

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME SANTANNA CASTIGLIO

**DETERMINAÇÃO DE TRAÇADOS DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO
UTILIZANDO SISTEMAS DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Porto Alegre
2022

GUILHERME SANTANNA CASTIGLIO

**DETERMINAÇÃO DE TRAÇADOS DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO
UTILIZANDO SISTEMAS DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Energia

ORIENTADORA: Profa. Dra. Mariana Resener

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Juliana Klas

Porto Alegre
2022

GUILHERME SANTANNA CASTIGLIO

**DETERMINAÇÃO DE TRAÇADOS DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO
UTILIZANDO SISTEMAS DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientadora: _____
Profa. Dra. Mariana Resener, UFRGS
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eliseu José Weber, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Joel David Melo Trujillo, UFABC
Doutor pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – São
Paulo, Brasil

Prof. Dr. Sérgio Haffner, UFRGS
Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____
Prof. Dr. Sérgio Haffner

Porto Alegre, julho de 2022.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares que sempre me apoiaram durante esta trajetória, em especial à minha mãe Simone, minha avó Cibila, meu irmão Vinicius, meu pai Eduardo e ao Vitor, por toda parceria e carinho.

Às Professoras Mariana e Juliana pela orientação e por todos ensinamentos e conselhos que tiveram grande contribuição para elaboração deste trabalho.

A todos os colegas, professores e servidores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRGS.

Por fim, à minha companheira, Dominique, pela compreensão e apoio nos momentos mais difíceis.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo aplicar um método de determinação de traçados de linhas de transmissão utilizando conceitos de análise de decisão multicritério e sistemas de informação geográfica. O método adotado consiste em determinar as rotas das novas linhas a partir de critérios que abrangem aspectos ambientais, sociais e técnico-econômicos. Estes critérios são representados espacialmente através de camadas de dados de estrutura matricial com pontuações de atratividade atribuídas às células. O processo de determinação do traçado é caracterizado como um problema de obtenção de um caminho de menor custo em uma superfície que unifica as camadas de critérios. Inicialmente, optou-se por implementar o algoritmo de Dijkstra, com o objetivo de obter caminhos de custo mínimo em quatro experimentos genéricos, e realizar uma análise comparativa com os resultados obtidos através da simulação dos mesmos experimentos na plataforma ArcGIS®. Para todas as simulações foram obtidas as mesmas rotas e também custo final, evidenciando bom desempenho do algoritmo implementado. Para três estudos de caso propostos, utilizou-se a plataforma ArcGIS® para modelagem dos dados geoespaciais e determinação de traçados através de cenários de variação de pesos dos critérios, considerando perspectiva neutra, ambiental, social e técnico-econômica. De maneira geral, os cenários obtidos apresentaram redução de travessias em áreas sensíveis do ponto de vista socioambiental, no entanto, representando um acréscimo de comprimento dos traçados. Ainda, verificou-se que a variação dos pesos dos critérios, a partir das perspectivas dos cenários, impactaram significativamente nos traçados obtidos.

Palavras-chave: Expansão da Transmissão, Linha de Transmissão, Sistemas de Informação Geográfica, Análise de Caminho de Custo Mínimo, Análise de Decisão Multicritério.

ABSTRACT

This work aims to apply a method for determining routes of transmission lines using concepts of multi-criteria decision analysis and geographic information systems. The adopted method consists of determining the routes from environmental, social and technical-economic criteria. These criteria are spatially represented through layers of matrix structure with attractiveness scores assigned to the cells. The process of determining the route is characterized as a problem of obtaining a least cost path on a surface that unifies the layers of criteria. Initially, a computational code based on Dijkstra's algorithm was implemented, with the objective of obtaining paths of minimum cost in four generic experiments, and carry out a comparative analysis with the results obtained through the simulation of the same experiments in the ArcGIS® platform. For all simulations, the same routes and final cost were obtained, showing good performance of the implemented code. For three case studies, the ArcGIS® platform was used to model geospatial data and determine routes through scenarios of variation of criteria weights, considering a neutral, environmental, social and technical-economic perspective. In general, the scenarios obtained showed a crossings reduction in sensitive areas from the socio-environmental point of view, however, representing an increase in the length of the routes. Additionally, it was verified that the variation of the criteria weights, from the perspectives of the scenarios, caused a significant impact on the routes obtained.

Keywords: Transmission Expansion Planning, Transmission Line, Geographic Information Systems, Least Cost Path Analysis, Multicriteria decision analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Evolução do comprimento total de linhas de transmissão no SIN . . .	12
Figura 2 –	Principais etapas no processo de elaboração dos estudos de planejamento	18
Figura 3 –	Relações do SIG com outros sistemas de tecnologia	27
Figura 4 –	Representação de dados geoespaciais através do modelo matricial e vetorial	29
Figura 5 –	Exemplo genérico de rasters categóricos	30
Figura 6 –	Representação gráfica de pontos, linha e polígono	31
Figura 7 –	Exemplo de operação de reclassificação	33
Figura 8 –	Exemplo de composição de uma superfície de custo de critérios . . .	34
Figura 9 –	Exemplo de elaboração de superfície de custo genérica	35
Figura 10 –	Padrões de adjacência de vizinhança de células	36
Figura 11 –	Etapas adotadas no desenvolvimento do trabalho	44
Figura 12 –	Frequência de abordagem de critérios presentes nas publicações analisadas	47
Figura 13 –	Pontuações normalizadas para subcritérios da classe ambiental	53
Figura 14 –	Pontuações normalizadas para subcritérios da classe social	55
Figura 15 –	Pontuações normalizadas para subcritérios da classe técnico-econômica	56
Figura 16 –	Pontuação normalizada para risco geológico e declividade	57
Figura 17 –	Categorias de unidades de conservação	60
Figura 18 –	Localização das linhas de transmissão adotadas como estudo de caso	68
Figura 19 –	Etapas da aplicação de <i>Least Cost Path Analysis</i> no ArcGIS®	71
Figura 20 –	Raster de entrada e saída na aplicação da ferramenta <i>cost distance</i> . .	72
Figura 21 –	Codificação adotada para indicação de direção	73
Figura 22 –	Raster de direção de custo do exemplo genérico	73
Figura 23 –	Caminho de menor custo para exemplo genérico	74
Figura 24 –	Superfície de custo genérica utilizada no experimento 1	78
Figura 25 –	Caminho de menor custo obtido no experimento 1 (código implementado)	79
Figura 26 –	Caminho de menor custo obtido no experimento 1 (ferramentas LCPA)	79
Figura 27 –	Superfície de custo genérica utilizada no experimento 2	80
Figura 28 –	Caminho de menor custo obtido no experimento 2 (código implementado)	81
Figura 29 –	Caminho de menor custo obtido no experimento 2 (ferramentas LCPA)	81
Figura 30 –	Superfície de custo genérica utilizada no experimento 3	82
Figura 31 –	Caminho de menor custo obtido no experimento 3 (código implementado)	83

Figura 32 – Caminho de menor custo obtido no experimento 3 (ferramentas LCPA)	83
Figura 33 – Superfície de custos genérica experimento 4	84
Figura 34 – Caminho de menor custo obtido no experimento 4 (código implementado)	85
Figura 35 – Caminho de menor custo obtido no experimento 4 (ferramentas LCPA)	85
Figura 36 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 1 e 2 do Estudo de Caso 1	88
Figura 37 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 3 e 4 do Estudo de Caso 1	89
Figura 38 – Presença de subcritérios na região do Estudo de Caso 1	90
Figura 39 – Presença de subcritérios na região do Estudo de Caso 1	90
Figura 40 – Presença de subcritérios na região do Estudo de Caso 1	91
Figura 41 – Travessias em células de subcritérios relacionados ao uso do solo e declividade para o Estudo de Caso 1	93
Figura 42 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 1 e 2 do Estudo de Caso 2	94
Figura 43 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 3 e 4 do Estudo de Caso 2	94
Figura 44 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 2	96
Figura 45 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 2	96
Figura 46 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 2	97
Figura 47 – Travessias em células de subcritérios relacionados ao uso do solo e declividade para o Estudo de Caso 2	99
Figura 48 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 1 e 2 do Estudo de Caso 3	100
Figura 49 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 3 e 4 do Estudo de Caso 3	101
Figura 50 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 3	102
Figura 51 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 3	102
Figura 52 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 3	103
Figura 53 – Travessias de subcritérios relacionados a uso do solo e declividade para o Estudo de Caso 3	105
Figura 54 – Quantidade total de células cruzadas por cenário simulado e classe de critério	106
Figura 55 – Percentual de compartilhamento de corredor com projeto original para simulações dos estudos de caso	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Quadro resumo da revisão bibliográfica	42
Tabela 2 –	Publicações adotadas para determinação das pontuações e pesos de critérios	46
Tabela 3 –	Conjunto de critérios e subcritérios adotados como referência	48
Tabela 4 –	Escala de pontuação atribuída para subcritérios	51
Tabela 5 –	Pesos adotados para os critérios	52
Tabela 6 –	Cenários de pesos das classes de critérios	52
Tabela 7 –	Pontuação atribuída para os subcritérios adotados neste trabalho	59
Tabela 8 –	Caracterização dos dados geoespaciais utilizados	60
Tabela 9 –	Comparação de resultados obtidos para experimento 1	80
Tabela 10 –	Comparação de resultados obtidos para experimento 2	82
Tabela 11 –	Comparação de resultados obtidos para experimento 3	84
Tabela 12 –	Comparação de resultados obtidos para experimento 4	86
Tabela 13 –	Tempos de simulação para os experimentos	86
Tabela 14 –	Comprimento e custo final para cenários do Estudo de Caso 1	87
Tabela 15 –	Quantidade de células cruzadas para cada subcritério do Estudo de Caso 1	92
Tabela 16 –	Comprimento e custo final dos cenários do Estudo de Caso 2	95
Tabela 17 –	Quantidade de células cruzadas para cada subcritério no Estudo de Caso 2	98
Tabela 18 –	Comprimento e custo final dos cenários do Estudo de Caso 3	101
Tabela 19 –	Quantidade de células cruzadas para cada subcritério no Estudo de Caso 3	104
Tabela 20 –	Quantidade de células cruzadas para cada critério dos Cenários 1 e 2	107
Tabela 21 –	Quantidade de células cruzadas para cada critério dos Cenários 3 e 4	107

LISTA DE ABREVIATURAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APA	Área de Proteção Ambiental
APP	Área de Preservação Permanente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CECAV	Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FAHP	<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process</i>
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
LCPA	<i>Least Cost Path Analysis</i>
LT	Linha de Transmissão
MCDA	<i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSP	<i>Multi-Objective Shortest Path</i>
PAR	Plano de Ampliações e Reforços
PET	Planejamento da Expansão da Transmissão
PELP	Programa de Expansão de Longo Prazo
PIB	Produto Interno Bruto
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIN	Sistema Interligado Nacional
UC	Unidades de Conservação

SUMÁRIO

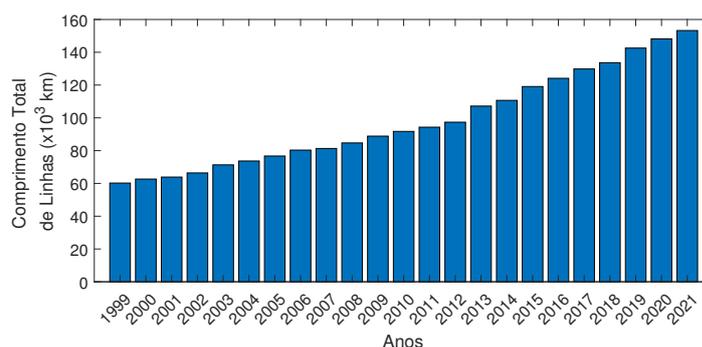
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	15
1.2	Contribuições	15
2	DEFINIÇÃO DE TRAÇADOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	17
2.1	Planejamento da expansão da transmissão no Brasil	17
2.1.1	Estrutura e etapas do processo	17
2.1.2	Principais critérios envolvidos na determinação dos traçados	20
2.2	A Abordagem SIG-MCDA na determinação de traçados de estruturas lineares	24
2.2.1	Principais aspectos de métodos de análise de decisão multicritério	24
2.2.2	Principais aspectos dos sistemas de informação geográfica	26
2.2.3	Formulação do problema e principais aspectos da abordagem	32
2.3	Revisão da literatura	38
2.3.1	Métodos aplicados ao roteamento de linhas de transmissão	38
2.3.2	Quadro resumo da revisão da literatura	41
3	METODOLOGIA	44
3.1	Caracterização da análise multicritério	46
3.1.1	Elaboração das superfícies de custos	49
3.1.2	Pontuação de atratividade dos subcritérios	50
3.1.3	Pesos dos critérios	51
3.1.4	Pesos das classes de critérios	52
3.1.5	Análise das pontuações normalizadas	53
3.1.6	Pontuação atribuída para os subcritérios	58
3.2	Caracterização da análise espacial	59
3.2.1	Unidades de conservação	60
3.2.2	Rotas de aves silvestres	61
3.2.3	Áreas de preservação permanente	61
3.2.4	Cavidades naturais subterrâneas	62
3.2.5	Formações florestais	62
3.2.6	Rios, córregos e lagos	63
3.2.7	Áreas úmidas	63
3.2.8	Terras indígenas, comunidades quilombolas e assentamentos rurais	63
3.2.9	Patrimônio histórico	64
3.2.10	Áreas de mineração	64

3.2.11	Áreas de agricultura e silvicultura	64
3.2.12	Campos e pastagens	65
3.2.13	Áreas urbanas	65
3.2.14	Linhas de transmissão e rodovias existentes	65
3.2.15	Risco geológico	66
3.2.16	Declividade do terreno	66
3.2.17	Velocidade média dos ventos	67
3.2.18	Aeródromos	67
3.3	Estudos de caso e implementação das análises	67
3.3.1	Características dos Estudos de Caso	67
3.3.2	Consolidação da análise espacial e multicritério	69
3.4	Análise de caminho de custo mínimo	70
3.4.1	Análise de caminhos de custo mínimo no ArcGIS®	70
3.4.2	Algoritmo de Dijkstra implementado	74
4	RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO E EXPERIMENTOS PRO- POSTOS	78
4.1	Verificação do algoritmo de caminho de custo mínimo	78
4.1.1	Experimento 1	78
4.1.2	Experimento 2	80
4.1.3	Experimento 3	82
4.1.4	Experimento 4	84
4.1.5	Discussão dos resultados dos experimentos	86
4.2	Simulações dos estudos de caso	87
4.2.1	Estudo de Caso 1	87
4.2.2	Estudo de Caso 2	93
4.2.3	Estudo de Caso 3	99
4.2.4	Discussão geral sobre os resultados	105
5	CONCLUSÃO	110
5.1	Publicações realizadas	112
5.2	Estudos futuros	112
	REFERÊNCIAS	115
APÊNDICE A	CUSTO FINAL ASSOCIADO À CADA SUBCRITÉRIO NA ABORDAGEM ADOTADA	125
APÊNDICE B	EXEMPLO GENÉRICO DO ALGORITMO DE DIJKSTRA	128

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do consumo de energia elétrica de um país pode estar relacionado com aspectos sociais, ambientais e econômicos. Destacando-se, principalmente, o aumento de sua população, o nível de industrialização, crescimento do PIB, indicadores de qualidade de vida, assim como políticas de preservação e utilização dos recursos naturais. Nas últimas décadas, observa-se que o crescimento da inserção das fontes renováveis na matriz de geração de energia elétrica, contribuiu para discussões em nível mundial acerca da inclusão da sustentabilidade na cadeia de geração, transmissão e distribuição de eletricidade. O sistema elétrico de potência é um dos sistemas industriais de maior escala feito pelo homem e encontra-se em estado de expansão permanente. Além disso, nos próximos anos verifica-se uma forte tendência de eletrificação de equipamentos em diferentes formas de consumo (transporte, conforto, entre outros) (GÓMEZ-EXPÓSITO; CONEJO; CAÑIZARES, 2018), contribuindo fortemente para o aumento do consumo de energia elétrica e necessidade de expansão dos sistemas elétricos. Desta forma, alinhar as novas expectativas da sociedade com os interesses dos *stakeholders* que participam do processo de expansão do setor elétrico, tem tornado ainda mais complexa a tarefa de elaborar o planejamento e gestão estruturada deste processo, no qual, os sistemas de transmissão possuem significativa relevância. A Figura 1 mostra a evolução do comprimento total de linhas de transmissão dos últimos 22 anos no sistema interligado nacional (SIN) do Brasil.

Figura 1 – Evolução do comprimento total de linhas de transmissão no SIN



Fonte: Adaptado de (ONS, 2021)

O comprimento total das linhas de transmissão no Brasil teve evolução significativa nas últimas décadas, duplicando de tamanho em aproximadamente 17 anos. Em 2022, o SIN possui aproximadamente 158.000 km de linhas de transmissão e estima-se o acréscimo de 40.000 km de novas linhas até o ano de 2030, com investimento aproximado de 62,5 bilhões de reais (EPE, 2020a). Neste contexto, invariavelmente o processo de planejamento da expansão do sistema de transmissão culmina na sua fase final em obras com impacto socioambiental e econômico significativos, nas quais a definição do traçado das novas linhas de transmissão influencia diretamente em todos os aspectos do projeto. Segundo a EPE (2020b), na próxima década, um dos principais desafios do planejamento da expansão da transmissão (PET) no Brasil diz respeito à crescente complexidade socioambiental e fundiária para a implantação de novos projetos de transmissão, tendo em vista o aumento do custo fundiário em regiões urbanas e periurbanas além de todas as complexidades socioambientais relacionadas às unidades de conservação, territórios indígenas, assentamentos rurais e comunidades quilombolas.

