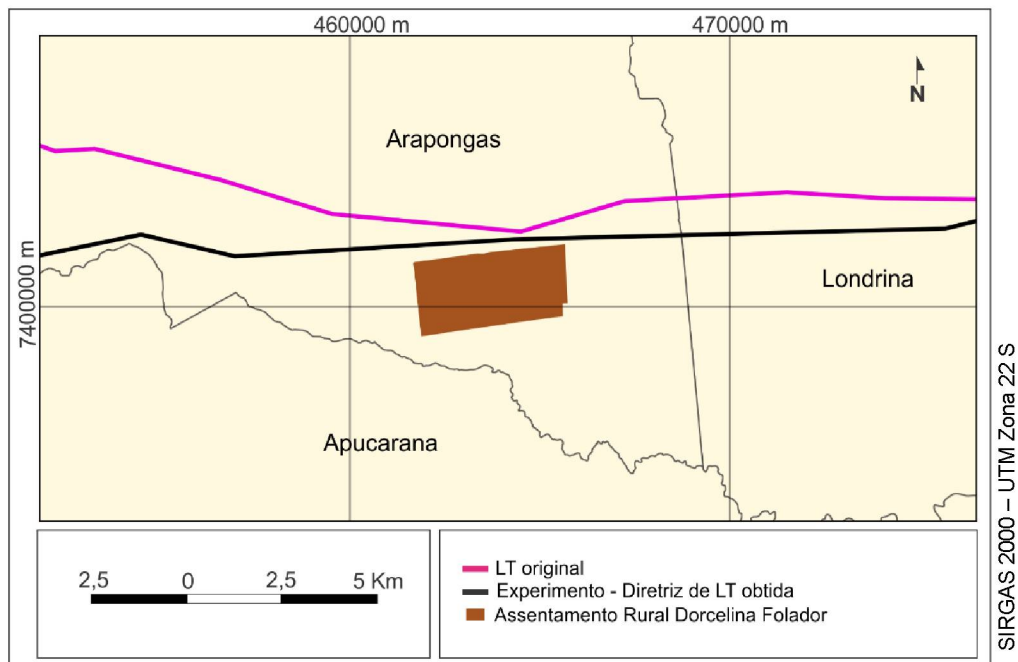
QUADRO 6 – INDICADORES PARA ANÁLISE QUANTITATIVA

Perspectiva	Indicadores
Social	Os impactos causados nesta perspectiva foram avaliados a partir da quantificação do comprimento da rota de cada experimento em áreas urbanas, periurbanas e assentamentos rurais.
Ambiental	Os impactos ambientais são computados a partir da determinação da dimensão linear do traçado em áreas de conservação ambiental e remanescentes florestais.
Econômico	Os impactos econômicos foram quantificados a partir da análise das dimensões lineares totais dos traçados obtidos e a declividade média do terreno.

FONTE: O autor (2019).

Ambos os traçados não atravessaram áreas urbanas ou periurbanas, áreas de conservação ambiental e desviaram do Assentamento Rural Dorcelina Folador, localizado no município Paranaense de Arapongas (ver FIGURA 16).

FIGURA 16 – DESVIO DO ASSENTAMENTO RURAL – CENÁRIO 1



FONTE: O autor (2019).

Áreas de remanescentes florestais foram atingidas por ambos os traçados, porém a extensão linear do traçado da diretriz de LT no interior de remanescentes florestais, obtida no processo de modelagem espacial multicriterial, apresentou-se 39% menor quando comparada com o traçado da LT original. Além disso, o traçado obtido com o método proposto atravessou áreas com menores porcentagens de declividade, quando comparada com a região em que está localizado o empreendimento original. Os resultados da análise quantitativa são apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE AS ROTAS - CENÁRIO 1

Perspectiva	Fatores	LT original	Experimento Cenário 1
Social	Impacto em áreas urbanas	0,00 km	0,00 km
Ambiental	Impacto remanescente florestal	4,58 km	1,81 km
	Impacto em áreas de conservação	0,00 km	0,00 km
Econômico	Comprimento	75,50 km	76,50 km
	Declividade Média	20,70 %	12,76 %

FONTE: O autor (2019).