O Parlamento Europeu estabeleceu como objetivos para construção das grandes linhas de transmissão que farão parte do sistema europeu de transmissão de energia elétrica nos próximos anos, a implantação de um sistema colaborativo para definição de traçados, com participação ativa da população e agentes interessados, além do estabelecimento de um planejamento em que a construção da nova linha esteja integrada ao meio ambiente da forma mais harmoniosa possível (EC, 2019). Esta medida está em consonância com o fato de que nos últimos anos tem crescido o rigor quanto aos requisitos legais das obras (licenciamento ambiental e impactos sociais), assim como o aumento do interesse da população em participar do processo de tomada de decisão para definir os traçados das novas linhas de transmissão (SCHITO; MONCECCHI; RAUBAL, 2021; MUELLER; KEIL; BAUER, 2017). Portanto, um dos principais desafios do PET diz respeito a necessidade de integração de objetivos conflitantes em um cenário cada vez mais complexo de aspectos sociais, econômicos, tecnológicos e ambientais, substituindo gradativamente os modelos em que a minimização de custos financeiros represente um objetivo único (SAN CRISTÓBAL, 2012).

Segundo Reis e Santos (2006) um dos aspectos relevantes para alinhamento do setor elétrico ao desenvolvimento sustentável passa pelo desenvolvimento tecnológico em busca de maior eficiência e, sobretudo, de alternativas ambientalmente benéficas ou menos impactantes, processo que deve englobar todas as atividades associadas ao ciclo de vida do setor energético. Pode-se dizer que um dos principais desafios do PET no que diz respeito a definição de traçados de linhas de transmissão é a internalização da sustentabilidade de maneira sistemática no processo contínuo de tomada de decisão. No entanto, no que diz respeito aos projetos da transmissão, nota-se que, em geral, o tema dos impactos socioambientais é tratado pela abordagem dos custos ambientais, que consideram apenas os impactos estabelecidos por lei ou regulamentação governamental, resumindo

a questão socioambiental à uma externalidade no processo de determinação dos traçados (FURTADO, 2016). Entende-se que a alocação de recursos será melhor realizada, somente quando todos os aspectos envolvidos neste tipo de projeto sejam avaliados de maneira integrada, isto é, quando houver a internalização dos impactos socioambientais no processo de tomada de decisão (GÓMEZ-EXPÓSITO; CONEJO; CAÑIZARES, 2018).

Neste contexto, o desenvolvimento manual do traçado de uma linha de transmissão em um ambiente complexo se trata de um processo exaustivo, que consome tempo e possui alto grau de complexidade, além de não representar a otimalidade de solução (SHU *et al.*, 2011). A determinação automatizada de rotas de uma linha de transmissão pode ser definida como um processo de otimização que busca minimizar os custos de instalação e manutenção dos equipamentos, sujeito a restrições geográficas, ambientais, sociais e legais (MONTEIRO *et al.*, 2005). Desta forma, as ferramentas presentes em softwares que trabalham com sistemas de informação geográfica (SIG) vem sendo incorporadas a métodos de análise de decisão multicritério, do inglês, *multicriteria decision analysis* (MCDA), que possuem como objetivo estabelecer métodos que viabilizem a determinação de traçados de novas linhas considerando todos os aspectos envolvidos neste tipo de projeto. O SIG pode ser definido como um sistema automatizado utilizado para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, que representem objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la (CAMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001) e já vem sendo aplicado em diversas áreas dos sistemas de potência (SHAFIULLAH *et al.*, 2016). Por sua vez, a análise de decisão multicritério representa um conjunto de ferramentas que, para determinado problema, propõem uma avaliação sistemática de uma série de possibilidades frente a diferentes critérios e objetivos (VOOGD, 1982).

Utilizando a abordagem integrada de SIG e MCDA no processo de definição de traçados de linhas de transmissão, busca-se a determinação de traçados considerando critérios econômicos, técnicos e socioambientais. Em geral, tais critérios são modelados através de superfícies de custo (também chamadas de superfícies de impedância ou atrito), nas quais são atribuídos valores numéricos (pontuações de atratividade ou pesos de aptidão) considerando a atratividade de se construir um trecho da linha em determinada região, com determinada feição ou atributo geográfico (LIMA *et al.*, 2016; PIVETEAU, 2017; BACHMANN *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2019).

Um dos principais desafios deste tipo de abordagem está relacionado com a determinação destas pontuações, que em geral, são obtidas a partir de pesquisas estruturadas com especialistas na área. Neste contexto, o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) apresentado por Saaty (1977) é um dos métodos mais utilizados, devido sua flexibilidade e abordagem simplificada (HO; MA, 2018). O segundo desafio da abordagem é determinar o traçado das linhas de transmissão, em uma superfície de custo que consolida todas as pontuações

determinadas nas pesquisas estruturadas. Em geral, para solução deste problema, adota-se a análise de caminho de custo mínimo, e neste caso, o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA *et al.*, 1959) apresenta um método eficiente para solução do problema. Este tipo de abordagem auxilia o planejador do sistema a ter uma visão integrada de todos os critérios envolvidos no projeto, permitindo uma avaliação mais assertiva dos pontos de maior sensibilidade, não apenas no que diz respeito a custos econômicos, mas também a impactos ambientais e sociais. No Brasil, esta abordagem se torna mais necessária, tendo em vista as dimensões continentais do país, diferentes características climáticas, econômicas, de relevo, de biomas, dinâmicas populacionais e usos do solo, além de um sistema elétrico amplamente malhado.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é aplicar um método para determinação de traçados de linhas de transmissão utilizando conceitos de análise de decisão multicritério e ferramentas de sistemas de informação geográfica. Para isso, determinou-se um conjunto de critérios divididos em três classes (sociais, ambientais e técnico-econômicos), que possuem aplicabilidade no contexto brasileiro da expansão da transmissão. Busca-se assim, investigar os efeitos da variação dos pesos de critérios nos traçados obtidos para os estudos de caso considerados. Além disso, busca-se identificar os critérios que possuem maior influência na abordagem, assim como, discutir as similaridades entre os traçados obtidos através da aplicação da metodologia com traçados reais de linhas de transmissão.

Desta forma, os objetivos específicos deste trabalho são:

1. a partir da revisão bibliográfica e modelagem SIG-MCDA, elaborar um conjunto de critérios que possuam aplicabilidade no contexto do planejamento da expansão da transmissão no Brasil;
2. aplicar a modelagem em estudos de caso, determinando cenários de projeto a partir da variação dos pesos dos critérios;
3. utilizar software SIG para obter diferentes traçados para cada estudo de caso, considerando os cenários estabelecidos; e
4. avaliar o impacto da variação dos pesos de critérios nos traçados obtidos.

1.2 Contribuições

Este trabalho visa contribuir e colaborar nos seguintes aspectos:

1. discutir a avaliação integrada de aspectos sociais, ambientais e técnico-econômicos na determinação de traçados de linhas de transmissão;

2. colaborar na determinação de critérios aplicáveis para utilização da abordagem SIG-MCDA, no contexto brasileiro da expansão dos sistemas de transmissão; e
3. avaliar e discutir cenários de pesos de classes de critérios sob diferentes perspectivas de projeto e seu impacto nos traçados de linhas de transmissão adotadas como estudo de caso.

2 DEFINIÇÃO DE TRAÇADOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo, são apresentados alguns conceitos e processos relacionados ao planejamento da expansão da transmissão no Brasil. Discute-se a análise SIG-MCDA aplicada na determinação de traçados de linhas de transmissão, com foco no detalhamento de alguns métodos MCDA, dos principais aspectos de SIG e formulação do problema e, na última seção é apresentada a revisão da literatura.

2.1 Planejamento da expansão da transmissão no Brasil

O planejamento da expansão dos sistemas de transmissão consiste na elaboração sistemática das ações e decisões a serem tomadas frente a um ou mais cenários possíveis de crescimento do mercado de energia elétrica, visando o atendimento do consumidor final, ao mínimo custo, considerando critérios de confiabilidade e com qualidade adequada. Os custos de implantação dos novos sistemas são fixados pelo agente regulador e incorporados em um processo licitatório de concessão para construção e manutenção. O processo é aberto para a participação e propostas de empresas interessadas através da condução do agente regulador (GÓMEZ-EXPÓSITO; CONEJO; CAÑIZARES, 2018; JANNUZZI; SWISHER, 1997). As empresas vencedoras são as que apresentam a menor proposta de construção e exploração dos ativos, ou seja, estabelecem um deságio em relação ao preço de referência estabelecido.

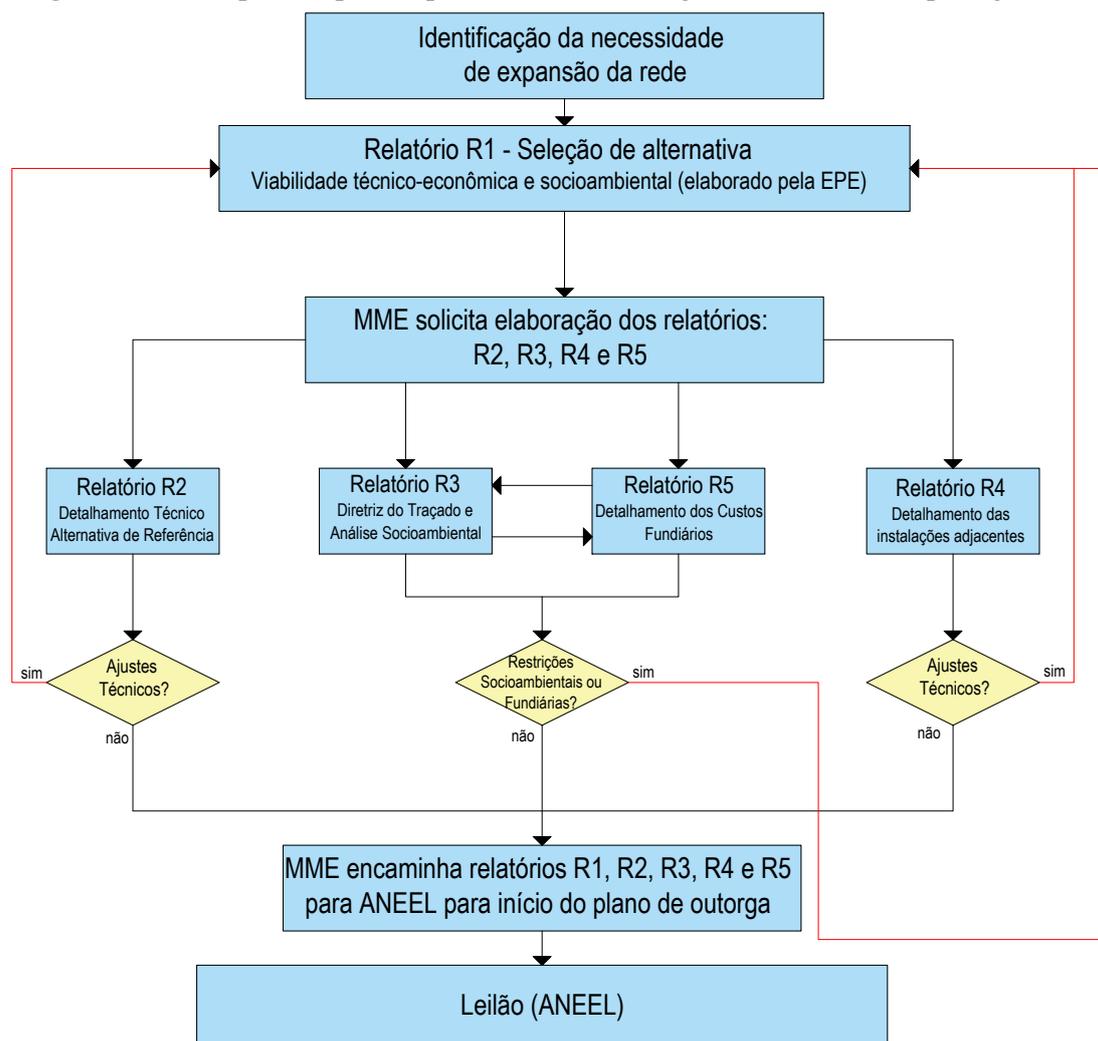
2.1.1 Estrutura e etapas do processo

O processo de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica no Brasil é centralizado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), possui caráter determinativo, em que as novas instalações a serem integradas à rede básica são recomendadas por estudos de planejamento, técnicos e econômicos. Neste contexto, o MME utiliza a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) como braço de apoio para elaboração dos estudos e relatórios técnicos, visando subsidiar o processo licitatório de concessão ou de autorização de reforços, que por sua vez, é condu-

zido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2004). As principais motivações técnicas para elaboração dos estudos de planejamento são: garantir o atendimento ao mercado das distribuidoras, escoamento dos potenciais de geração, integração dos sistemas isolados e criação de novas interligações internacionais e regionais.

No que diz respeito aos estudos técnicos, a EPE possui um protagonismo significativo, sendo responsável por elaborar e supervisionar uma cadeia de estudos que culmina nos leilões da transmissão. Além de realizar um planejamento proativo que antecipa as recomendações de reforços estruturantes, evitando desconexões entre a expansão da geração e transmissão (ANEEL, 2020). O ONS possui uma participação colaborativa, elaborando o Plano de Ampliações e Reforços (PAR) no horizonte de cinco anos de planejamento, no qual são discutidas todas as ampliações e os reforços necessários na Rede Básica para garantir a qualidade no atendimento, a segurança e confiabilidade do SIN. A Figura 2 apresenta um fluxograma com a contextualização dos procedimentos realizados até a etapa de outorga e execução dos leilões.

Figura 2 – Principais etapas no processo de elaboração dos estudos de planejamento



Fonte: adaptado de (EPE, 2018)

O processo inicia com a identificação da necessidade de um estudo de expansão em determinada região do país e, através de uma justificativa técnica, apresenta-se os motivos pelos quais o sistema de transmissão deve ser reforçado. Então, elabora-se o Relatório R1, onde são indicados os empreendimentos ou ampliações que compõem a melhor alternativa para equacionar uma necessidade do sistema, com base em análises técnico-econômicas e socioambientais (EPE, 2018). A partir desta premissa, é realizada a preparação da base de dados e a elaboração de um estudo de alternativas, que compreende estudos elétricos de confiabilidade (critério N-1 e N-2), estabilidade eletromecânica, transitórios eletromecânicos e níveis de curto circuito. Então, a partir da alternativa escolhida é realizado um estudo de viabilidade econômica e análise de impacto socioambiental. Caso sejam identificados pontos de ajuste, o processo deve ser realimentado a partir do diagnóstico e elaboração de alternativas.

Para complementação do processo, são elaborados outros quatro Relatórios R (R2, R3, R4 e R5) que detalham de maneira mais aprofundada aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais do projeto, e de maneira geral, são organizados da seguinte forma:

- no Relatório R2, é apresentado o detalhamento técnico da alternativa de referência determinada no R1, são realizados estudos mais aprofundados de análise e modelagem elétrica do comportamento da linha de transmissão sob diferentes condições de operação;
- no Relatório R3, é apresentado o detalhamento do traçado da linha de transmissão a partir do corredor preferencial previamente apresentado no R1, a empresa responsável por elaborar o relatório pode sugerir o extrapolamento do corredor preferencial do indicado pela EPE, no entanto, esta medida deve apresentar justificativa técnica;
- no Relatório R4, é realizado o detalhamento do sistema em que a nova linha de transmissão está inserida. São solicitadas aos concessionários proprietários de instalações de transmissão adjacentes ao novo empreendimento, informações e características técnicas das instalações, assim como requisitos necessários para que a nova linha opere de forma adequada com os sistemas circunvizinhos; e
- no Relatório R5, são discutidas as questões fundiárias e seus custos, uma vez que representam parcela relevante do investimento total, especialmente quando previstos em áreas urbanas, de expansão urbana, industriais ou de reflorestamento. Neste contexto, o relatório tem por objetivo estimar os custos fundiários decorrentes da implantação das novas instalações, considerando a diretriz preferencial da linha de transmissão elaborada no R3.

A partir da aprovação dos Relatórios R pelo MME, cabe a ANEEL elaborar os planos de outorga dos novos empreendimentos, realizar as licitações, acompanhar o andamento das obras em execução e trazer transparência ao processo.

2.1.2 Principais critérios envolvidos na determinação dos traçados

Para determinação de uma diretriz de traçado e do corredor preferencial no Relatório R1, a metodologia adotada pela EPE consiste em aplicar um método de análise de convergência, no qual pelo menos três especialistas avaliam diferentes alternativas de corredores com base nas informações geoespaciais, dados técnicos da linha e restrições socioambientais. Em uma segunda etapa, são realizadas reuniões conjuntas para determinação de uma diretriz e corredor de consenso entre os especialistas. Neste contexto, a EPE estabelece premissas adotadas nesta fase de projeto em que as áreas representadas pelos aspectos ambientais apresentados a seguir, devem ser desviadas sempre que possível (EPE, 2018):

- áreas de preservação permanente, sobretudo faixas marginais de cursos d'água, nascentes e encostas;
- áreas alagáveis, inundáveis, e de solos susceptíveis à erosão ou à desertificação
- áreas utilizadas para turismo, lazer e áreas de relevante beleza paisagística;
- cavidades naturais subterrâneas e suas respectivas áreas de influência;
- unidades de conservação e suas respectivas zonas de amortecimento;
- sítios de reprodução e descanso de aves, inclusive as migratórias;
- terras indígenas, territórios quilombolas e assentamentos rurais; e
- remanescentes de vegetação nativa.

Além disso, a EPE estabelece que as áreas representadas pelos aspectos sociais apresentados a seguir, também devem ser desviadas sempre que possível (EPE, 2018):

- áreas de silvicultura, de plantio de cana-de-açúcar e áreas irrigadas por meio de pivô central;
- áreas militares e depósitos de explosivos, de combustíveis, oleodutos, adutoras e similares;
- usinas hidrelétricas, parques eólicos e parques solares existentes ou planejados;
- estações de tratamento de água e esgoto;
- áreas urbanas, periurbana, de expansão urbana e industriais;
- áreas de mineração e campos de produção de petróleo;
- estações retransmissoras de televisão e telefonia; e

- áreas de cone de aproximação de aeródromos.

É possível notar que há uma preocupação em restringir a passagem de linhas de transmissão em áreas que podem causar impactos sociambientais ou implicações técnicas significativas para construção da linha de transmissão, acarretando possíveis atrasos na execução das obras em virtude de processos judiciais por disputas fundiárias ou ainda licenciamento ambiental complexo.

Para efeitos de legislação e fiscalização no Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente estabelece que impacto ambiental é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: (1) a saúde, a segurança e o bem-estar da população; (2) as atividades sociais e econômicas; (3) a biota; (4) as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; (5) a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986).