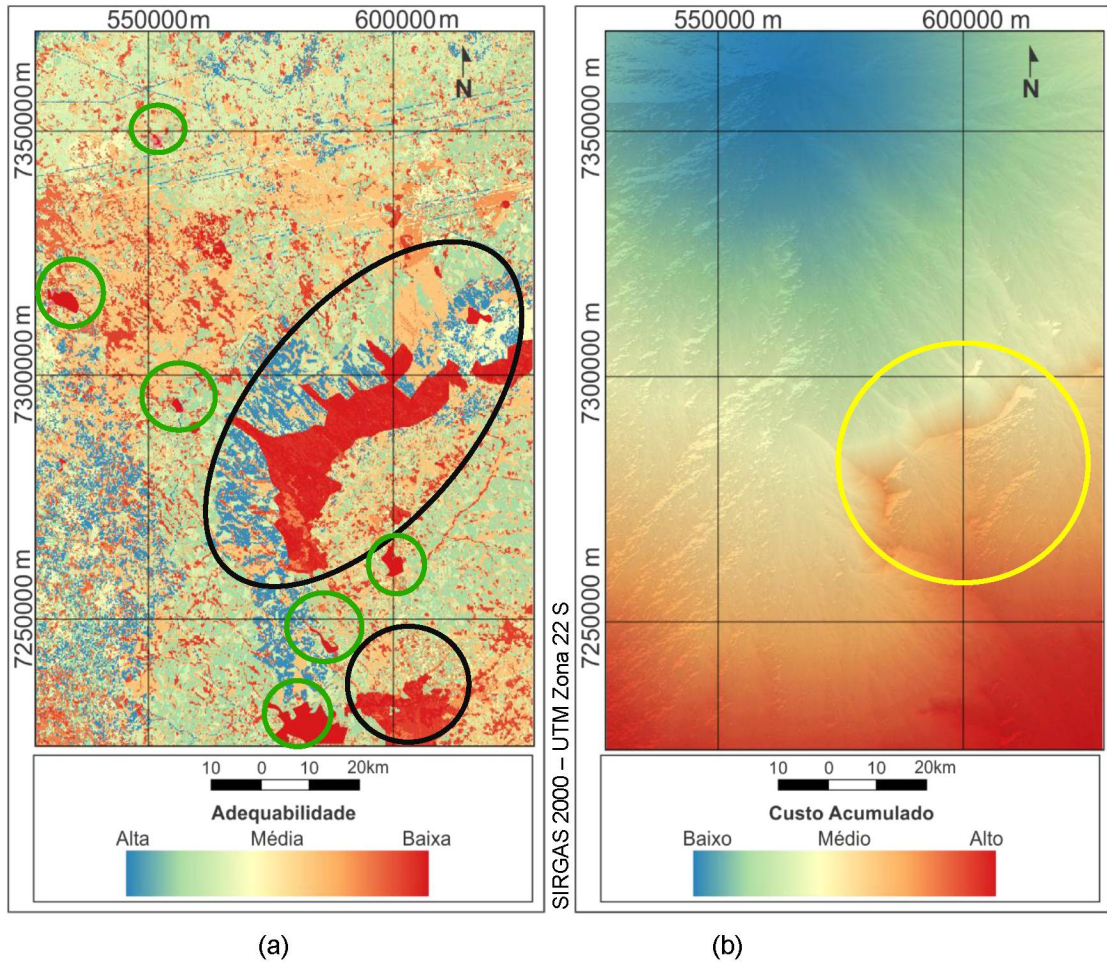
Na Subseção 4.1.3 são apresentados os resultados obtidos para o cenário 2.

4.1.3 Cenário 2 – LT 230 kv (Figueira – Ponta Grossa Norte)

Para avaliar a modelagem multicriterial proposta neste trabalho um segundo experimento foi realizado, com o intuito de testar o mesmo processo de ponderação em áreas com características distintas. O cenário 2 compreende a área de influência da LT que liga a SE de Figueira à SE de Ponta Grossa Norte. O empreendimento está localizado no Estado do Paraná e abrange os seguintes municípios: Figueira, Curiúva, Ventania, Telêmaco Borba, Tibagi, Castro, Carambeí e Ponta Grossa. As superfícies de adequabilidade e de custo acumulado são apresentadas na FIGURA 17a e FIGURA 17b, respectivamente.

Observa-se na FIGURA 17a que as áreas representadas pela cor vermelha são inadequadas para a definição de diretrizes de LT de energia elétrica. No cenário 2, a área de conservação ambiental apresentou o maior nível de inadequabilidade (área no interior do círculo preto) bem como áreas urbanas (círculos verdes), uma vez que se deve evitar a passagem de LT nestas regiões. Áreas cultivadas (agricultura e pecuária) são as mais adequadas para a construção do empreendimento em questão. No modelo proposto as regiões que apresentam essas características foram classificadas como adequadas ao recebimento do empreendimento (representada pelas cores em azul (FIGURA 17a)), confirmando a consistência do modelo proposto.

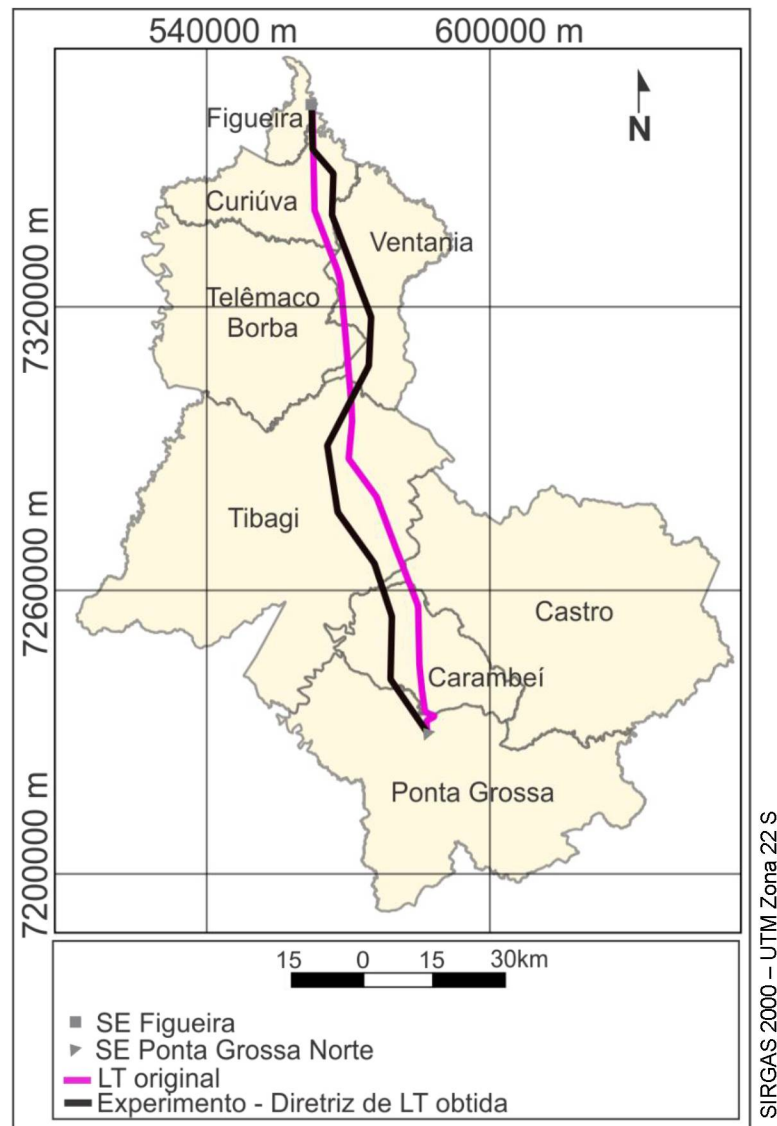
FIGURA 17 – SUPERFÍCIES CENÁRIO 2 (a) ADEQUABILIDADE
(b) CUSTO ACUMULADO



FONTE: O autor (2019).

A partir da superfície de adequabilidade foi construída a superfície de custo acumulado, ilustrada na FIGURA 17b. Para sua construção, considerou-se a localização da Subestação de Figueira como ponto inicial e a localização da Subestação de Ponta Grossa Norte como ponto final do traçado do empreendimento. Observa-se na FIGURA 17b que quanto maior a distância do ponto inicial do traçado, maiores os custos acumulados. Na região destacada com círculo amarelo, localiza-se a área de conservação permanente que apresenta alto custo de atravessamento, devido ser um critério que restringe a passagem da LT de energia elétrica. Com a aplicação do algoritmo de Dijkstra (1959) foi obtido o traçado da diretriz da LT de energia elétrica. O resultado é apresentado na FIGURA 18.

FIGURA 18 – TRAÇADOS OBTIDOS PARA O CENÁRIO 2

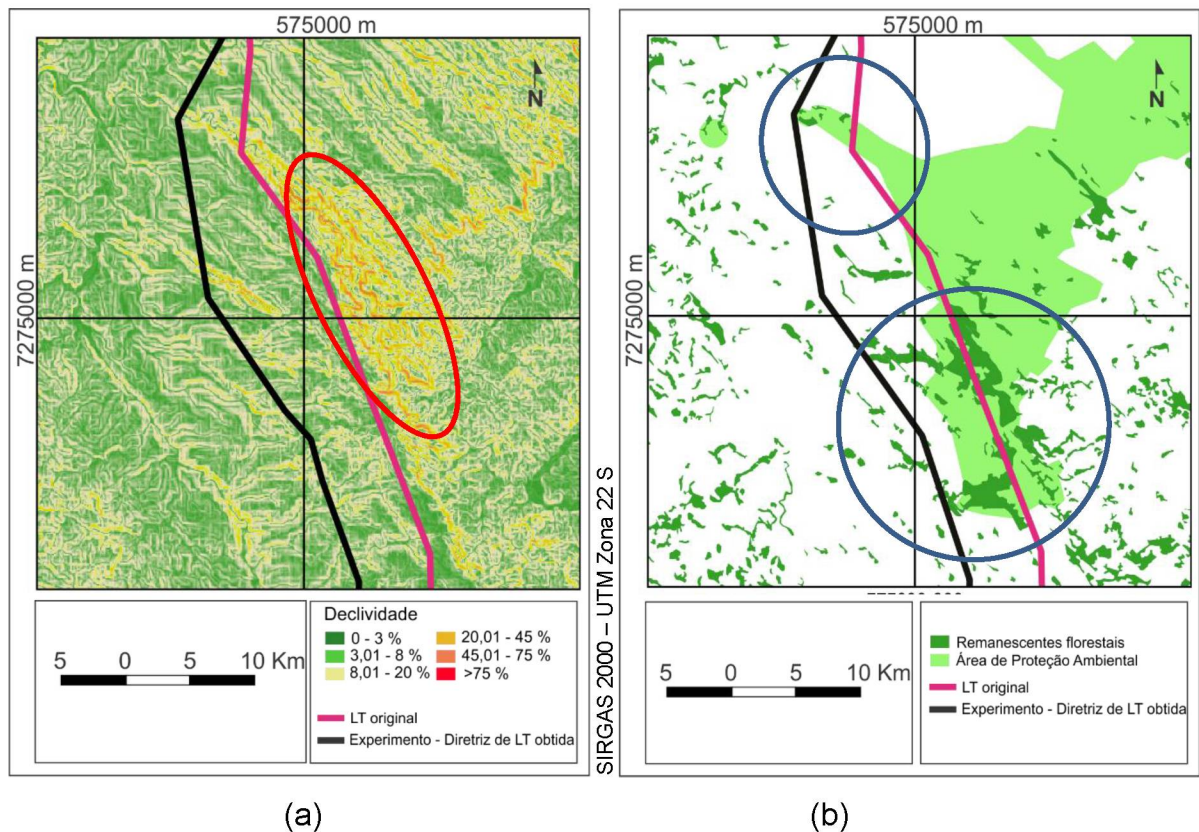


FONTE: O autor (2019).

O traçado da LT original apresenta extensão linear de 139,40 km. Em comparação, o traçado obtido com a aplicação da modelagem espacial multicriterial apresentou extensão linear de 142,56 km. As diferenças no traçado original e o traçado obtido com a modelagem multicriterial espacial pode ser observado na FIGURA 19. Semelhante ao cenário 1, apresentado na Subseção 4.1.2, a rota da LT obtida no processo de modelagem espacial multicriterial ocorreu principalmente devido a topografia (o algoritmo de otimização buscou rotas que apresentassem menores percentuais de declividade) e o desvio de áreas de preservação ambiental, remanescentes florestais e áreas urbanas.