Invariavelmente, durante a fase de construção e operação da linha de transmissão, verificam-se impactos diretos à fauna e flora, impacto visual, nos recursos hídricos e no solo, assim como os efeitos causados pelo campo eletromagnético (WEEDY, 1989). Em uma abordagem ampla, pode-se dizer que os principais impactos socioambientais causados pela construção de linhas de transmissão são relacionados com: o uso da terra, os efeitos elétricos e os efeitos visuais (FURTADO, 1996).

Em Biasotto *et al.* (2017) são identificados os seguintes efeitos na fauna, flora ou atividade humana causados pela construção e operação de linhas de transmissão.

1. Efeito como barreira: linha de transmissão como um obstáculo físico para indivíduos, alteração no comportamento de espécies e morte da fauna por atropelamento nas estradas de acesso.
2. Linha como recurso: uso das estruturas da linha como recurso de habitat para espécies, acarretando morte por eletrocussão.
3. Criação de novos habitats: aumento da área/abundância de organismos ou colonização por novas espécies no local.
4. Perda de habitat: redução da quantidade e/ou qualidade de habitat para um determinado organismo.
5. Campo eletromagnético: respostas em organismos em relação à exposição dos mesmos ao campo eletromagnético.
6. Risco de incêndio: causado durante a operação da linha, acarretando prejuízo para fauna e flora local.

7. Poluição sonora: resposta de organismos ao ruído causado pela instalação ou operação de linhas de transmissão.
8. Poluição do ar: relacionada à fase de instalação e construção da linha de transmissão, altera-se a qualidade do ar devido a presença de máquinas e veículos de carga e transporte.
9. Alteração na qualidade do solo e dos recursos hídricos: o processo erosivo, contaminação do solo e recursos hídricos pode ocorrer na fase de construção de fundação das torres, supressão da vegetação e estruturas temporárias nas obras. As torres construídas no interior de corpos ou cursos d'água podem causar contaminação de mananciais e assoreamento.

Em geral a quantificação dos custos ambientais na fase de projeto de linhas de transmissão pode ser abordada através de dois métodos: o do custo de degradação e do custo de controle. O custo de degradação expressa o valor econômico dos danos ambientais causados pelo empreendimento. O método do custo de controle estima o valor econômico dos danos ambientais, através dos custos das ações, medidas e programas para evitar, mitigar e compensar os impactos (FURTADO *et al.*, 1999). Desta forma, no processo de roteamento tradicionalmente adotado pelos agentes transmissores, que busca o critério de mínimo custo do planejamento, não se identifica a representação dos custos impostos à sociedade, uma vez que os custos ambientais dos recursos naturais são abordados como externalidades (FURTADO, 1996).

Do ponto de vista técnico e de engenharia, o projeto das linhas de transmissão é um processo que se realimenta constantemente, devido às definições elétricas, mecânicas e do próprio traçado da mesma. Neste contexto, decisões técnicas possuem forte relação com o custo financeiro do projeto. A seguir está apresentado um conjunto de aspectos técnico-econômicos que estão presentes no processo de definição dos traçados e discutidos em Kiessling *et al.* (2003).

1. Aspectos geológicos e do solo: as torres têm papel de suportar o peso dos condutores e resistir à tensão mecânica, além disso, preservam uma distância mínima de segurança entre os cabos, entre os cabos e as torres e entre os cabos e o solo. O tipo de torre está relacionado com o solo e o tipo da linha, portanto, aspectos geológicos são de suma importância para estas definições, destacando-se o tipo de solo, de relevo, suscetibilidade a erosão e deslizamentos .
2. Comprimento da linha: a seção, tipo dos condutores e comprimento dos mesmos determinarão a intensidade máxima de corrente que a linha pode transmitir, ademais, possuem representatividade significativa no custo do projeto. Desta forma,

alterar o traçado e seu comprimento, implica muitas vezes a revisão de outros aspectos técnicos do projeto. Além disso, trocas de direção causando ângulos fechados na diretriz do traçado, devem ser evitadas.

3. Complexidade fundiária: o traçado da linha deve priorizar regiões menos valorizadas financeiramente, com baixa ocupação residencial e densidade populacional, e que via de regra, possuem terrenos com menor custo. Devem ser evitadas zonas com potenciais conflitos judiciais e elevado custo compensatório relacionados ao uso da terra.
4. Presença de acessos: acessos existentes ou de regiões que permitem a construção de acessos simplificados têm importância significativa, uma vez que reduz custos do projeto e facilita os procedimentos de manutenção futuros.
5. Campos eletromagnéticos: campos elétricos e magnéticos estão presentes em linhas de transmissão, devido a circulação de corrente nos condutores, desta forma, existem limites em que os seres humanos podem ser expostos, para evitar riscos à saúde. Deste modo, áreas com densidade populacional elevada tornam-se complexas, uma vez que distâncias mínimas entre condutores e construções devem ser respeitadas.
6. Condições climáticas e qualidade do ar: eventos como chuva, neve ou poluição podem causar pequenos distúrbios eletromagnéticos nas linhas, acarretando em perdas e reduzindo a eficiência e confiabilidade das mesmas, como consequência este efeito pode gerar ruídos de até 55 decibéis e, dependendo da região, podem causar perturbação aos seres humanos e animais. A velocidade dos ventos em uma determinada região também influencia o projeto de uma linha de transmissão, uma vez que podem auxiliar no processo de arrefecimento dos cabos, fato benéfico para operação da linha, mas também dependendo das intensidades das rajadas, podem causar danos às torres, exigindo projetos mais robustos de fundação e estruturas. Por fim, outro aspecto climático que influencia a operação das linhas de transmissão são as descargas atmosféricas, que podem causar interrupções, além de causar danos às estruturas.
7. Fauna e Flora: do ponto de vista técnico, estes aspectos podem influenciar na operação da linha, seja pelo estabelecimento de habitats ou colisões de aves e outros animais nas estruturas da linha, causando interrupções de fornecimento, ou ainda, formações florestais com árvores de altura elevada que entram em contato com condutores.

Nota-se, portanto, que os aspectos citados nesta seção representam critérios relevantes para construção de linhas de transmissão e, portanto, podem ser inseridos em uma

modelagem multicritério visando a determinação de traçados de linhas de transmissão utilizando a abordagem SIG-MCDA, processo que é discutido no próximo capítulo.

2.2 A Abordagem SIG-MCDA na determinação de traçados de estruturas lineares

Nesta seção, serão detalhados alguns conceitos dos métodos de análise de decisão multicritério e suas divisões quanto a aplicação. Além disso, são apresentados conceitos dos sistemas de informação geográfica com detalhamento referente a representação, funções e aplicações. Por fim, é apresentada a formulação do problema de determinação de traçados de linha transmissão utilizando a abordagem SIG-MCDA.

2.2.1 Principais aspectos de métodos de análise de decisão multicritério

A análise de decisão multicritério possui aplicação em diferentes áreas da engenharia, e tem como principal propósito fornecer um método sistemático para auxiliar tomadores de decisão a solucionar problemas complexos com elevado grau de incerteza, objetivos conflitantes, bases de dados e informações em grande volume, além de diferentes interesses e perspectivas de *stakeholders* (WANG *et al.*, 2009). A análise multicritério tem origem na pesquisa operacional e envolve uma ampla gama de metodologias e algoritmos. No contexto do PET, possuem significativa aplicação na avaliação integrada dos aspectos ambientais, sociais, econômicos e técnicos envolvidos neste tipo de planejamento, permitindo uma tomada de decisão mais assertiva considerando a prioridade de critérios (KUMAR *et al.*, 2017).

A análise multicritério é dividida em duas abordagens, os métodos multiatributo e os métodos multiobjetivo. Em geral, a análise multiobjetivo é aplicada a problemas com um número de variáveis de decisão contínuas e um conjunto de restrições bem definido, este tipo de problema é resolvido a partir da aplicação de uma técnica de otimização (HWANG; YOON, 1981). Portanto, compreendem uma ampla gama de abordagens dependendo do problema analisado. Na análise multiatributo, há um número discreto de alternativas e, em geral, se busca hierarquizar tais alternativas através de um método sistemático de avaliação e comparação entre os critérios considerados (SAN CRISTÓBAL, 2012). Os métodos multiatributos podem ser divididos de acordo com as seguintes classes de abordagens (MONCECCHI, 2020; MALCZEWSKI; RINNER, 2015):

- *Weighted Summation Methods*

Os métodos que utilizam a soma ponderada como base para determinação da hierarquia de alternativas são uma das abordagens mais simplificadas e populares na análise SIG-MCDA (MALCZEWSKI, 2006). O método mais conhecido neste tipo de abordagem é o *Simple Additive Weighting* (SAW), também conhecido como

Weighted Linear Combination (WLC) ou ainda *Weighted Sum Model* (WSM) proposto por (FISHBURN, 1967).

Neste método, um conjunto de alternativas é hierarquizada a partir de critérios de decisão, nos quais cada critério possui um peso e cada alternativa uma pontuação conforme a sua atratividade. Os pesos e as pontuações de cada alternativa são agregados através de uma média ponderada e hierarquizadas de acordo com seu valor numérico, que podem representar importância ou inaptidão, por exemplo. Destaca-se que a pontuação e os pesos, em geral, são atribuídos de acordo com pesquisas com especialistas no tema sendo abordado.

- *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

Este método foi desenvolvido por Saaty (1977), no qual para um dado problema com um número discreto de alternativas de soluções, busca-se hierarquizar tais alternativas seguindo alguns critérios de decisão. O problema é dividido em níveis e tem como base fundamental a elaboração de uma matriz de julgamentos, através da comparação pareada dos critérios para determinação de seus pesos de prioridade, o processo também se repete para a obtenção de pesos de prioridade das alternativas.

Para hierarquizar as possíveis soluções do problema, é realizado um processo similar ao método SAW, onde a partir da combinação linear entre pesos de critérios e alternativas, determina-se a mais atrativa a partir do objetivo estabelecido. A cada rodada de determinação da matriz de julgamentos, tanto para obtenção de pesos de critérios, quanto de alternativas, é avaliada a consistência dos valores obtidos. O AHP tem sido bastante aplicado em softwares SIG para determinação dos pesos associados às camadas dos mapas de atributos geográficos (critérios), permitindo que as camadas sejam sobrepostas considerando pesos para ponderação das mesmas segundo sua importância (MALCZEWSKI, 2006).

Uma variação do método AHP, chamada *Fuzzy Analytical Hierarchy Process* (FAHP) adota a lógica *fuzzy* para modelar os pesos de critérios através de intervalos de valores, podendo descrever de maneira mais assertiva os pesos atribuídos. Uma das principais vantagens deste tipo de abordagem é a atenuação dos erros associados a subjetividade das pesquisas estruturadas que determinam os pesos na abordagem clássica do AHP (EASTMAN, 1999).

- *Ideal point Methods*

Estes métodos consideram um conjunto de critérios de decisão e buscam minimizar a distância de todos os pontos em relação a um ponto de referência, identificado pelo tomador de decisão e definido como um ponto meta, ou seja, a melhor alternativa é a que mais se aproxima da solução ideal e fica mais distante da solução não ideal (SAN CRISTÓBAL, 2012).

A técnica mais conhecida com este tipo de abordagem é a *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) desenvolvido por Hwang e Yoon (1981). Apesar deste método posuir modelagem matemática mais refinada, ainda sim, existe uma parcela de subjetividade associada ao mesmo, uma vez que as pesquisas com especialistas ainda são adotadas para formação das pontuações e pesos (ISHIZAKA; NEMERY, 2013).

- *Outranking Methods*

Estes métodos têm uma abordagem baseada na sobreclassificação (ou subordinação), na qual os critérios são comparados em pares para determinação de seus pesos. No entanto, busca-se estabelecer uma relação de superação entre critérios, evidenciando qual conjunto possui maior atratividade, sendo os métodos ELECTRE e PROMETHEE os mais conhecidos e difundidos (WANG *et al.*, 2009; MONCECCHI, 2020). Estes métodos não realizam a agregação analítica para estabelecer um único peso de classificação, fato que os diferenciam dos métodos apresentados anteriormente, isto é, não há uma transformação de escalas de avaliações intracritérios para uma escala de avaliação global. Além disso podem apresentar resultados parciais nas recomendações de alternativas de soluções (YU *et al.*, 2011).

- *Delphi Method*

Outra metodologia bastante consolidada em processos de tomada de decisão e utilizada em (EPRI-GTC, 2006) e (EPRI-GTC, 2019) é o *Delphi Method*, desenvolvido em órgãos militares Estadunidenses no início da década de 1950, com objetivo principal de obter consenso confiável de um corpo técnico militar em relação a possíveis ataques inimigos (BOBERG; MONIS-KHOO, 1992). Trata-se de um painel com especialistas onde questões acerca do tema são respondidas de maneira sistemática e interativa, podendo ocorrer em pelo menos duas rodadas de questionamentos respondidos de maneira anônima pelos especialistas participantes. O processo é repetido até se atingir o consenso quanto aos objetivos pré-estabelecidos (WANG *et al.*, 2009).

A abordagem multiobjetivo, outro ramo da análise multicritério, é adotada quando o problema é contínuo no sentido que a melhor alternativa pode ser encontrada em qualquer lugar no interior da região de soluções viáveis. Na determinação de rotas de linhas de transmissão, em Bachmann *et al.* (2018) o problema é modelado através de *Multi-Objective Shortest Path* (MOSP).

2.2.2 Principais aspectos dos sistemas de informação geográfica

Definir um sistema de informação geográfica é uma tarefa complexa, pois o conceito pode ser abordado sob diferentes perspectivas, além disso, sofreu algumas alterações no

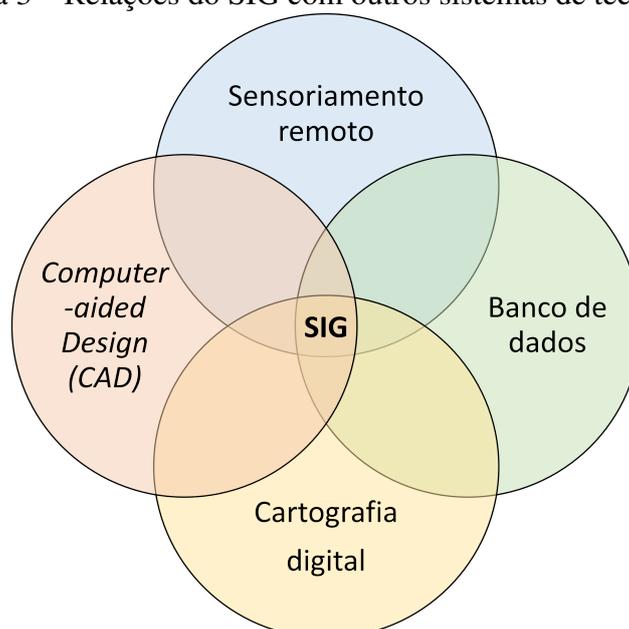
seu significado ao longo dos anos, uma vez que a tecnologia de geoprocessamento evoluiu consideravelmente. Desta forma, muitos autores divergem em alguns pontos básicos de sua definição.

Segundo Aronoff (1989) o SIG pode ser definido como um conjunto de procedimentos, manuais ou automatizados, utilizados para armazenamento e manuseio de informações georreferenciadas. Burrough, McDonnell e Lloyd (2015) e Longley *et al.* (2015) definem SIG como um conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, transformar e exibir dados espaciais para um determinado conjunto de propósitos. Neste contexto, os dados geográficos (ou geoespaciais) representam fenômenos do mundo real em termos de sua posição em relação a um sistema de coordenadas conhecido, seus atributos não relacionados à posição e as relações espaciais entre estes dados.

Em McCormac, Sarasua e Davis (2012) é apresentada uma definição simplificada através de um exemplo, supondo uma lista de municípios com informações sobre quantidade de habitantes, área territorial e número de habitações, este sistema de informações, se torna um SIG, no momento em que se inserem informações espaciais à lista, como por exemplo, as coordenadas geográficas das habitações ou limites territoriais dos municípios.

No contexto atual de desempenho computacional, o termo SIG é basicamente aplicado para sistemas que permitem a manipulação e tratamento computacional de dados geográficos, armazenando sua geometria e atributos (MCCORMAC; SARASUA; DAVIS, 2012; CAMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001). Portanto, de maneira geral o SIG possui uma multiplicidade de usos e visões possíveis através de uma perspectiva interdisciplinar de utilização, sendo assim, pode ser definido como um subconjunto de quatro tecnologias bastante consolidadas, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Relações do SIG com outros sistemas de tecnologia



Fonte: Adaptado de (MAGUIRE, 1991)

O Termo CAD, em inglês, *computer-aided design* refere-se aos softwares que permitem o desenvolvimento de projetos através de representação gráfica e são integrados ao SIG para representação vetorial de diferentes feições ou atributos de objetos. O sensoriamento remoto é a tecnologia de obtenção de informações de uma região sem o contato físico com a mesma, para isso utilizam-se sensores a bordo de aeronaves ou satélites, que rastreiam a superfície terrestre com o objetivo de registrar imagens de alta resolução. Os bancos de dados geográficos são conjuntos de dados organizados de maneira sistemática que compreendem todas as informações relacionadas aos atributos geográficos e suas informações. A cartografia digital é a ciência que compreende as ferramentas e técnicas advindas da cartografia clássica para manipulação e elaboração de mapas digitalizados.

Em síntese, o SIG é a ferramenta que materializa os conceitos de geoprocessamento, que nesse contexto, é um campo da cartografia que consiste na aplicação de um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento dos dados geoespaciais e informações geográficas (CAMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001; MONTEIRO *et al.*, 2004).

Desta forma, McCormac, Sarasua e Davis (2012) definem que o principal objetivo do SIG é tomar um dado bruto e transformá-lo, a partir de superposição de informações e cálculos analíticos, em uma nova informação que pode auxiliar o processo de tomada de decisão e que devem possuir cinco elementos essenciais para seu desenvolvimento, apresentados a seguir.