Na FIGURA 19a, observa-se que ambos os traçados desviaram das áreas com maiores declividades, porém devido à presença de áreas de preservação ambiental (ilustrada na FIGURA 19b) o traçado obtido a partir da modelagem espacial multicriterial foi deslocado para áreas a oeste do traçado original, evitando o contato com áreas de preservação ambiental e remanescentes florestais.

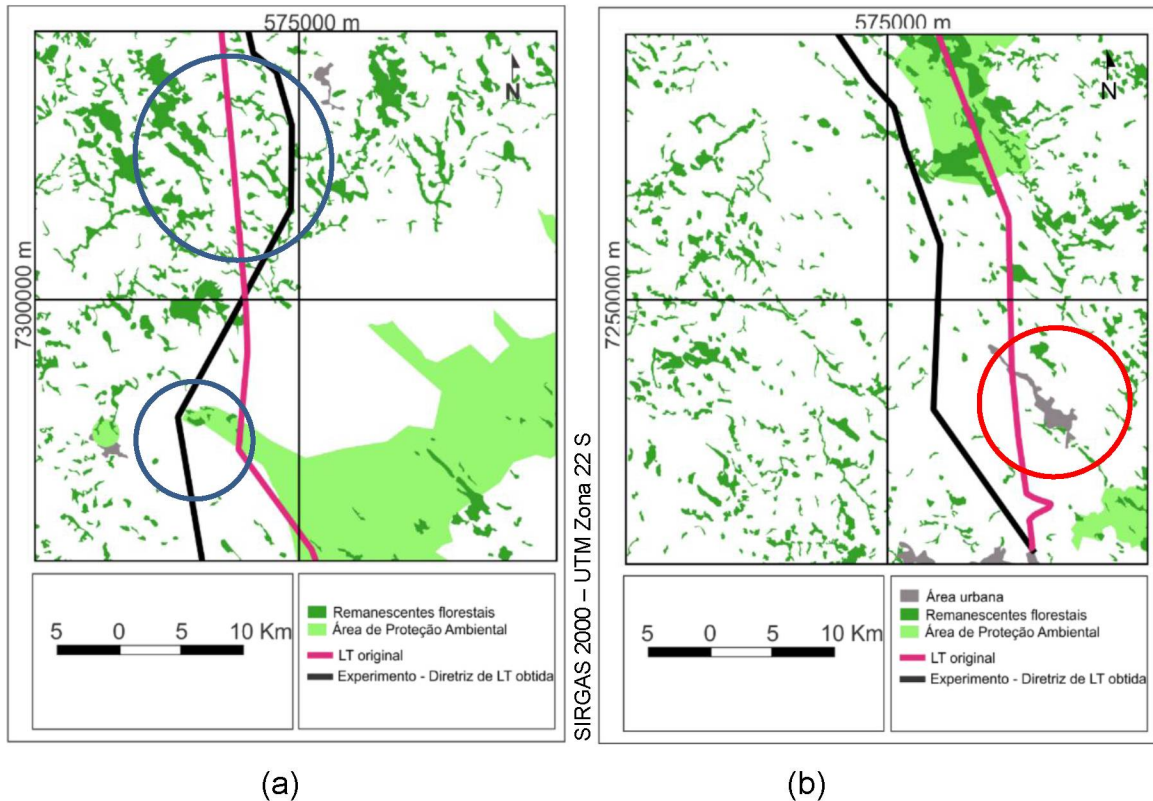
FIGURA 19 – DIFERENÇAS ENTRE OS TRAÇADOS – CENÁRIO 2 (a) DECLIVIDADE
(b) ÁREAS DE PRESERVAÇÃO AMBIENTAL



FONTE: O autor (2019).

Na FIGURA 20a (áreas destacadas com círculos em azul) foi observado o mesmo padrão descrito anteriormente: a minimização dos impactos em remanescentes florestais e em áreas de preservação ambiental. Além disso, o contato com áreas urbanas também foi minimizado no processo de roteamento de LT de energia elétrica. Na FIGURA 20b, observa-se que o traçado original atravessa uma região urbana (área destacada com o círculo em vermelho), fato que não ocorre no traçado definido com o método discutido neste trabalho.

FIGURA 20 – DIFERENÇAS ENTRE OS TRAÇADOS – CENÁRIO 2 (a) REMANESCENTES FLORESTAIS (b) ÁREA URBANA

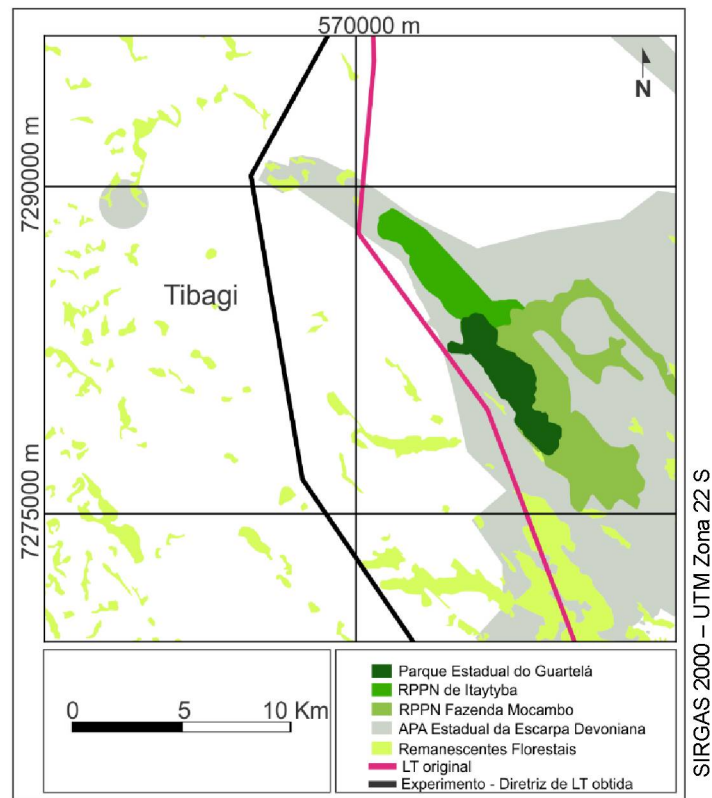


FONTE: O autor (2019).

O traçado da LT que liga SE de Figueira à SE de Ponta Grossa Norte, passa pelo interior da Área de Preservação Ambiental (APA) Estadual da Escarpada Devoniana. No projeto original foram consideradas como restrições ambientais nesta região o Parque Estadual do Guartelá, a Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) de Itaytyba e RPPN Fazenda Mocambo, localizadas no município de Tibagi (FIGURA 21).

No município de Tibagi foi identificado a maior diferença entre o traçado original e o obtido com a modelagem espacial multicriterial. Isso ocorreu devido a consideração de toda a extensão da APA Estadual da Escarpada Devoniana como uma área de restrição ambiental. É conveniente a consideração desta APA no processo de modelagem, uma vez que apresenta remanescentes florestais de Mata Atlântica (floreτας com Araucária) que estão ameaçados pelo crescimento econômico da região analisada.

FIGURA 21 – ÁREAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL



FONTE: O autor (2019).

A análise quantitativa dos resultados para o cenário 2 é apresentada na TABELA 8.

TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE AS ROTAS - CENÁRIO 2

Perspectiva	Fatores	LT original	Experimento Cenário 2
Social	Impacto em áreas urbanas	1,00 km	0 km
Ambiental	Impacto remanescente florestal	12, 87 km	5, 20 km
	Impacto em áreas de conservação	25, 00 km	0 km
Econômico	Comprimento	139,40 km	142,56 km
	Declividade Média	8, 94%	8, 91%

FONTE: O autor (2019).

Observa-se na TABELA 8 que 1 km do empreendimento original atravessa regiões urbanas ou periurbanas, enquanto que o traçado da diretriz de LT obtido no processo de modelagem espacial multicriterial desvia de todas as regiões classificadas como tal. Observa-se também, que a LT original atravessa boa parte da APA Estadual da Escarpada Devoniana, além de possuir 12, 87 km de extensão linear no interior de remanescentes florestais. O traçado da LT obtida no processo de

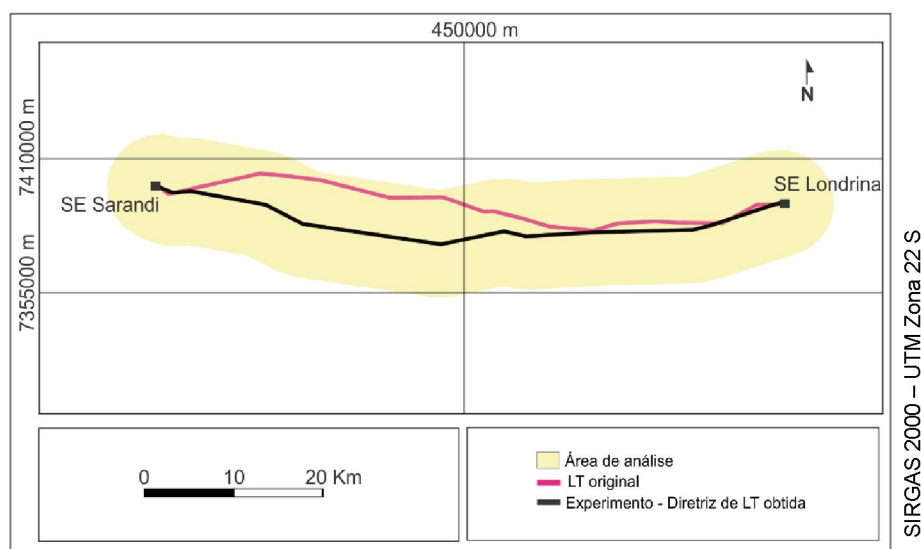
modelagem também atravessou áreas de remanescentes florestais, porém a extensão linear do empreendimento no interior destas áreas é 40% menor quando comparado com o traçado original. A diferença entre os percentuais de declividade não foi significativa para o cenário 2. Na Subseção 4.4 é apresentada a discussão dos resultados.

4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Utilizando a modelagem espacial multicriterial os analistas podem definir regiões que apresentem as características necessárias para o desenvolvimento do projeto, considerando automaticamente uma gama de critérios relevantes no processo de planejamento de diretrizes de LT que manualmente seria improvável de serem considerados. A partir da modelagem espacial multicriterial é possível realizar análises no entorno do traçado obtido, para a identificação de possíveis problemas ou definição de soluções alternativas.

Neste trabalho, definiu-se uma área de análise (corredores de LT) utilizando o valor da área de abrangência de interferência do empreendimento recomendada pela Portaria Interministerial nº 419/2011 (2011) de 5 km ao redor do traçado da diretriz obtida para a realização do processo de análise do empreendimento (FIGURA 22).