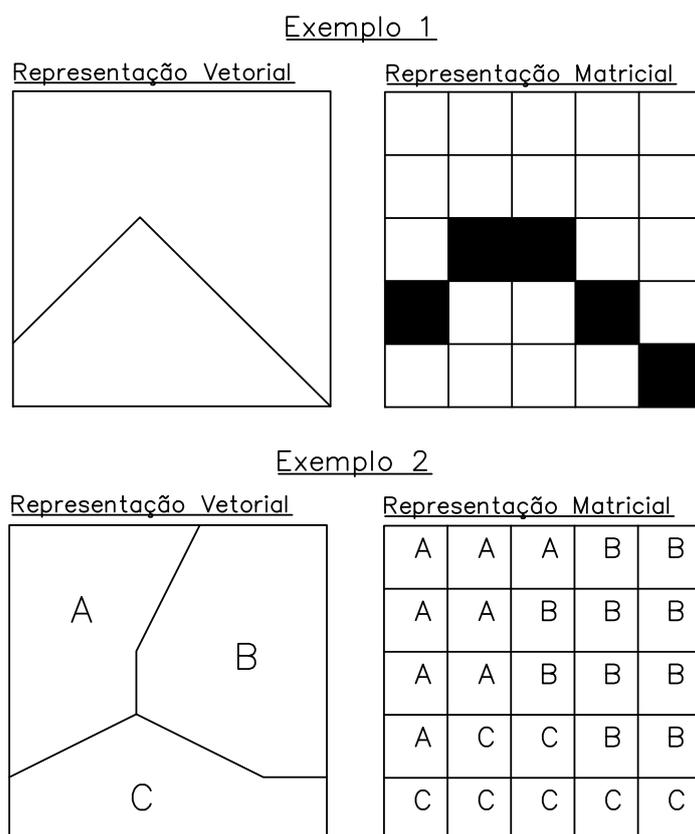
1. Aquisição de dados: nesta etapa, são obtidos todos os dados necessários para análise proposta. No entanto, muitas vezes estes dados não abrangem todas as informações necessárias ou se encontram em baixa resolução, e então, há necessidade de levantar os mesmos em campanhas de campo.
2. Pré-processamento: nesta etapa, os dados são manipulados para que possam ser compatibilizados e sobrepostos de maneira adequada, são eliminados objetos desnecessários na análise. Nesta etapa, devem ser corrigidas as incompatibilidades em relação à sistemas de coordenadas e projeção cartográfica.
3. Gerenciamento de dados: esta etapa compreende a organização sistemática de todas as informações extraídas dos dados brutos na etapa anterior, garantindo fácil acesso, segurança e padronização.
4. Manipulação e análise de dados: nesta etapa, são utilizados operadores analíticos para obtenção dos resultados desejados, as principais análises consistem em sobrepor camadas de dados, avaliação de zonas de influência, avaliação de caminho mínimo, cruzamento de informações cadastrais e atributos.
5. Geração de resultados e produto final: nesta etapa, são elaborados os mapas e demais produtos necessários para apresentação e ilustração dos resultados obtidos.

Estes níveis e etapas devem fazer parte de um processo contínuo em uma análise que utiliza um SIG para solução de determinado problema.

2.2.2.1 Representação digital de dados geoespaciais

Existem dois modelos principais para representação digital de dados geoespaciais, os modelos de estrutura matricial (raster) e os modelos de estrutura vetorial. No modelo matricial a área analisada é subdividida em pequenas células que compõem uma matriz e os objetos geográficos são representados nas células correspondentes de acordo sua posição geográfica real no espaço. No modelo vetorial, os objetos são representados por pontos, linhas ou polígonos, que definem seu limite e possuem uma coordenada geográfica. A Figura 4 ilustra as diferenças de representação.

Figura 4 – Representação de dados geoespaciais através do modelo matricial e vetorial



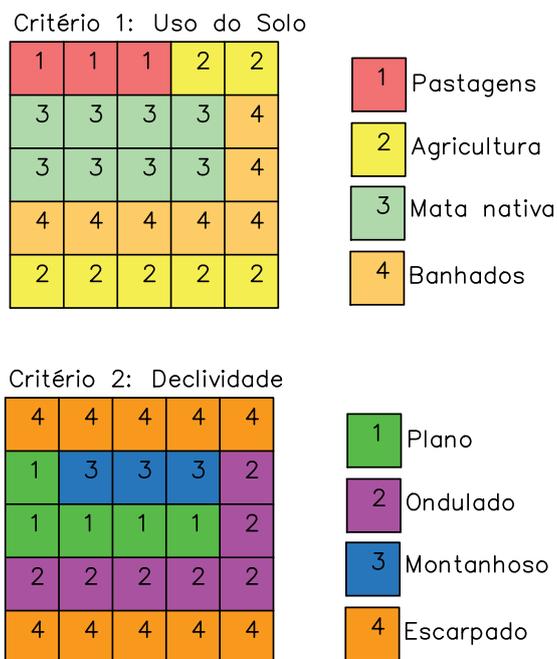
Fonte: do autor

No modelo matricial, a contagem de linhas e colunas segue a convenção clássica de qualquer matriz, sendo que suas células (também chamadas de *pixels*) possuem um espaçamento conhecido, chamado de resolução espacial e em geral, dada em metros.

Neste tipo de representação, cada célula admite um único valor correspondente a um atributo (característica) da superfície terrestre naquele local. Em geral, este tipo de re-

apresentação é utilizada para apresentação de dados chamados categóricos, ou seja, cada célula recebe um valor numérico que representa determinada categoria de atributo geográfico, assim como detalhado na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo genérico de rasters categóricos



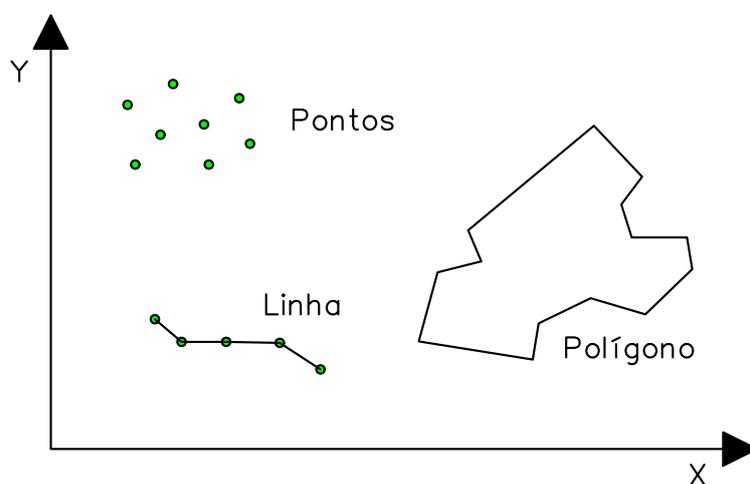
Fonte: do autor

É possível notar que, na representação matricial, não existem linhas, mas sim preenchimento de células independentes, as feições são representadas pelo agrupamento de *pixels* com o mesmo valor, que são exibidos com a mesma cor. Como cada célula só admite um valor, a representação de vários atributos para uma mesma área exige o uso de várias matrizes, uma para cada atributo, portanto, este tipo de representação remete ao conceito de camadas de dados. Como cada célula pode ter um valor distinto das vizinhas, o modelo matricial é ideal para representar dados que apresentam variação contínua no espaço, devido à estrutura simples (valores numéricos em linhas e colunas), o processamento computacional é eficiente, no entanto, os arquivos raster são compostos, frequentemente, por milhões de células (WEBER, 2021; MCCORMAC; SARASUA; DAVIS, 2012).

Uma desvantagem deste tipo de modelo é perceptível na Figura 4, uma vez que uma mesma célula pode receber um único valor numérico, atribuído à uma categoria de atributo geográfico, a mesma não pode representar diferentes atributos. Portanto, em ocasiões que a região, modelada através de um arquivo matricial possuir diferentes atributos que cruzem uma mesma célula, é utilizada a regra do uso predominante para definir por qual atributo a célula representará, ou seja, a célula passa a representar aquele atributo que cobre uma maior porcentagem de sua área.

No modelo vetorial, as feições geográficas são representadas pelo traçado ou delimitação de suas fronteiras e o espaço não é preenchido. As entidades do mundo real são representadas por pares de coordenadas e divididas em pontos, linhas ou polígonos. Um ponto pode ser definido por um simples par de coordenadas, uma linha é representada por um conjunto de pares de coordenadas interligadas por segmentos de retas, possuindo apenas comprimento e representando a feição linear de um objeto. O polígono é composto por pares de coordenadas interligadas em uma cadeia fechada, definindo uma superfície bidimensional que possui área e perímetro (WEBER, 2021). A Figura 6 apresenta a representação gráfica genérica destes objetos.

Figura 6 – Representação gráfica de pontos, linha e polígono



Fonte: do autor

Neste modelo, os atributos das feições geográficas são armazenados usando tabelas vinculadas à representação gráfica, que podem conter vários campos (colunas), tanto com valores numéricos quanto caracteres de texto. O uso de múltiplos campos possibilita armazenar simultaneamente vários atributos para uma mesma feição geográfica, sem precisar repetir o armazenamento da representação gráfica várias vezes como no modelo matricial. Para armazenar dados em arquivos matriciais, são utilizadas diversas camadas de dados em que cada camada representa um determinado atributo para a mesma região. Por sua vez, na representação vetorial, um mesmo objeto geográfico possui uma tabela que consolida todos os seus atributos. A relação entre a representação gráfica e os atributos é feita por um identificador único (id) para cada feição geográfica, utilizando recursos de sistemas de gerenciamento de bancos de dados. O modelo vetorial tende a utilizar menos espaço de armazenamento, tendo em vista que necessita apenas de pares de coordenadas para representar uma região, enquanto a estrutura de dados em raster necessita uma informação para cada célula que representa a mesma região (WEBER, 2021; MCCORMAC; SARASUA; DAVIS, 2012).

2.2.3 Formulação do problema e principais aspectos da abordagem

As estruturas lineares podem ser definidas como segmentos de malhas de projetos de infraestrutura, em geral relacionados a construções de grande porte. São essências para o desenvolvimento econômico de um país, pois visam transportar pessoas, escoar produção de bens ou viabilizar prestação de serviços. Os tipos mais comuns destas estruturas são: rodovias, ferrovias, tubulações, canais de água, gasodutos e linhas de transmissão. Em geral, a tipologia adotando a linearidade da reta é a premissa estabelecida para este tipo de projeto, no qual busca-se conectar dois pontos de interesse com o menor custo econômico, social e ambiental (CLAUDIO, 2007).

O processo de determinação de traçados em ambientes com elevada complexidade socioambiental é desafiador, pois equívocos no estabelecimento da relação espacial entre diferentes camadas de informações pode levar a soluções de custo elevado, não padronizadas e superdimensionadas. No contexto de planejamento urbano, Cheng e Chang (2001) discutem o desafio de determinação de rotas de estruturas lineares de serviços públicos como tubulações de água, gás e redes elétricas. Destaca-se a descentralização das informações geoespaciais necessárias para elaboração dos traçados, muitas vezes incompletas e armazenadas em diferentes órgãos públicos.

Em (GROSSARDT; BAILEY; BRUMM, 2001) e (GROSSARDT; BAILEY; BRUMM, 2003) são apresentadas 50 camadas de dados geoespaciais adotadas como critérios organizados em quatro classes de afinidade (meio ambiente, áreas construídas, aspectos de solo e geologia, aspectos socioeconômicos e práticas regulatórias). Além disto, é apresentada uma metodologia para aprimorar a participação pública em obras de grande impacto socioambiental, denominada *Structured Public Involvement* (SPI), que consiste em um conjunto de protocolos, processos e ferramentas que permitem a organização e integração dos diferentes agentes impactados pelas obras. Em Jankowski e Richard (1994) é apresentada uma ferramenta para determinação de traçado de adutoras de água associando análise multicritério e SIG, discute-se os interesses conflitantes que, em geral, permeiam estes projetos, uma vez que minimizar os custos financeiros do empreendimento pode refletir em um aumento dos impactos sociais e ambientais.

Em uma abordagem que integra SIG-MCDA para determinação de traçados de estruturas lineares, a região de análise é dividida em classes de critérios modeladas espacialmente, através de rasters ou polígonos. Em ambas as abordagens busca-se construir uma topologia de rede gerenciável para determinação de um caminho de menor “custo” para conectar dois pontos de interesse. Neste contexto, a expressão “custo” pode não representar necessariamente valores monetários, mas o esforço ou atratividade de se cruzar por uma célula ou região do espaço modelado. Neste trabalho, optou-se por se manter a nomenclatura “custo” relacionada à atratividade de se cruzar determinada área, e não relacionada a custos monetários.

Em geral esta atratividade é representada por valores numéricos que podem ser deno-

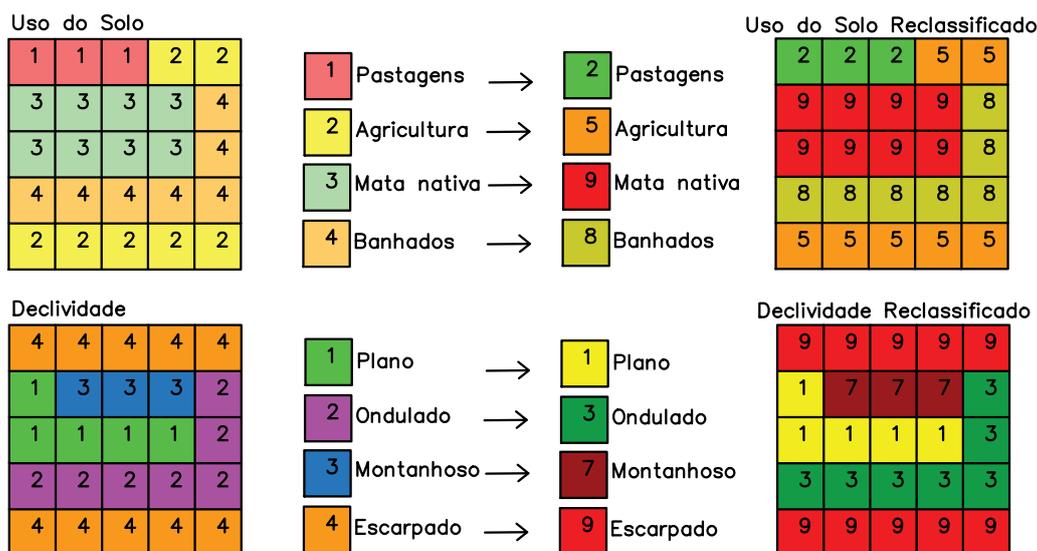
minados pesos, pontuações de aptidão/atratividade, atrito ou até impedância. Geralmente, os pesos são atribuídos através de MCDA de acordo com a atratividade em construir a estrutura linear em determinada região (COLLISCHONN; PILAR, 2000; GONÇALVES, 2010).

A superfície de custo é obtida utilizando álgebra de mapas, que consiste no conjunto de funções e operadores que permite a combinação das informações contidas nas células dos rasters analisados. Destaca-se que neste tipo de abordagem, em geral, atua-se localmente em cada célula do arquivo raster, sendo possível realizar operações aritméticas (adição, subtração, divisão, multiplicação), como também aplicar funções matemáticas de diferentes naturezas, como aplicação de relações de ordem, igualdade ou operações booleanas (FITZ, 2008; CAMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Na modelagem clássica da superfície de custo, utilizam-se dois conjuntos básicos de operações locais, as operações matemáticas e operações de transformação. Supondo um conjunto de critérios sendo analisados para construção de uma linha de transmissão, via de regra, estes critérios são apresentados como rasters categóricos, nos quais o valor da célula representa a presença de atributo relevante para construção da nova linha.

A operação de transformação chamada reclassificação, consiste em substituir o valor numérico que representa a categoria de cada célula, por valores numéricos adequados para a abordagem utilizada, ou seja, valores que representam a atratividade de se construir um trecho da nova linha de transmissão, na célula em questão. Na Figura 7, é apresentada uma operação genérica de reclassificação de acordo com uma escala de 1 a 9 de atratividade em se construir linhas de transmissão nas células que contém determinado atributo.

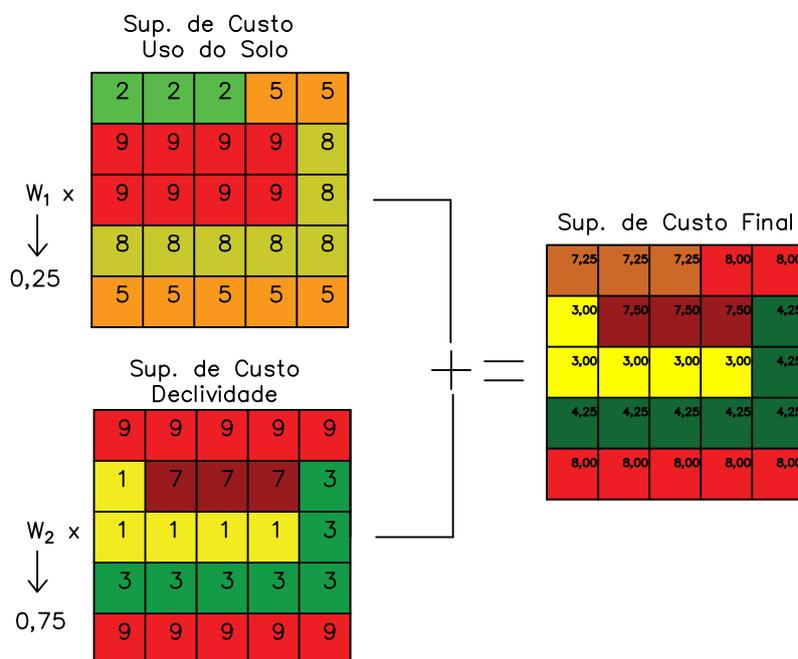
Figura 7 – Exemplo de operação de reclassificação



Fonte: do autor

É possível notar que uso do solo é um critério formado por quatro subcritérios (pasta-

Figura 9 – Exemplo de elaboração de superfície de custo genérica



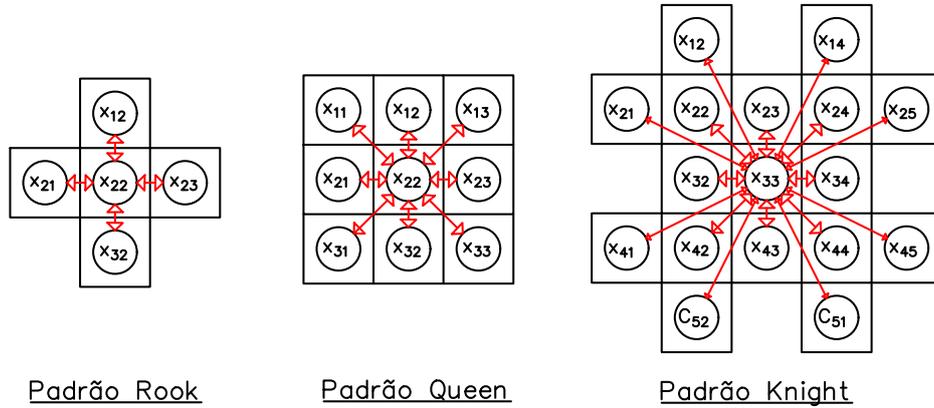
Fonte: do autor

Portanto, a partir de uma superfície que sintetiza todas as informações de pontuações em um único arquivo raster, adota-se um processo de otimização combinatória para determinar o caminho que representa o menor custo associado para conectar dois pontos de interesse na superfície. Este processo, chamado de análise de caminho de custo mínimo, do inglês, *Least Cost Path Analysis* (LCPA) utiliza uma estrutura de dados do tipo rede, onde se deseja minimizar a distância ou outra variável baseada na mesma, que conecta dois pontos de interesse. Neste contexto os algoritmos especializados buscam determinar o caminho através de um grafo $G = (V, L)$ onde $V = [v_1, \dots, v_n]$ representa a quantidade de vértices e $L = [a_1, \dots, a_n]$ representa a quantidade de arestas, estas, ponderadas de acordo com a modelagem multicriterial.