FIGURA 22 – ÁREA DE ANÁLISE – CENÁRIO 1



FONTE: O autor (2019).

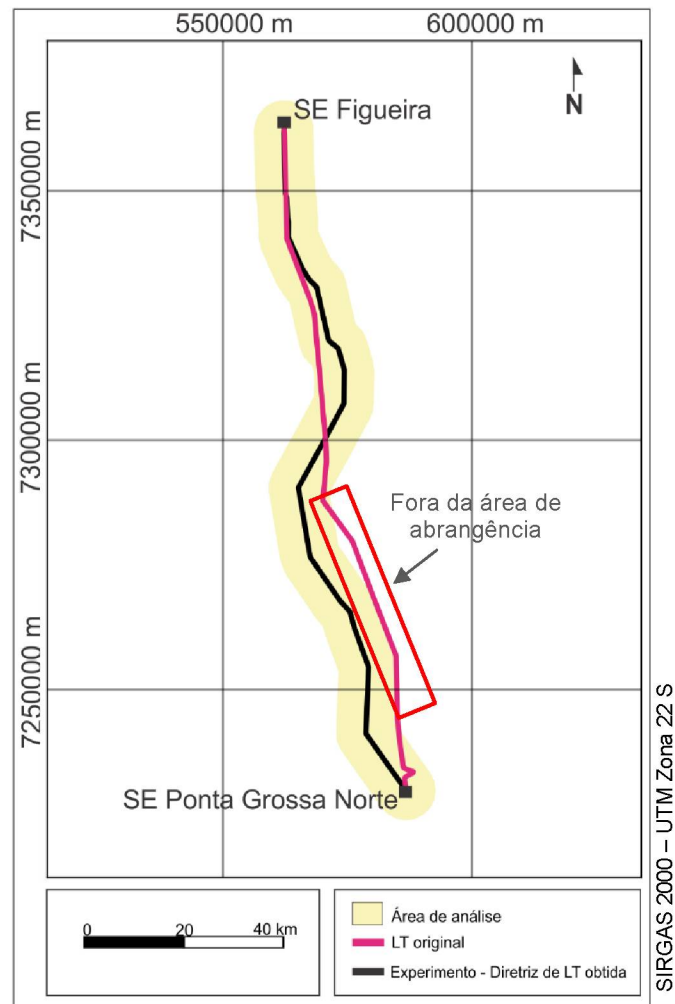
Observa-se que mesmo que o traçado da diretriz definida pela modelagem espacial multicriterial difira do traçado original, o mesmo apresenta-se 100% dentro da área de abrangência, demonstrando que a metodologia proposta é eficaz e possível de aplicação no processo de planejamento de novas LT de energia elétrica.

No cenário 2, devido a área apresentar maiores restrições relacionadas ao processo de definição de diretrizes a taxa de sucesso para a definição da diretriz no interior da área de abrangência para a realização das análises e definição do traçado final foi menor do que o cenário 1, porém os resultados são positivos: 65% da LT original se apresentam no interior da área de abrangência para a realização das análises e definição do traçado final de LT. Isso ocorreu principalmente devido a consideração da APA da Escarpada Devoniana como um fator de restrição (ver FIGURA 21), fato que não ocorreu na construção da LT original. Os 35% de extensão linear que se apresentam fora da área estão destacados na FIGURA 23 (retângulo em vermelho).

Apesar do traçado original não está completamente dentro da área de 5 km proposta para análise, a técnica proposta é promissora para a definição da área que necessite de estudos detalhados, uma vez que a definição de corredores para o planejamento de LT definidos pela ANEEL é de 20 km, permitindo a minimização da área a ser percorrida e o tempo de análise pelos especialistas. Destaca-se ainda que a largura de corredores e as análises necessárias para a definição do traçado final serão variáveis de acordo com as peculiaridades da região de instalação, uma vez que o Brasil apresenta variações climáticas, de fauna, flora, populacionais e econômicas de acordo com a variação da região que será implantado o empreendimento.

Diante do exposto, observa-se que a técnica empregada para a definição de diretrizes de LT é aplicável na etapa de planejamento locacional de diretrizes de LT e contribui para a quantificação dos impactos gerados e definição dos traçados potenciais para a realização do processo licitatório do projeto. Além da definição do traçado de uma diretriz preferencial é possível a definição de áreas prioritárias (corredores) para o recebimento de estudos aprofundados acerca de suas características sociais, econômicas e ambientais

FIGURA 23 – ÁREA DE ANÁLISE – CENÁRIO 2



FONTE: O autor (2019).

Observa-se ainda que o sucesso da modelagem está diretamente relacionado as variáveis geográficas selecionadas para a composição do modelo espacial multicriterial, uma vez que serão essenciais para a definição da rota otimizada no final do processo de modelagem. Neste trabalho foram utilizadas 11 variáveis geográficas para a composição do modelo que foram ponderadas a partir da aplicação do MAM AHP. Dentre as variáveis utilizadas, áreas urbanas, proximidades de áreas urbanas, áreas de conservação ambiental, remanescentes florestais e declividade foram as classes que realizaram maior influência na definição do traçado da diretriz otimizada. Em contrapartida, o mapa de velocidade de vento não inseriu mudanças significativas na definição do traçado da diretriz, uma vez que a região de estudo não apresentou uma grande variação na velocidade média de vento.

A seguir, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

A metodologia proposta neste trabalho tem como objetivo definir o traçado de diretrizes de LT. Esse processo é realizado na etapa de planejamento para que posteriormente se realizem as análises da área de influência do empreendimento e escolha o traçado final para a LT, levando-se em consideração todos os critérios técnicos necessários para a construção do empreendimento de forma adequada. Neste âmbito, observa-se que os traçados obtidos para os cenários 1 e 2 são traçados preliminares, sobre os quais os técnicos devem realizar análises acerca de todas as variáveis importantes no processo de definição do traçado final.

O modelo espacial conceitual proposto para a definição do traçado de diretrizes de LT se mostrou eficiente e de possível aplicação no processo de planejamento de definição de uma nova LT, uma vez que os traçados obtidos no processo de modelagem espacial multicriterial apresentaram similaridade com os traçados de LT existentes e utilizados para a validação do modelo proposto. As diferenças ocorreram principalmente devido a consideração de áreas como remanescentes florestais que foram utilizadas no processo de modelagem como áreas de restrição, modificando algumas partes de ambos os traçados.

Das três perspectivas consideradas neste trabalho, a consideração da perspectiva social e ambiental foram significativas, uma vez que são as principais restrições a serem consideradas no processo de definição do traçado de diretrizes de LT. Devido as exigências legais, deve-se moldar o empreendimento de acordo com a disposição espacial de áreas habitadas e de preservação ambiental localizadas na área de abrangência do empreendimento. Os aspectos econômicos também devem ser considerados, porém apresenta menor influência na definição do traçado de diretrizes quando comparado com as perspectivas sociais e ambientais.

O algoritmo de Dijkstra (1959), foi utilizado no processo de definição de traçados de diretrizes de LT, sendo um algoritmo simples, de fácil entendimento e implementação e de baixo custo computacional. A aplicação do algoritmo associado a modelagem espacial multicriterial proposta, mostrou-se eficiente para a espacialização e entendimento da influência das variáveis consideradas dentro da

área de abrangência do empreendimento, auxiliando no processo de tomada de decisão e definição do traçado preliminar de diretrizes de LT.

5.2 RECOMENDAÇÕES

A limitação da proposta apresentada pode ser associada a atribuição dos pesos aos critérios utilizados para a criação do modelo, uma vez que apenas um modelador atribuiu os pesos às variáveis utilizadas (mesmo que avaliadas por técnicos da área de planejamento do traçado de diretrizes de LT), o que possibilita superestimar ou subestimar o modelo, uma vez que as ponderações podem ser influenciadas pela subjetividade. Recomenda-se para modelagens futuras a realização das ponderações por mais de um modelador ou a construção de uma rotina que permita a atribuição automática de pesos sem necessitar da interação com as experiências do analista.

Outro desafio relacionado a modelagem multicriterial é a indisponibilidade de dados geográficos em uma escala de representação adequada e disponibilizados de forma gratuita. Observou-se que as variáveis utilizadas neste trabalho foram suficientes para a definição do traçado da diretriz, porém com a utilização de dados como o valor da terra, propriedades afetadas pelo empreendimento, áreas de alto valor cultural e definição da monetização das variáveis poderiam auxiliar na definição de diretrizes mais realistas. Além destes critérios a utilização de fatores restritivos, como tipo de solo e ângulos de deflexão, podem auxiliar na definição de traçados de diretrizes de LT, porém para considerá-los é necessário realizar modificações no algoritmo Dijkstra (1959).

REFERÊNCIAS

- AISSI, H.; et al. GIS-Based Multicriteria Evaluation Approach for Corridor Siting. **Environment And Planning B: Planning and Design**, [s.l.], v. 39, n. 2, p.287-307, abr. 2012. SAGE Publications. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1068/b37085>>. Acesso em: out. 2018
- BACHMANN, D. et al. Multi-Objective Optimisation Based Planning of Power-Line Grid Expansions. **Isprs International Journal Of Geo-information**, [s.l.], v. 7, n. 7, p.258-280. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/ijgi7070258>>. Acesso em: jun. 2018. MDPI AG.
- BAGLI, S., et al. Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. **Environmental Impact Assessment Review**, [s.l.], v. 31, n. 3, p. 234-239. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2010.10.003>>. Acesso em: out. 2018.
- BOUYSSOU, D. et al. **Evaluation and decision models with multiple criteria: Stepping stones for the analyst**. New York: Springer, 2006. 445 p. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F0-387-31099-1.pdf>>. Acesso em: nov. 2018.
- BRANS, J.P.; VINCKE, P. (1985) A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria. Decision-Making). **Management Science**, 31, p. 647-656. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>> Acesso em: out. 2018.
- BRASIL. Constituição (1941). **Decreto nº 3365, de 21 de junho de 1941**. Dispõe sobre desapropriações por utilidade pública. Rio de Janeiro, RJ.
- BRASIL. Constituição (1995). **Lei nº 9074, de 07 de julho de 1995**. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Brasília.
- BRASIL. Constituição (2012). **Lei nº 12651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências, Brasília, 2012.
- CASTILHO, R. M. **Otimização do Uso da Linha de Transmissão Através do Monitoramento em Tempo Real**. Dissertação – UNICAMP. Campinas, 2010.
- CARAMAIA, M; DELL'OLMO, P. Multi-objective Management in Freight Logistics. **Springer**, [s.l.], 2008, p.1-187. Springer London. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84800-382-8>>. Acesso em: nov. 2018.
- DIJKSTRA, E. W, 'A note on two problems in connexion with graphs', **Numerische Mathematik** 1(1), 269-271, 1959.