Desta forma, são estabelecidas duas condições básicas para elaboração de um grafo sobre uma superfície de custos representada por um arquivo raster: (1) os vértices dos grafos são representados pelo centroide das células do raster e as células vizinhas adjacentes configuram as arestas que conectam a rede (XU; LATHROP JR, 1994; YU; LEE; MUNRO-STASIUK, 2003).

Neste contexto, existem diferentes configurações de adjacência que podem ser consideradas no desenvolvimento de um caminho, sendo as principais apresentadas na Figura 10.

Figura 10 – Padrões de adjacência de vizinhança de células



Fonte: Adaptado de (YU; LEE; MUNRO-STASIUK, 2003)

Nota-se que, em todos os padrões, o centroide de cada célula forma um vértice, que se conecta com o centroide das células adjacentes através das arestas que permitem travessia nos dois sentidos. O padrão *Queen* é o mais utilizado no contexto da determinação de traçados de linhas de transmissão, no qual, para calcular o custo de travessia de uma célula para outra, utiliza-se a Equação (4) para travessias horizontais ou verticais, e a Equação (5) para travessias diagonais:

$$Custo^{(ij) \rightarrow (mn)} = \mu \left(\frac{co_{ij} + co_{mn}}{2} \right) \leftrightarrow i = m \vee j = n, \quad (4)$$

$$Custo^{(ij) \rightarrow (mn)} = \mu \left(\frac{co_{ij} + co_{mn}}{2} \right) \sqrt{2} \leftrightarrow i \neq m \vee j \neq n, \quad (5)$$

onde $Custo^{(ij) \rightarrow (mn)}$ é o custo de travessia da célula ij para célula mn , o termo co_{ij} é o custo da célula (da i -ésima linha com a j -ésima coluna na forma matricial), o termo co_{mn} se refere ao custo da célula (da m -ésima linha com a n -ésima coluna na forma matricial) e o termo μ é a resolução espacial do raster.

Desta forma, uma vez estabelecido o grafo com arestas ponderadas para uma determinada superfície de custos, o problema de encontrar o caminho de menor custo entre um nó de origem (1) e um nó destino (n) de um grafo, pode ser abordado através de um problema de otimização combinatória cuja modelagem matemática é definida pelas seguintes expressões:

$$\min C_{total} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in S(i)} c_{ij} x_{ij}, \quad (6)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in S(1)} x_{1j} = 1, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in P(n)} x_{in} = 1, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in P(j)} x_{ij} = \sum_{k \in S(j)} x_{jk} \quad j = 2, \dots, n - 1 \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n \quad (10)$$

sendo que,

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a aresta de } i \text{ a } j \text{ pertence ao menor caminho entre } 1 \text{ e } n \\ 0, & \text{se a aresta de } i \text{ a } j \text{ não pertence ao menor caminho} \end{cases}$$

onde, c_{ij} representa o custo de travessia da célula i para célula j , x_{ij} é uma variável binária que representa se as células i e j possuem caminho ativo na solução do problema. As variáveis $S(j)$ e $P(j)$ representam, respectivamente, o conjunto dos vértices sucessores e predecessores do vértice j . As Expressões (7) e (8), representam, respectivamente, as restrições de imposição da necessidade de que as células de origem e destino, estejam ativas na solução do problema. A Expressão (9) garante que cada vértice será visitado apenas uma vez no caminho final.

O modelo matemático caracteriza um problema de programação linear inteira, onde as variáveis de decisão são binárias. Dentre as diferentes abordagens e algoritmos especializados, o Algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA *et al.*, 1959) é o mais utilizado para solução do problema. A estratégia básica do algoritmo é rotular vértices para encontrar os caminhos de menor custo de uma determinada origem para todos os demais vértices do grafo. Este algoritmo é do tipo guloso, ou seja, busca resolver o problema realizando sempre a escolha localmente ótima em cada iteração (GOLDBARG; GOLDBARG, 2012). Este algoritmo baseia-se na teoria de grafos e no princípio de otimalidade de Bellman (BELLMAN, 1958) que estabelece que todo caminho de custo mínimo é formado por subcaminhos de custo mínimo. Destaca-se que existem modelagens mais complexas do problema, como a consideração de arestas com custos negativos, redes em que os pesos são dependentes do tempo, entre outros, e que estes casos exigem técnicas de otimização mais robustas.

Apesar do método para obtenção do traçado ser modelado através de um problema de otimização, há uma componente de subjetividade que influencia diretamente as soluções obtidas, uma vez que as pontuações e pesos das arestas são atribuídos através do MCDA, sendo este, um dos pontos que este trabalho busca avaliar. Destaca-se que esta abordagem agrega eficiência ao método, pois os diferentes critérios são consolidados e representados através dos pesos das arestas, tornando um problema com natureza multiobjetivo em um problema com um único objetivo (determinar rota de menor custo entre dois pontos).

2.3 Revisão da literatura

Nesta seção, estão apresentados os principais artigos analisados na revisão da literatura que possuem foco em métodos de determinação de traçados de linhas de transmissão utilizando abordagem SIG-MCDA.

2.3.1 Métodos aplicados ao roteamento de linhas de transmissão

No que diz respeito ao roteamento de linhas de transmissão, Giles e Smart (1976) desenvolveram uma das primeiras ferramentas computacionais para determinação de corredores de redes elétricas considerando aspectos técnicos, econômicos e socioambientais. Apresentam a proposta de modelar a região da nova linha através de um arquivo de estrutura matricial, no qual cada célula possui uma dada resolução espacial. Para obtenção da rota de menor peso associado, o arquivo é apresentado como um grafo cujos vértices são os centróides das células e as arestas são as conexões entre células adjacentes de cada vértice, desta forma a solução é obtida através do Algoritmo de Dijkstra. Nota-se, portanto, uma importante contribuição deste trabalho na modelagem do problema, mesmo que sua aplicação no momento histórico fosse significativamente complexa por questões relacionadas à desempenho computacional.

Em um outro tipo de abordagem, Choobineh e Burgman (1984) e Elamin, Duffuaa e Yassein (1990) apresentam um modelo de otimização de dois estágios baseado em *goal programming*, no qual no primeiro estágio são selecionadas rotas de linhas de transmissão pré-determinadas considerando custos econômicos e no segundo estágio são inseridas restrições socioambientais e determinadas as rotas de menor impacto.

Neste contexto, havia uma grande dificuldade na utilização de dados geoespaciais reais, uma vez que o processamento de imagens de satélite, digitalização de mapas e esforço computacional para solução de algoritmos era limitado, aspecto que foi melhor aprofundado por Vega e Sarmiento (1996) que propõem o uso de imagens de satélite no roteamento de linhas de transmissão.

Uma abordagem proposta e incorporada em diferentes trabalhos é apresentada por Stucky (1998) que utiliza análise de visibilidade (*Viewshed Analysis*) e análise de caminho de custo mínimo para encontrar a rota de menor custo em um modelo digital de elevação de terreno (arquivo matricial que fornece a altitude de cada *pixel* de um raster). A análise de visibilidade identifica as partes visíveis de um raster a partir de um ou mais pontos de observadores em outros pontos da superfície. Na perspectiva de engenharia de linhas de transmissão, caminhos com mínima visibilidade se mostraram promissores, uma vez que configuram regiões como planícies.

Em um contexto cronológico, em que os softwares SIG e o processamento computacional já se encontram estabelecidos, o trabalho desenvolvido por Monteiro *et al.* (2005) utiliza programação dinâmica para obtenção de rotas de custo mínimo em uma superfície

de custos formada por um arquivo raster. Uma das principais contribuições é propor uma metodologia para avaliação de custos com a variação de declividade do terreno.

A metodologia desenvolvida pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) em parceria com a *Georgia Transmission Corporation* (GTC) (EPRI-GTC, 2006) abordou com bastante profundidade o processo de determinação das pontuações de atratividade e pesos dos critérios através de pesquisas com especialistas. Foram realizadas consultas com mais de 400 *stakeholders* através da aplicação do método *Delphi* e AHP, sendo avaliados mais de oitenta aspectos relacionados aos atributos geográficos. A metodologia é dividida em três etapas. Inicialmente é determinado um macrocorredor considerando aspectos como presença de estradas, linhas de transmissão existentes e declividade. Na segunda etapa, no interior deste macrocorredor, são determinados corredores alternativos considerando diferentes perspectivas de projeto (*built environment, engineering e natural environment*). Por fim, na terceira etapa, são obtidas diferentes rotas de custo mínimo nos corredores preferenciais e avaliadas de acordo com as perspectivas estabelecidas em projeto. A metodologia foi atualizada em 2019 (EPRI-GTC, 2019), sendo adicionada uma quarta perspectiva de projeto (*linear infrastructure*), desta forma, as pesquisas com especialistas e alguns pesos foram remodelados.

Uma abordagem alternativa é apresentada por Demircan, Aydin e Durduran (2011) que utiliza um algoritmo de inteligência artificial para determinar a rota de menor custo em um grafo pré-estabelecido, a partir de pontos notáveis da região estudada para construção da nova linha de transmissão. A técnica de otimização adotada foi o *Q-learning* e a abordagem de critérios foi baseada na metodologia apresentada por (EPRI-GTC, 2006). Em (SHU *et al.*, 2011) inclui-se ao modelo clássico de PET, a rota das linhas de transmissão, segundo os autores, nesta abordagem, o planejamento se torna mais assertivo, uma vez que a avaliação integrada do arranjo da expansão associada a rota das novas linhas de transmissão permite avaliar aspectos que não são avaliados no planejamento em duas etapas.

Bagli, Geneletti e Orsi (2011) propõem a inclusão de critérios fortemente relacionados com aspectos socioambientais, como rotas de aves migratórias, densidade e altura de edifícios, fragmentação de habitats e cobertura vegetal. Ademais, os autores propõem cenários de avaliação das rotas obtidas, a partir de diferentes perspectivas de projeto (neutra, econômica, humana e socioeconômica). Neste contexto, as rotas são hierarquizadas de acordo com os pesos estabelecidos para cada uma das perspectivas. Campos, Elmiro e Nobrega (2014) discutem a identificação de padrões construtivos estabelecidos em obras e projetos de linhas de transmissão já construídas, adotando o Teorema de Probabilidade Condicional como base para a modelagem do problema. Neste contexto, a partir da identificação de padrões, através de variáveis de probabilidade de que os mesmos ocorram, é possível resgatar conhecimento de projetos passados através de uso de informações explícitas presentes na paisagem da linha estudada. Este procedimento busca sistematizar

o padrão de conhecimento tácito acumulado a partir da experiência obtida em planejar e executar projetos de linhas de transmissão, extraindo um padrão espacial adotado neste tipo de projeto.

Na última década, nota-se que a abordagem clássica do problema utilizando SIG-MCDA, para modelagem de critérios, e o Algoritmo de Dijkstra, para determinação da rota de menor custo, foi aprofundada significativamente. Em Dedemen (2013) é apresentada a modelagem de critérios utilizando o método AHP e pesquisa com três especialistas, formando três superfícies de custo para cada pesquisa, além de uma superfície unificada a partir das três pré-estabelecidas. A análise multicritério é utilizada também para hierarquizar as rotas obtidas nestas superfícies avaliadas. Em Eroğlu e Aydin (2015) a modelagem de critérios é realizada através dos métodos AHP e *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP), visando comparar pontos positivos e negativos de cada abordagem.

Em Lima (2015), uma das principais contribuições do trabalho é propor uma abordagem para modelagem de critérios utilizando o banco de dados de preços da ANEEL. Um indicador de custo (R\$/km) foi obtido para cada critério, possibilitando a elaboração de uma superfície de custos financeiros e, a partir da mesma, a determinação de uma rota otimizada considerando apenas esta modelagem monetária. A mesma abordagem foi utilizada por Nobrega (2019), no entanto, neste trabalho também é proposto um algoritmo de otimização heurística (Enxame de Partículas) para minimizar o índice de inconsistência de matrizes de comparação do método AHP aplicado em critérios previamente estabelecidos. No contexto brasileiro de discussão dos critérios e determinação de pesos para critérios, em Araujo (2016), uma das principais contribuições é a apresentação de pesquisas estruturadas com participação de 13 especialistas que atuam em órgãos públicos e participam direta e indiretamente do processo de expansão da transmissão no Brasil.

Piveteau (2017) e Santos *et al.* (2019) utilizam a abordagem clássica de modelagem da superfície de custos em um raster reclassificado a partir de critérios e pesos atribuídos na modelagem espacial. Porém, incluem aspectos técnicos no método do roteamento, como minimização de ângulos do eixo da linha de transmissão ao longo da rota, posição das torres, comprimento do vão e da flecha. Li *et al.* (2013) inclui o critério de incidência de descargas atmosféricas à abordagem clássica de avaliação de rotas de custo mínimo em superfícies de custos modeladas geoespacialmente através de critérios e pesos. Grassi *et al.* (2014) atribuiu uma abordagem que integra análise de visibilidade para auxiliar na composição de uma superfície de custos global, ademais, insere restrições quanto a presença de edifícios e impacto visual causado pelas novas linhas de transmissão.

Em Shandiz *et al.* (2018), discute-se os impactos nas rotas causados pela ponderação dos critérios sob diferentes perspectivas de *stakeholders* que participaram das pesquisas estruturadas para determinação dos pesos dos critérios (agentes da transmissão, população em geral e grupos de proteção ao meio ambiente). Em Freiman (2019) propõe-se a organização de três categorias de critérios: social, ambiental e econômico, com diferentes

pesos associados as mesmas. Nesta mesma linha, Zipf *et al.* (2019) discute as categorias de critérios e avalia, principalmente, a influência e sensibilidade dos pesos atribuídos nas rotas otimizadas.

Bachmann *et al.* (2018) propõe uma abordagem multiobjetivo para solução do problema de caminho de custo mínimo utilizando técnicas como Eficiência de Pareto, em que uma rota alternativa, é considerada uma solução ótima, caso não seja possível minimizar o impacto de determinado critério sem causar prejuízo na situação de outro critério avaliado. Desta forma, a solução do problema fornece um conjunto de rotas alternativas que devem ser analisadas através de cenários de acordo com diferentes perspectivas de projeto. Neste contexto, Ekel *et al.* (2019) também utiliza otimização multiobjetivo, no entanto, propõem a inclusão de incertezas e abordagem probabilística. Ademais, adota FAHP para determinação de áreas de maior atratividade e preferência para implantação das linhas de transmissão.

Em Moncecchi (2020) é apresentada uma abordagem que utiliza um algoritmo *Valley Finding* para determinar áreas de baixo peso nas superfícies de custos formadas por rasters, o corredor preferencial é determinado a partir da aplicação do algoritmo de Dijkstra. Nesta mesma linha, Schito, Moncecchi e Raubal (2021) agregam a esta metodologia uma análise multiobjetivo que utiliza eficiência de Pareto na modelagem espacial. As alternativas obtidas são avaliadas através de uma análise multicritério com pesquisas estruturadas com especialistas e análise de sensibilidade.

Como alternativa às abordagens clássicas, Gonçalves *et al.* (2021) propõem a utilização da técnica de *Optimal Rapid Random Trees* comumente adotada para cálculo de movimento de robôs. A abordagem considera critérios financeiros, ambientais e sociais, assim como, utiliza a teoria de grafos com nós e arestas com pesos atribuídos de acordo com a dificuldade de travessia da região. O algoritmo adotado trabalha com amostragem de pontos e árvores de possibilidades.

2.3.2 Quadro resumo da revisão da literatura

A Tabela 1, apresenta um quadro resumo da revisão bibliográfica, cujos principais tópicos estão listados a seguir.

1. Apresenta as técnicas adotadas na análise multicritério.
2. Apresenta a ferramenta ou técnica utilizada para determinação dos traçados.
3. Apresenta a plataforma adotada para análise espacial e/ou implementação de código computacional.
4. Apresenta a abordagem adotada para avaliação dos traçados obtidos nos resultados.

Tabela 1 – Quadro resumo da revisão bibliográfica

Características	Referências ¹																				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1. Modelagem de Critérios																					
Pesquisa com Especialista		✓	✓		✓					✓	✓	✓		✓	✓						✓
Presentes na Literatura	✓			✓			✓					✓		✓	✓	✓		✓	✓		
<i>Redes Bayesianas</i>									✓												
<i>Analytic Hierarchy Process</i>		✓			✓	✓			✓	✓			✓	✓	✓					✓	
<i>Fuzzy-AHP</i>							✓														
<i>Simple Additive Weighting</i>				✓																	
<i>Logarithmically Adapted-SAW</i>												✓									
<i>Eficiência de Pareto</i>																			✓		✓
<i>Indicadores de Custos</i>										✓							✓	✓			
2. Determinação dos Traçados	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
Caminho de Custo Mínimo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Algoritmo de Dijkstra</i>														✓		✓	✓				
<i>Programação Dinâmica</i>	✓																	✓		✓	
<i>Eficiência de Pareto</i>												✓							✓		✓
<i>Rapid Random Trees</i>																					✓
<i>Q-learning</i>					✓																
<i>Software SIG</i>		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓						✓	✓			
3. Plataforma Utilizada	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
ArcGIS®	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓		✓								✓	
QGIS®										✓						✓		✓			
Corridor Analyst®		✓																			
IDRISI Kilimanjaro®				✓																	
Dinâmica EGO									✓												
Matlab®					✓											✓					
NetworkX/Python™														✓		✓				✓	
Mapinfo®					✓																
Plataforma WebGIS											✓										✓
C++																					✓
4. Avaliação de Traçados	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
Análise de Sensibilidade				✓						✓	✓										✓
Análise de Cenários	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓
Análise Multicritério		✓	✓		✓											✓		✓	✓		
Análise Multiobjetivo												✓				✓			✓		

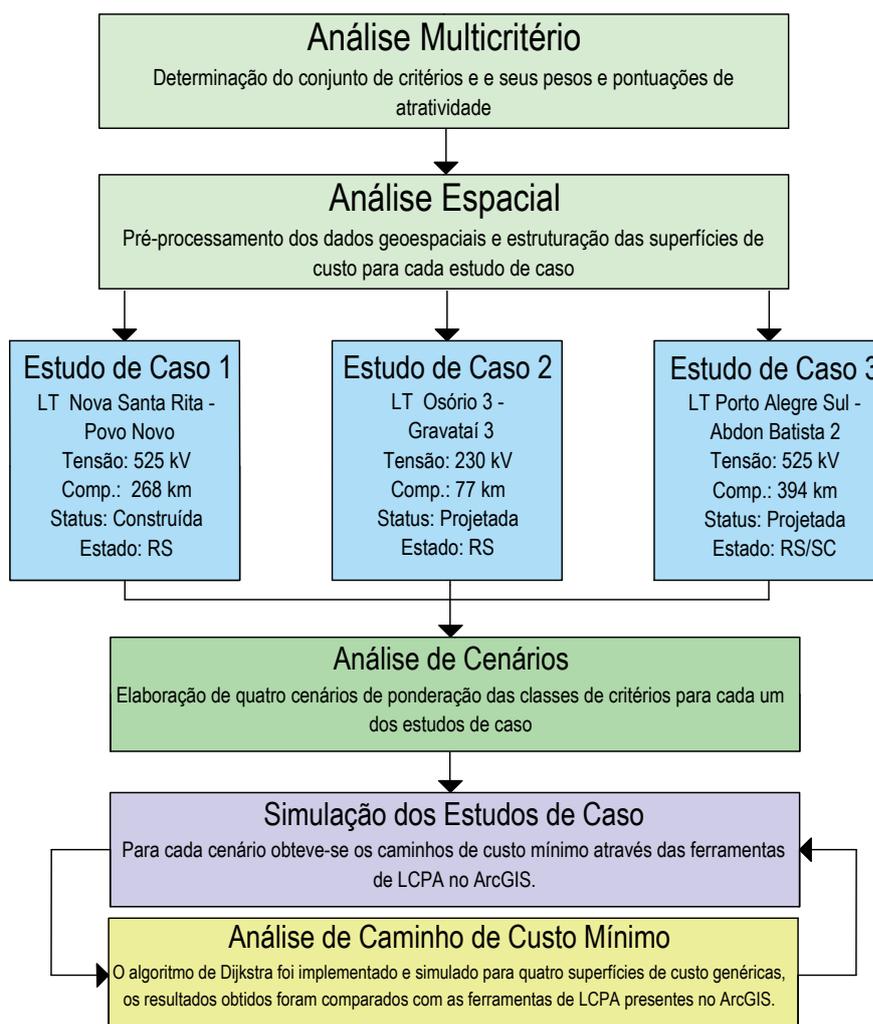
¹ Referências: A: (MONTEIRO *et al.*, 2005), B: (EPRI-GTC, 2006), C: (BAGLI; GENELETTI; ORSI, 2011), D: (DEMIRCAN; AYDIN; DURDURAN, 2011), E: (DEDEMEN, 2013), F: (EROĞLU; AYDIN, 2015), G: (GRASSI *et al.*, 2014), H: (CAMPOS; ELMIRO; NOBREGA, 2014), I: (LIMA, 2015), J: (ARAUJO, 2016), K: (PIVETEAU, 2017), L: (BACHMANN *et al.*, 2018), M: (SHANDIZ *et al.*, 2018), N: (FREIMAN; SANTOS, 2019), O: (NOBREGA, 2019), P: (ZIPF *et al.*, 2019), Q: (SANTOS *et al.*, 2019), R: (EKEL *et al.*, 2019), S: (MONCECCHI, 2020), T: (SCHITO; MONCECCHI; RAUBAL, 2021), U: (GONÇALVES *et al.*, 2021).

No presente trabalho, a modelagem dos critérios e pesos foi realizada a partir da revisão bibliográfica, portanto, pesos presentes na literatura. Os traçados foram obtidos a partir das ferramentas presentes no software SIG ArcGIS® e os resultados serão apresentados a partir da avaliação de cenários. A metodologia adotada está detalhada no Capítulo 3.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as etapas adotadas para elaboração e aplicação do método de determinação de traçado de linhas de transmissão utilizando uma abordagem SIG-MCDA. A metodologia proposta para este trabalho está dividida conforme as etapas apresentadas a seguir e sintetizadas na Figura 11.

Figura 11 – Etapas adotadas no desenvolvimento do trabalho



Fonte: do autor

1. Análise Multicritério

A partir da revisão bibliográfica, realizou-se uma análise de pontuações de subcritérios e pesos de critérios apresentados em publicações e pesquisas correlatas. Foi definido um conjunto de critérios frequentemente considerados em projetos de linhas de transmissão, com base em uma avaliação sistemática de um conjunto de 13 publicações, apresentadas na Tabela 2. Com base nessa avaliação, determinou-se três classes de critérios: ambiental, social e técnico-econômica. Neste contexto, cada classe é formada por um conjunto de critérios, que por sua vez são formados por subcritérios. Os pesos dos critérios e as pontuações de atratividade dos subcritérios foram obtidos através de uma análise sistemática da revisão bibliográfica. Os pesos das categorias de critérios foram estabelecidos a partir da elaboração de quatro cenários, considerando pesos iguais, uma perspectiva de ambiental, social e técnico econômica. Esta etapa está detalhada na Seção 3.1.

2. Análise Espacial

Utilizando o software ArcGIS® realizou-se a consolidação dos dados geoespaciais das linhas de transmissão adotadas como estudo de caso, através de compatibilização de coordenadas e projeções cartográficas, além de conversão de arquivos vetoriais em arquivos de estrutura matricial raster. Os dados geoespaciais foram reclassificados de acordo com a modelagem multicriterial e utilizou-se álgebra de mapas para determinar uma superfície de custos de referência para cada cenário adotado nos estudos de caso. Esta etapa está detalhada na Seção 3.2.

3. Estudos de Caso

Foram definidos três estudos de caso, com o objetivo de avaliar aspectos específicos relacionados ao método. O detalhamento das linhas de transmissão selecionadas está apresentado na Seção 3.3.1.

4. Análise de Caminhos de Custo Mínimo

Pelo fato do algoritmo de Dijkstra ser amplamente empregado neste tipo de abordagem, optou-se por realizar uma implementação computacional do algoritmo utilizando o software Matlab®, com o objetivo de comparar os resultados obtidos utilizando as ferramentas de análise de caminho de custo mínimo já incorporadas no ArcGIS®.

Estas análises consistiram em quatro experimentos genéricos visando avaliar as particularidades de cada método de solução. Como os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, foram adotadas as ferramentas do software ArcGIS® para simulação dos cenários nos estudos de caso estabelecidos. Esta etapa está detalhada na Seção 3.4.

3.1 Caracterização da análise multicritério

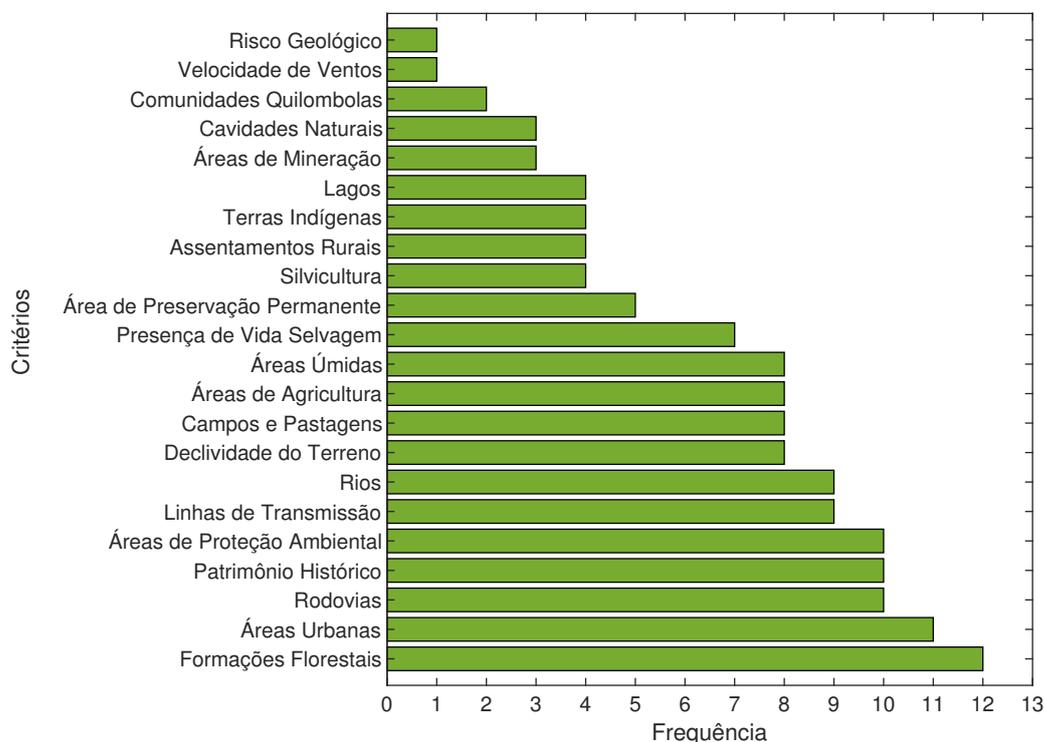
O conjunto de critérios e subcritérios utilizados neste trabalho foi definido a partir da análise de 13 publicações, apresentadas na Tabela 2, que utilizam MCDA e abordagem similar à proposta neste trabalho. Nestas publicações, são apresentadas pesquisas estruturadas com diferentes públicos, chamados neste trabalho de agentes (Tabela 2), totalizando, portanto, a análise de 21 agentes envolvidos, uma vez que, uma publicação pode apresentar pesquisa com mais de um tipo de agente. Cada publicação adota uma abordagem SIG-MCDA distinta, no entanto, em todos os casos, busca-se determinar pontuações e pesos de atratividade de se construir uma linha de transmissão em determinada região, com base em um grupo de critérios.

Tabela 2 – Publicações adotadas para determinação das pontuações e pesos de critérios

Agente Envolvido	Característica do Agente	Publicação
1	<i>Stakeholders</i>	(EPRI-GTC, 2006)
2	Agentes da Transmissão	(GROSSARDT; BAILEY; BRUMM, 2003)
3	Público Geral	
4	Não Especificado	(BAGLI; GENELETTI; ORSI, 2011)
5	Não Especificado	(DEDEMEN, 2013)
6	Não Especificado	
7	Não Especificado	
8	Agregado	
9	Não Especificado	(GRASSI <i>et al.</i> , 2014)
10	Agentes da Transmissão	(LIMA, 2015)
11	Profissionais EPE	(ARAUJO, 2016)
12	Profissionais EPE, IBAMA, TCU	
13	Agentes da Transmissão	
14	Organizações Ambientais	(SHANDIZ <i>et al.</i> , 2018)
15	Sociedade Civil	
16	Agregado	
17	Agentes da Transmissão	(FREIMAN; SANTOS, 2019)
18	<i>Stakeholders</i>	(EPRI-GTC, 2019)
19	Não Especificado	(MONCECCHI, 2020)
20	Não Especificado	(SCHITO; MONCECCHI; RAUBAL, 2021)
21	Não Especificado	(ENGIE, 2020)

É possível observar que se analisou um grupo de agentes com características diversas, permitindo agregar a percepção de diferentes pontos de vista na metodologia. Na Figura 12 está apresentado um histograma com a frequência da abordagem dos critérios nas publicações apresentadas na Tabela 2.

Figura 12 – Frequência de abordagem de critérios presentes nas publicações analisadas



Fonte: do autor

Destaca-se que, para elaborar esta análise, utilizou-se critérios considerados relevantes para o contexto brasileiro da expansão da transmissão. Ademais, realizou-se uma compatibilização de nomenclaturas adotadas em cada publicação, este processo consistiu em organizar critérios utilizando uma única nomenclatura a partir da similaridade de propósito dos mesmos.

É possível observar que existem critérios que são abordados em praticamente todas as publicações, como por exemplo a presença de áreas urbanas, de formações florestais, áreas de proteção ambiental e patrimônio histórico. A indicação de paralelismo com corredores de infraestrutura linear já existente (linhas de transmissão e rodovias) também é um aspecto bastante abordado, fato que está em consonância com o indicado em EPE (2018), que estabelece que na medida do possível, esta deva ser uma premissa de projeto. Na Figura 12, verifica-se que critérios socioambientais relevantes, como terras indígenas, comunidades quilombolas, assentamentos rurais e presença de vida selvagem, possuem frequência de abordagem reduzida.

Portanto, com base nas recomendações apresentadas em EPE (2018), na análise de frequência de abordagem dos critérios e o contexto atual de dados geoespaciais disponíveis em bases de dados brasileiras, determinou-se o conjunto de critérios apresentados na Tabela 3, como referência para modelagem deste trabalho.

Tabela 3 – Conjunto de critérios e subcritérios adotados como referência

Classe	Critério	Subcritério
Ambiental	Áreas Ambientalmente Sensíveis	Áreas de Proteção Ambiental Áreas de Preservação Permanente Rotas de Aves Silvestres Cavidades Naturais Subterrâneas Formações Florestais Áreas Úmidas
		Recursos Hídricos Rios e Córregos Lagos
Social	Locais com Relevância Cultural e Histórica	Terras Indígenas Comunidades Quilombolas Sítios Arqueológicos
	Uso do Solo	Áreas de Agricultura Assentamentos Rurais Silvicultura Campos e Pastagens Áreas Urbanas Áreas de Mineração
Técnico-Econômico	Infraestrutura Linear Existente	Linhas de Transmissão Estradas
	Risco Geológico	Muito Alto Alto
	Declividade do Terreno	Plano Suave Ondulado Forte Ondulado Montanhoso Escarpado
		Velocidade Média dos Ventos (V_m)

Entende-se que estes critérios possuem aplicabilidade no contexto brasileiro da expansão da transmissão e formam um grupo homogêneo de aspectos que permitem uma análise integrada das particularidades que envolvem este tipo de projeto. Ademais, é possível observar que todos os critérios considerados como passíveis de desvios e, apresentados em EPE (2018), estão contemplados na análise de maneira direta, exceto o aspecto relacionado à áreas de relevante beleza paisagística e/ou turística, por se tratarem de aspectos subjetivos e sem bases de dados geoespaciais estabelecidas. Assim como para as áreas militares, estações de tratamento de água/esgoto e estações de telecomunicações por se tratarem de áreas que, possivelmente, estão integradas nas áreas urbanas já consideradas. Para o critério vida selvagem, optou-se por utilizar os dados de áreas com presença de

aves silvestres, pois já existe uma base de dados consolidada relacionada à presença das mesmas. Destaca-se que áreas com presença de vida selvagem poderiam ser estimadas a partir do cruzamento de informações de outras bases de dados, no entanto, optou-se por realizar a simplificação mencionada. Assim como, para o critério patrimônio histórico, optou-se por utilizar a base de dados relacionada à sítios arqueológicos.

Destaca-se que, além destes critérios estabelecidos e apresentados na Tabela 3, se considerou um conjunto de áreas específicas como sendo proibitivas de travessias, ou seja, caso existam na região analisada, as mesmas foram “bloqueadas” no arquivo raster que representa a superfície de custo, são elas: (1) aeródromos considerando zona de influência de 3 km, baseado em (BRASIL, 2020) e (2) alguns tipos de unidades de conservação, detalhadas na Seção 3.2.1.

3.1.1 Elaboração das superfícies de custos

Como apresentado na Tabela 3, neste trabalho, foram considerados três níveis de organização dos critérios analisados. Os subcritérios foram separados em conjuntos de critérios, que por sua vez são organizados em classes de critérios. Desta forma, a superfície de custos final, na qual o caminho de menor custo será obtido, é dada pela seguinte expressão:

$$S_{final} = w_{ca} \sum_{i=1}^l p_i \mathbf{X}_i + w_{cs} \sum_{j=1}^m p_j \mathbf{X}_j + w_{cte} \sum_{k=1}^n p_k \mathbf{X}_k, \quad (11)$$

onde w_{ca} é o peso da classe dos critérios ambientais, w_{cs} é o peso da classe de critérios sociais, w_{cte} é o peso da classe de critérios técnicos-econômicos, p_i é o peso do i -ésimo critério da classe ambiental, \mathbf{X}_i é a matriz que sintetiza as pontuações de subcritérios do i -ésimo critério da classe ambiental, p_j é o peso do j -ésimo critério da classe social, \mathbf{X}_j é a matriz que sintetiza as pontuações de subcritérios do j -ésimo critério da classe social, p_k é o peso do k -ésimo critério da classe técnico-econômica, \mathbf{X}_k é a matriz que sintetiza as pontuações de subcritérios do k -ésimo critério da classe técnico-econômica. Neste contexto, a matriz que sintetiza as pontuações atribuídas é determinada através das seguintes expressões:

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^n \mathbf{A}_i, \quad (12)$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} a_{i1} & \cdots & a_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

onde n é a quantidade de subcritérios que fazem parte de um determinado critério (\mathbf{X}) e \mathbf{A}_i é matriz de pontuação de atratividade do i -ésimo subcritério que compõe este critério.