DNIT. **Shapefiles**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/mapas/multimodais/shapefiles>>. Acesso em: 18 out. de 2018.

EPE. **Diretrizes para elaboração dos relatórios técnicos referentes às novas instalações da rede básica**. Brasília, 2005. Disponível em: <<https://contas.tcu.gov.br/etcu/ObterDocumentoSisdoc?seAbrirDocNoBrowser=true&codArqCatalogado=7482729&codPapelTramitavel=51389799> 2005>. Acesso em: out. 2018.

EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2026**. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>>. Acesso em: out. 2018.

EPE. **Web Map EPE**. Disponível em: <<https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>>. Acesso em: out. 2018b.

EPRI. **Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology**. EPRI, Palo Alto, CA, and Georgia Transmission Corporation, Tucker, GA: 2006. 1013080.

GOODCHILD, Michael F. Ten Years Ahead: Dobson's Automated Geography in 1993. **The Professional Geographer**, [s.l.], v. 45, n. 4, p. 444-446, 1993. Informa UK Limited. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.0033-0124.1993.00444.x>>. Acesso em: nov. 2018

GRASSI, S. et al. A GIS-Based Process for Calculating Visibility Impact from Buildings During Transmission Line Routing. **Connecting A Digital Europe Through Location And Place**, [s.l.], p.383-402, 2014. Springer International Publishing. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-03611-3_22>. Acesso em: nov. 2018.

IAP. **Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/pagina-756.html>>. Acesso em: out. 2018.

IEC 60826: **Design Criteria of Overhead Transmission Lines**, Technical Comitee n.11, Ed. 4, 2017.

INCRA. **Acervo Fundiário**. Disponível em: <www.acervofundiario.incra.gov.br>. Acesso em: out. 2018.

INPE. **Catálogo de Imagens**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: out. 2018.

JAKEMAN, A. J. et al. **Environmental Modelling, Software and Decision Support: State of the art and new perspective**. Elsevier, 2008.

JANKOWSKI, P; RICHARD, L. Integration of GIS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection. **Environment And Planning B: Planning and Design**, [s.l.], v. 21, n. 3, p.323-340, 1994. SAGE Publications. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1068/b210323>>. Acesso em: jan. 2019.

LI, Y. et al. Optimization of Transmission-Line Route Based on Lightning Incidence Reported by the Lightning Location System. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 28, n. 3, p.1460-1468, 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2256473>>. Acesso em: jan. 2019.

LIMA, R. M. et al. Least-cost path analysis and multi-criteria assessment for routing electricity transmission lines. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [s.l.], v. 10, n. 16, p.4222-4230, 2016. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1119>. Acesso em: nov. 2018.

LONGLEY, P. A. et al. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 540 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (BR). **Portaria nº 419, de 26 de outubro de 2011. Regulamenta a atuação da Fundação Nacional do Índio –FUNAI, da Fundação Cultural Palmares – FCP**. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN e do Ministério da Saúde.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (BR). **Portaria nº 421, de 26 de outubro de 2011**. Dispõe sobre o licenciamento e a regularização ambiental federal de sistemas de transmissão de energia elétrica e dá outras providências.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 30 Jan. 2019

MONTEIRO, C. et al. GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 20, n. 2, p.934-942, abr. 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/tpwrd.2004.839724>>. Acesso em: out. 2018.

MUNIER, N.; **A Strategy for Using Multicriteria Analysis in Decision-Making: A Guide for Simple and Complex Environmental Projects**. Springer, New York, 2011.

ONS. **Submódulo 2.4: Requisitos Mínimos para linhas de transmissão aéreas**. Brasília, 2009. Disponível em: <http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%20%2FSubm%C3%B3dulo%202.4%2FSubmodulo%202.4_Rev_1.0.pdf>. Acesso em: out. 2018.

POHEKAR, S.D; RAMACHANDRAN, M.E.F. Application of multicriteria decision making to sustainable energy planning – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.] v.8, n. 4, p. 365- 381, 2003.

RAZMAK, J.; AOUNI, B. Decision Support System and Multi-Criteria Decision Aid: A State of the Art and Perspectives. **Journal Of Multi-criteria Decision Analysis**, [s.l.], v. 22, n. 1-2, p. 101-117, 2014. Wiley. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/mcda.1530>>. Acesso em: jan. 2019.

REIS, L. B.; CUNHA, E. C. N. **Energia elétrica e sustentabilidade: Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais.** São Paulo: USP, 2006.

ROY, B. Classement et choix en presence de points de vue multiples (la methode ELECTRE). *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle*, v. 2, n. 1, p. 57-75, 1968.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process.** McGraw-Hill, New York, NY. 1980.

SCHMIDT, A. J. Implementing a GIS Methodology for Siting High Voltage Electric Transmission Lines. **Saint Mary's University of Minnesota, University Central Services Press**, v. 11, 2009.

SHU, J. et al. A New Method for Spatial Power Network Planning in Complicated Environments. **IEEE Transactions On Power Systems**, [s.l.], v. 27, n. 1, p.381-389, fev. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/tpwrs.2011.2161351>>. Acesso em: out. 2018.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional.** 8. ed. São Paulo: Person Education do Brasil, 2008. 360 p.

THIAM, F. B.; DEMARCO, C. L. Automated Transmission Expansion and Routing Incorporating Electric and Geographic Criteria. **IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference**, p. 1-5, 2016.

WEEDY, B. M. Environmental aspects of route selection for overhead lines in the USA. **Electric Power Systems Research**, v. 16, n. 3, p. 217-226, 1989.