Nas próximas três subseções, são discutidos os métodos adotados para determinação dos pesos de classes de critérios, pesos de critérios e pontuações dos subcritérios.

3.1.2 Pontuação de atratividade dos subcritérios

Como já discutido no Capítulo 2, a pontuação para cada subcritério é atribuída de acordo com a atratividade de se construir um trecho da linha de transmissão em uma área representada por um determinado aspecto ou característica da região de estudo. Com o propósito de avaliar este processo e determinar valores de pontuações para serem adotados neste trabalho, foi realizada uma análise sistemática das publicações apresentadas na Tabela 2. A primeira etapa desta análise consistiu em normalizar os valores numéricos destas pontuações, uma vez que as escalas numéricas de classificação podem ser diferentes para cada pesquisa, este processo foi realizado através da seguinte expressão:

$$a_N = \frac{\alpha_i}{\alpha_{max_j}}, \quad (14)$$

onde a_N é a pontuação normalizada do subcritério, α é a pontuação atribuída a este subcritério na publicação analisada e α_{max} é o valor máximo de pontuação atribuída, considerando todos os subcritérios pontuados na publicação avaliada. É possível observar, portanto, que a pontuação normalizada pode assumir valores entre 0 e 1, em que pontuações com valores próximos de 1 evidenciam uma baixa atratividade deste subcritério e pontuações com valores próximos de 0, evidenciam elevada atratividade.

Destaca-se que, nas publicações avaliadas, foram considerados os valores finais de pontuação de cada subcritério, ou seja, o valor de pontuação multiplicado por todos os pesos possíveis dentro da organização de níveis adotada em cada publicação. Ademais, foram selecionadas apenas publicações que utilizam a lógica de atribuições de pontuações quanto à atratividade, aptidão ou adequabilidade. Para determinação da pontuação final de cada subcritério adotado neste trabalho, utilizou-se o valor médio das pontuações normalizadas (\bar{a}_N) para cada subcritério avaliado:

$$\bar{a}_N = \frac{\sum_1^n a_N}{n}, \quad (15)$$

onde n é a quantidade de dados da amostra. Para cada valor médio de pontuação normalizada, foi calculado o desvio padrão (σ) com o propósito de identificar o comportamento da dispersão dos dados.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(a_N - \bar{a}_N)^2}{n}}, \quad (16)$$

Desta forma, a partir dos valores médios das pontuações normalizadas para cada subcritério, utilizou-se a escala apresentada na Tabela 4, para determinação de uma pontuação final para cada subcritério considerado.

Tabela 4 – Escala de pontuação atribuída para subcritérios

Faixa de Pontuação Normalizada Média	Pontuação Atribuída (a)
$0 < \bar{a}_N \leq 0,15$	1
$0,15 < \bar{a}_N \leq 0,25$	2
$0,25 < \bar{a}_N \leq 0,35$	3
$0,35 < \bar{a}_N \leq 0,45$	4
$0,45 < \bar{a}_N \leq 0,55$	5
$0,55 < \bar{a}_N \leq 0,65$	6
$0,65 < \bar{a}_N \leq 0,75$	7
$0,75 < \bar{a}_N \leq 0,85$	8
$0,85 < \bar{a}_N \leq 1$	9

A escala de pontuação adotada é similar às utilizadas em pesquisas estruturadas em métodos de análise de decisão multicritério (LIKERT, 1932; SAATY, 1977), que buscam classificar respostas psicométricas de um determinado aspecto desde um patamar baixo à um patamar elevado, neste caso, elevado nível de atratividade ($a = 1$), até baixo nível de atratividade ($a = 9$). Optou-se por considerar uma faixa superior nos extremos de classificação, com o objetivo de não restringir a poucos ou nenhum subcritério, estes valores.

3.1.3 Pesos dos critérios

Os pesos de critérios (p_i) também foram determinados a partir da revisão bibliográfica, adotando como premissa a frequência de abordagem dos mesmos no histograma apresentado na Figura 12, desta forma, o peso de um critério que faz parte de uma classe de critérios é dado pela seguinte expressão:

$$p_i = \frac{\bar{f}_{s_i}}{\sum_1^n \bar{f}_s}, \quad (17)$$

onde \bar{f}_{s_i} é a média da frequência de abordagens de todos os subcritérios pertencentes ao critério analisado i . O denominador da expressão se trata do somatório das médias de frequência de abordagens de todos os critérios pertencentes à classe do critério analisado i e n é a quantidade de critérios presentes na classe de critérios do critério i . O peso está relacionado com a quantidade de vezes que cada subcritério de um critério foi abordado nas publicações analisadas, fato que está diretamente relacionado com a importância dos mesmos no universo da análise. A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para o conjunto de publicações avaliadas.

Tabela 5 – Pesos adotados para os critérios

Classe	Critério	\bar{f}_s	p
Ambiental	Áreas Ambientalmente Sensíveis	8,40	0,56
	Recursos Hídricos	6,50	0,44
Social	Locais com Relevância Histórica e Cultural	5,33	0,46
	Uso do Solo	6,33	0,54
Técnico-econômico	Infraestrutura Linear	9,50	0,49
	Risco de Deslizamento	1,00	0,05
	Declividade	8,00	0,41
	Velocidade dos Ventos	1,00	0,05

É possível observar que o peso adotado para cada critério pode assumir valores entre 0 e 1, em que pesos com valores próximos de 0, evidenciam que em média este critério possui subcritérios que têm baixa frequência de abordagem e valores próximos de 1 evidenciam que este critério possui subcritérios que possuem frequência de abordagem mais elevada. Este método de determinação do peso dos critérios foi adotado em substituição ao método clássico de MCDA através de pesquisas estruturadas com especialistas. Esta abordagem foi assumida para reduzir o tempo de pesquisa e trata-se de uma simplificação que pode atribuir subjetividade ao processo.

3.1.4 Pesos das classes de critérios

Os pesos das classes de critério (w) foram atribuídos de acordo com os cenários estabelecidos e apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Cenários de pesos das classes de critérios

Peso	Cenário 1 -	Cenário 2 -	Cenário 3 -	Cenário 4 -
	Pesos Iguais	Perspectiva Ambiental	Perspectiva Social	Perspectiva Técnico-econômica
w_{ca}	1/3	0,8	0,1	0,1
w_{cs}	1/3	0,1	0,8	0,1
w_{cte}	1/3	0,1	0,1	0,8

Estes cenários foram elaborados a fim de se estabelecer diferentes perspectivas de projeto para cada estudo de caso, através da variação dos pesos de cada classe de critério considerada. Portanto, para cada estudo de caso analisado, foram obtidos quatro traçados distintos, com base em cada um dos cenários estabelecidos. O Cenário 1 tem como característica principal fornecer a referência de projeto, pelo fato de possuir pesos iguais para as três classes de critérios. Para o restante da análise, optou-se por criar um cenário de peso elevado para cada classe de critério, viabilizando a avaliação das particularidades de traçados sob diferentes perspectivas de avaliação.

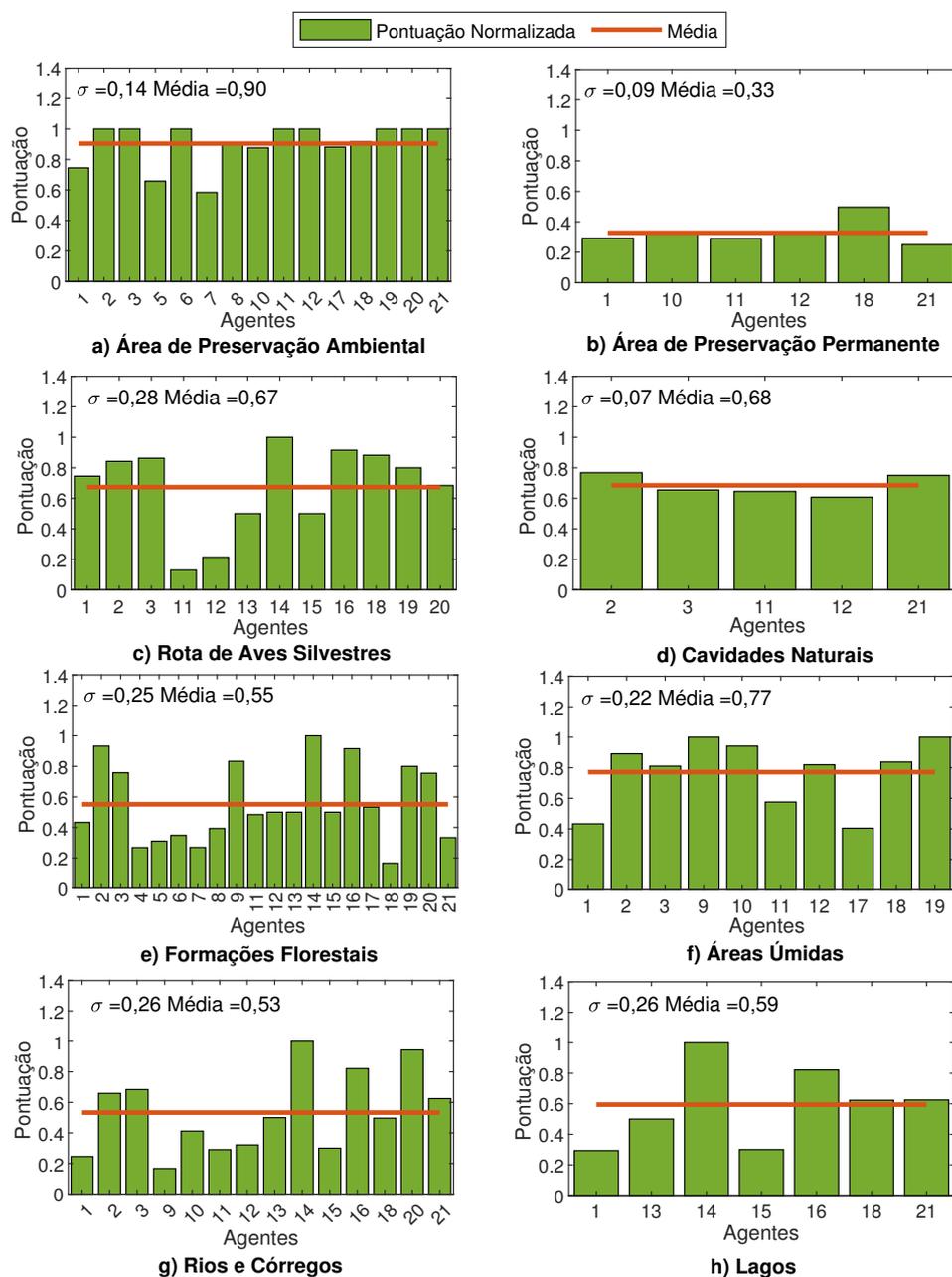
3.1.5 Análise das pontuações normalizadas

Nas próximas três seções serão apresentados e discutidos os valores de pontuação obtidos a partir da normalização das pontuações presentes nas publicações avaliadas e do método apresentado na seção 3.1.2.

3.1.5.1 Subcritérios da classe ambiental

A Figura 13 apresenta as pontuações normalizadas dos subcritérios presentes nos critérios da classe ambiental.

Figura 13 – Pontuações normalizadas para subcritérios da classe ambiental



Fonte: do autor

Para o subcritério “Áreas de Preservação Ambiental” verifica-se que há um patamar elevado de pontuações, evidenciando a baixa atratividade deste subcritério. Fato que se explica pelo impacto ambiental que uma linha de transmissão causa nesse tipo de área, assim como questões burocráticas relacionadas a legislação ambiental e processos compensatórios que demandam recurso financeiro.

As “Áreas de Preservação Permanente” tratam-se de locais nas margens de cursos e corpos d’água normalmente cobertos por vegetação que, entre outros propósitos, tem como função proteger o leito destes recursos hídricos da ação proveniente de erosão, e portanto, são protegidas por lei. No entanto, verifica-se, que possuem uma pontuação média reduzida, este fato pode estar relacionado com a questão legal que muitas vezes permite intervenções nestes locais desde que seja comprovada sua utilidade pública.

Para o subcritério “Cavidades Naturais” nota-se uma baixa variação da pontuação média evidenciando um consenso de que estas áreas devem ser evitadas. Fato que se repete em menor escala para as “Áreas Úmidas”, pois apesar de haver uma tendência de pontuação elevada, alguns autores atribuem valores intermediários na análise.

Quanto aos subcritérios “Rotas de Aves Silvestres”, “Formações Florestais”, “Rios e Córregos” e “Lagos”, nota-se um desvio padrão mais elevado e, portanto, valores dispersos da média. Há uma componente significativa de subjetividade agregada às pontuações, pois apesar de atribuídas por especialistas, visões de projeto divergentes de áreas que podem ser atrativas ou não para construção de linhas de transmissão, podem ocorrer. Principalmente no que diz respeito à impactos ambientais, que muitas vezes podem ser mitigados através de medidas compensatórias previstas em lei.

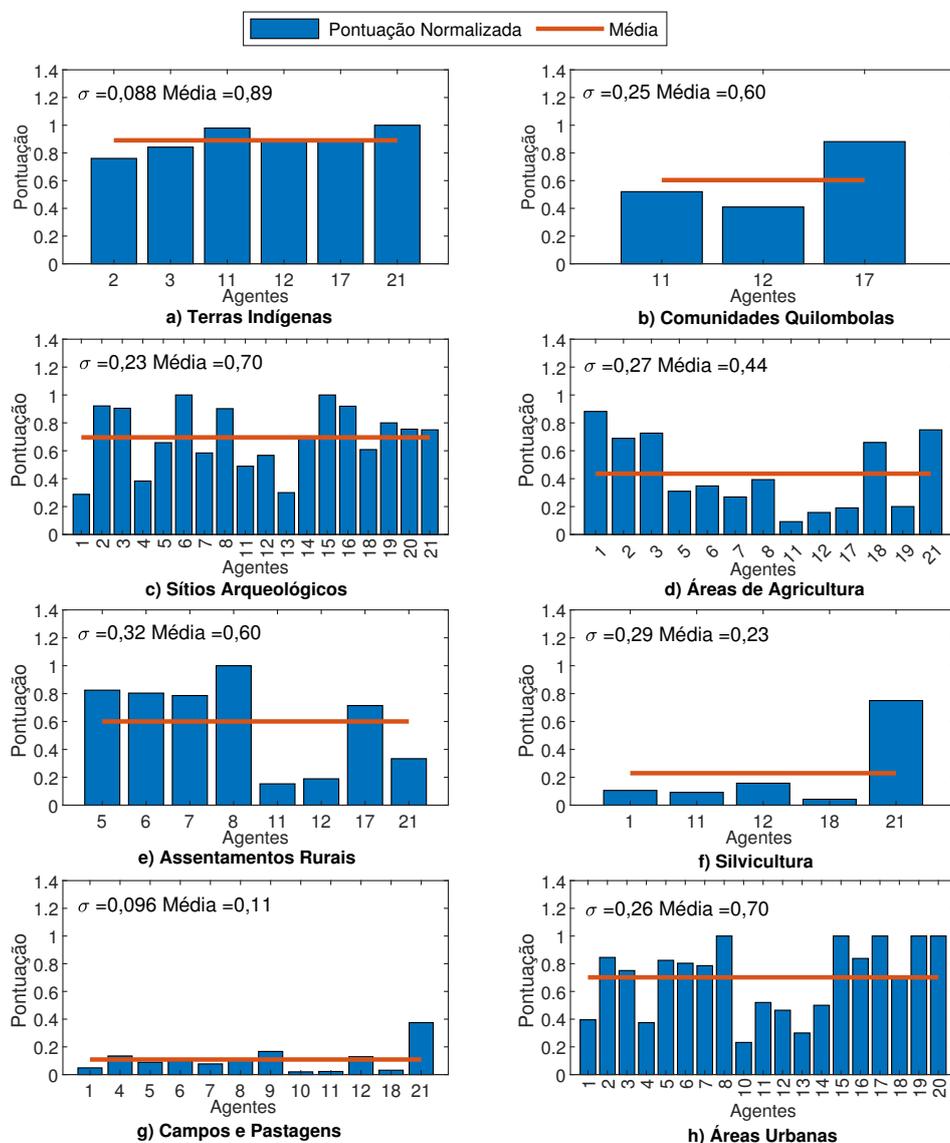
Outro aspecto relevante na análise é o fato de que algumas dessas áreas representadas pelos subcritérios, apesar de possuírem baixa atratividade do ponto de vista do impacto ambiental significativo, podem representar atratividade do ponto de vista técnico. Por exemplo, suprimir vegetação em uma área de floresta é uma atividade relativamente simples do ponto de vista de engenharia, representando menos complexidade, do que estabelecer uma faixa de servidão em uma área urbana, por exemplo. O mesmo pode ser verificado para as áreas úmidas, ricas em biodiversidade e, em geral, formadas por planícies com poucos obstáculos e, portanto, áreas mais simples para se estabelecer uma linha de transmissão. Neste caso, as pontuações baixas atribuídas por alguns tomadores de decisão para esses subcritérios, podem estar relacionadas com a possibilidade destas áreas serem consideradas atrativas do ponto de vista técnico, sendo o aspecto ambiental tratado como uma externalidade.

3.1.5.2 Subcritérios da classe social

A Figura 14 apresenta as pontuações normalizadas para os subcritérios presentes nos critérios da classe social. Nota-se que, para o subcritério “Terras Indígenas”, há um consenso na baixa atratividade destas áreas, devido ao impacto social causado pela abertura

de acessos e estabelecimento de uma faixa de servidão, ademais, há uma complexidade fundiária significativa para construção de empreendimentos nestas áreas.

Figura 14 – Pontuações normalizadas para subcritérios da classe social



Fonte: do autor

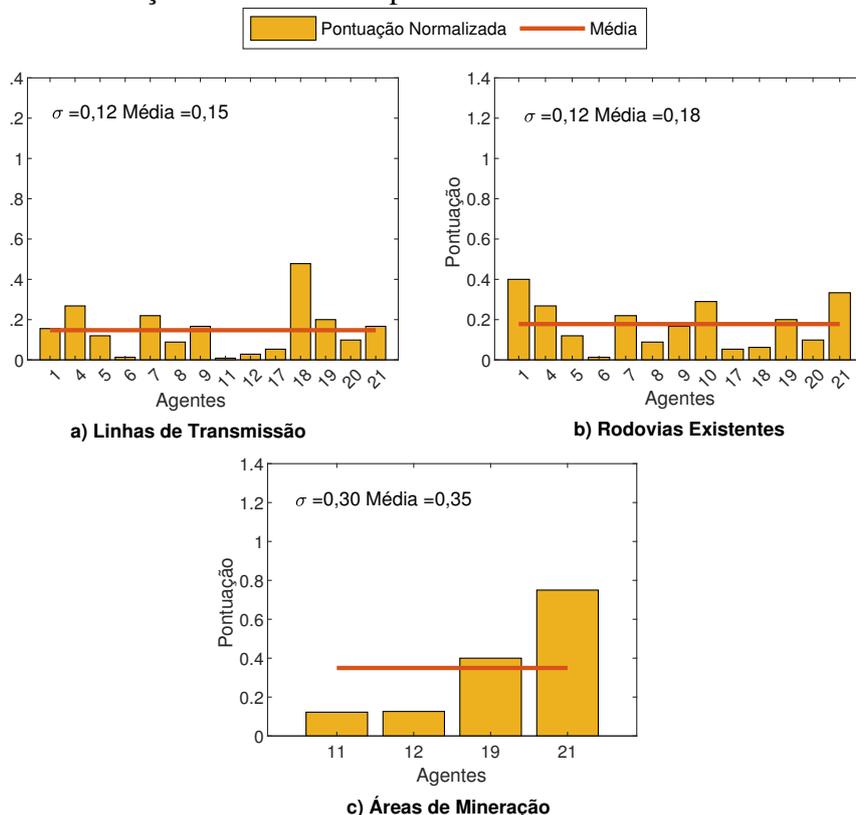
Quanto aos subcritérios “Comunidades Quilombolas” e “Assentamentos Rurais” se verifica que não há uniformidade nos valores, provavelmente pelo fato de que há uma tendência maior em acordos de compensação financeira pelo uso das mesmas, com intermédio de agentes do estado. Em menor escala, as “Áreas de Agricultura” também envolvem uma questão fundiária em relação à compensação financeira aos proprietários das terras que a linha cruzará. Entretanto, as negociações ocorrem diretamente entre a empresa executora da obra e os proprietários das terras, acelerando o processo. Ademais, revelam-se atrativas do ponto de vista técnico, uma vez que não possuem obstáculos elevados e possuem acessos facilitados.

Quanto ao subcritério “Patrimônio Histórico” verifica-se que há uma tendência de atribuição de pontuação mais elevada, no entanto, nota-se também o componente de subjetividade, provavelmente pelo fato de que estas áreas, em geral, não possuem dimensão elevada, muitas vezes passíveis de desvios, sem impacto significativo na rota das linhas. Os subcritérios “Silvicultura” e “Campos e Pastagens” apresentam de maneira geral maior atratividade, pelo fato de que tais áreas, em geral, são planas ou com pouca variação de declividade. As áreas de “Silvicultura” possuem uma desvantagem pelo fato de necessitarem de supressão vegetal, em detrimento dos campos e pastagens que possuem ausência de obstáculos significativos, representando portanto, áreas atrativas para construção das linhas. As “Áreas Urbanas” também demonstram a subjetividade no processo de pesquisas estruturadas com especialistas, pois apesar de apresentarem tendência de pontuação mais elevada, não há um consenso definido. No entanto, é inegável que estas áreas possuem significativa complexidade para construção de linhas, e na medida do possível, devem ser acessadas apenas para conexão das linhas com as subestações.

3.1.5.3 Critérios da classe técnico-econômica

A Figura 15 apresenta as pontuações normalizadas dos subcritérios “Linhas de Transmissão”, “Rodovias” e “Áreas de Mineração”, pertencentes à classe técnico-econômica.

Figura 15 – Pontuações normalizadas para subcritérios da classe técnico-econômica

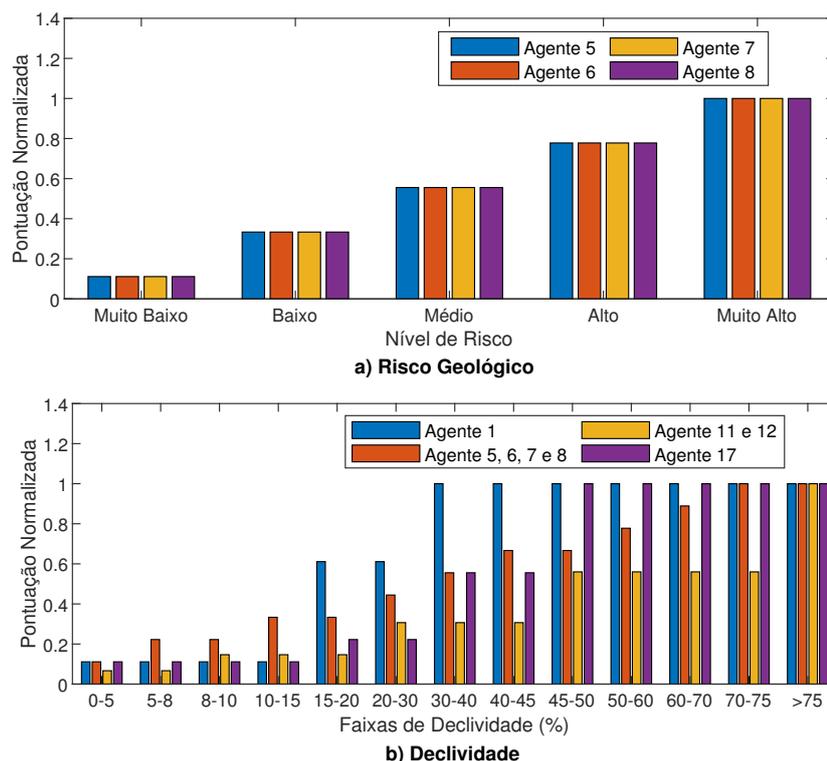


Fonte: do autor

As baixas pontuações normalizadas dos subcritérios “Linhas de Transmissão Existentes” e “Rodovias Existentes” evidenciam que há uma atratividade de se estabelecer a faixa de servidão das novas linhas buscando paralelismo com estes corredores de infraestrutura linear já existente. Quanto ao subcritério “Áreas de Mineração”, nota-se que também não há um consenso em relação a atratividade deste tipo de área, este comportamento pode estar relacionado com o fato de que estas áreas em geral não oferecem obstáculos significativos ao traçado da linha, no entanto, em geral são áreas de terreno acidentado e envolvem questões fundiárias de compensação financeira aos proprietários.

Os critérios “Risco de Geológico” e “Declividade do Terreno” apresentam subcritérios discretizados em faixas, portanto, optou-se pela normalização das pontuações utilizando a pontuação máxima apresentada dentro do próprio critério, em detrimento, da pontuação máxima de toda a publicação, a Figura 16 apresenta os resultados encontrados. Os agentes apresentados nas legendas referem-se às publicações apresentadas na Tabela 2.

Figura 16 – Pontuação normalizada para risco geológico e declividade



Fonte: do autor

Considerar o critério “Risco Geológico” é importante no que diz respeito às condições de fundação e estruturais das torres, uma vez que a movimentação do solo pode ocasionar a queda das estruturas e interrupção de funcionamento da linha. No entanto, apenas Dedemen (2013) aborda este aspecto, a partir da análise de diferentes especialistas. Nota-se, que a normalização resultou em pontuações normalizadas idênticas, que crescem de maneira escalonada, conforme se aumenta o risco geológico. A base brasileira

de dados geoespaciais de risco geológico (CPRM, 2021) adotada para modelagem deste critério discretiza os riscos em “alto” e “muito alto”, desta forma, adotou-se esta classificação neste trabalho, atribuindo-se a pontuação 7 e 9, respectivamente. Este processo está detalhado na Seção 3.2.15.

A declividade do terreno é outro critério de significativa importância, pois influencia diretamente nos custos das torres e na complexidade técnica de implementação das mesmas. Na Figura 16, nota-se que há uma grande variação de faixas de declividade abordadas nas publicações. É possível observar que, para todos os casos, a pontuação normalizada aumenta conforme cresce a declividade, o que de fato é esperado. No entanto, nota-se que essa taxa de crescimento se altera para diferentes publicações. Este fato está relacionado com as características locais em que cada tomador de decisão está inserido, por exemplo, para países com relevo menos acidentado, a tendência é haver uma menor discretização de declividades com pontuações naturalmente menores. Para locais com relevo acidentado, a tendência é haver uma discretização mais acentuada, com pontuações mais elevadas.

Neste trabalho, optou-se por considerar a classificação de faixa de declividades apresentadas por EMBRAPA (2018), detalhadas na Seção 3.2.16. Para este critério não foi utilizada a sistemática de pontuação apresentada na Seção 3.1.2, pelo fato de haver complexidade em consolidar todas as faixas de declividade apresentadas nas publicações, com as faixas apresentadas em EMBRAPA (2018). Portanto, para este caso, foram atribuídos os valores de pontuação de 1 a 9, de maneira simétrica nas faixas de declividade consideradas.

O critério velocidade média de ventos também se trata de um aspecto relevante do ponto de vista técnico, uma vez que, em locais com ventos mais constantes há uma tendência de aumento da troca de calor dos condutores da linha de transmissão, aumentando sua capacidade de condução de corrente. No entanto, este subcritério é abordado apenas em Freiman e Santos (2019). Deste modo, neste trabalho, optou-se por utilizar a mesma pontuação atribuída desta publicação.

3.1.6 Pontuação atribuída para os subcritérios

A Tabela 7 apresenta um quadro resumo com a pontuação final atribuída para cada um dos subcritérios considerados neste trabalho com base na normalização das pontuações e, classificação de acordo com a escala apresentada na Tabela 4. Através da normalização das pontuações evidencia-se a subjetividade deste tipo de abordagem, uma vez que estas pontuações são atribuídas por especialistas, com base em suas experiências próprias e no conhecimento tácito que cada um possui. Desta forma, todas as técnicas de MCDA descritas no Capítulo 2, das mais simples às de maior complexidade, agregam este componente de subjetividade ao processo (VERONESI *et al.*, 2017).

Tabela 7 – Pontuação atribuída para os subcritérios adotados neste trabalho

Critério	Subcritério	Pontuação Atribuída (<i>a</i>)
Áreas Ambientalmente Sensíveis	Áreas de Preservação Ambiental	9
	Áreas de Preservação Permanente	3
	Rota de Aves Silvestres	7
	Cavidades Naturais Subterrâneas	7
	Formações Florestais	6
	Áreas Úmidas	8
Recursos Hídricos	Rios e Córregos	5
	Lagos	6
Locais com Relevante Interesse Histórico e Cultural	Terras Indígenas	9
	Comunidades Quilombolas	6
	Patrimônio Histórico	7
Uso do Solo	Áreas de Agricultura	4
	Assentamentos Rurais	6
	Silvicultura	2
	Campos e Pastagens	1
	Áreas de Mineração	3
	Áreas Urbanas	7
Infraestrutura Linear Existente	Linhas de Transmissão	1
	Estradas	2
Risco Geológico	Muito Alto	9
	Alto	7
Declividade	Plano	1
	Suave	2
	Ondulado	4
	Forte Ondulado	6
	Montanhoso	8
	Escarpado	9
Velocidade Média de Ventos V_m	$0 < V_m \leq 1,5$ m/s (Faixa 1)	4
	$1,5 < V_m \leq 3$ m/s (Faixa 2)	3
	$3 < V_m \leq 4,5$ m/s (Faixa 3)	2
	$V_m > 4,5$ m/s (Faixa 4)	1

Em Wang *et al.* (2009) discute-se três fatores que são geralmente considerados para obter os pesos: o grau de variância dos critérios, a independência de critérios e a preferência subjetiva dos tomadores de decisão. Portanto, no que diz respeito à variância e preferência subjetiva, estes aspectos ficaram evidentes a partir de alguns dos resultados das pontuações normalizadas apresentadas nas Figuras 13, 14, 15 e 16.

3.2 Caracterização da análise espacial

Os dados geoespaciais para modelagem de cada subcritério, foram obtidos junto à órgãos governamentais e de pesquisa, estão detalhados na Tabela 8, que apresenta o tipo de representação, a escala dos dados e a fonte dos mesmos.

Tabela 8 – Caracterização dos dados geoespaciais utilizados

Critério/Subcritério	Representação	Escala	Fonte
Unidades de Conservação	Vetorial	Não Informado	(MMA, 2022a)
Rotas de Aves	Vetorial	Não Informado	(OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2016)
Cavidades Naturais	Vetorial	Não Informado	(MMA, 2022b)
Formações Florestais	Matricial	30 x 30 m	(MAPBIOMAS, 2018)
Áreas Úmidas	Matricial	30 x 30 m	(MAPBIOMAS, 2018)
Rios e Córregos	Vetorial	1:25000	(IBGE, 2018a) e (IBGE, 2018b)
Lagos	Vetorial	1:25000	(IBGE, 2018a) e (IBGE, 2018b)
Terras Indígenas	Vetorial	Não Informado	(FUNAI, 2022)
Comunidade Quilombola	Vetorial	Não Informado	(INCRA, 2022a)
Patrimônio Histórico	Vetorial	Não Informado	(IPHAN, 2022)
Áreas de Agricultura	Matricial	30 x 30 m	(MAPBIOMAS, 2018)
Assentamentos Rurais	Vetorial	Não Informado	(INCRA, 2022b)
Silvicultura	Matricial	30 x 30 m	(MAPBIOMAS, 2018)
Campos e Pastagens	Matricial	30 x 30 m	(MAPBIOMAS, 2018)
Processos Minerários	Vetorial	Não Informado	(ANM, 2022)
Áreas Urbanas	Matricial	30 x 30 m	(MAPBIOMAS, 2018)
Linhas de Transmissão	Vetorial	Não Informado	(EPE, 2022)
Estradas Existentes	Vetorial	Não Informado	(BRASIL, 2022)
Risco Geológico	Vetorial	Não Informado	(CPRM, 2021)
Declividade	Matricial	90 x 90 m	(WEBER; HASENACK, 2004)
Mapa de Ventos	Matricial	90 x 90 m	(DTU, 2022)
Aeródromos	Vetorial	Não Informado	(BRASIL, 2022)

Nas próximas seções, serão especificadas e detalhadas as particularidades adotadas para modelagem de cada um dos subcritérios.

3.2.1 Unidades de conservação

As unidades de conservação são formadas por espaços territoriais com características naturais relevantes e possuem como objetivo principal manter a conservação ambiental nestes limites territoriais definidos, sob regime especial de administração e proteção legal (MMA, 2022a). No Brasil, as unidades de conservação dividem-se em dois grupos, com características específicas, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Categorias de unidades de conservação



Fonte: do autor

As unidades de conservação de proteção integral (PI) devem garantir a manutenção dos ecossistemas livres de alterações causadas por interferência humana, admitindo apenas o uso indireto dos seus atributos naturais. As unidades de conservação de uso sustentável (US) são definidas como áreas de exploração do ambiente, garantindo a perenidade dos recursos ambientais renováveis, preservando os atributos ecológicos, de forma socialmente justa e economicamente viável e, portanto, permitem a interferência humana de maneira sustentável.

No contexto deste trabalho, foram consideradas como áreas proibitivas para implementação das novas linhas de transmissão todas as unidades de conservação de proteção integral. Além disto, para as unidades de conservação de uso sustentável, foram consideradas como áreas proibitivas: as florestas nacionais, as reservas extrativistas, as reservas de fauna, as reservas de desenvolvimento sustentável e reservas particulares do patrimônio natural. Este processo foi realizado bloqueando as células dos arquivos matriciais que representam tais regiões com a pontuação 1.000.000.

Portanto, dentre todas as categorias de unidades de conservação elegíveis para receberem linhas de transmissão foram consideradas apenas as Áreas de Proteção Ambiental (APA), pois via de regra são áreas extensas, com domínio público e privado, que preveem a ocupação humana e uso sustentável de seus recursos. Destaca-se que a construção de linhas de transmissão neste tipo área é comum em diversas regiões do Brasil. Os dados geoespaciais obtidos para estas áreas estão apresentados na base de dados de unidades de conservação do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2022a), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS *South American* 1969.

3.2.2 Rotas de aves silvestres

Um dos impactos na fauna mais discutidos nos projetos de linhas de transmissão diz respeito às aves silvestres, que podem passar a utilizar as estruturas da linha como habitat ou colidir com as mesmas durante o voo (BIASOTTO *et al.*, 2017). Neste trabalho, este aspecto foi modelado através dos dados geoespaciais apresentados por Oliveira *et al.* (2016), fornecidos no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000. No qual são apresentadas as áreas de concentração de aves migratórias e as áreas com registros de aves ameaçadas de extinção.

3.2.3 Áreas de preservação permanente

As Áreas de Preservação Permanente (APP) são áreas protegidas, cobertas ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos e, de maneira geral, são as porções de vegetação que preenchem as margens dos rios, as nascentes e as encostas. A preservação destas áreas garante a estabilidade geológica, a biodiversidade, facilita o fluxo de fauna e flora, protege o solo e assegura o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2017).

Os termos legais deste tipo de área estão apresentados em BRASIL (2017), onde são definidas faixas legais de APP de acordo com as dimensões dos rios e lagos, a declividade de encostas e tamanhos das nascentes. Neste trabalho, as APP's foram determinadas a partir dos dados geoespaciais de rios, córregos e lagos, destaca-se que, de acordo com BRASIL (2017), a classificação de APP's para rios é determinada a partir da largura média dos mesmos, no entanto, esta informação não está apresentada na base de dados geoespaciais destas feições geográficas, portanto, optou-se por realizar a seguinte simplificação de dimensão das APP's:

- 30 metros para as feições classificadas como córregos e sangas;
- 100 metros para as feições classificadas como rios;
- 50 metros para lagos com menos de 20 hectares de área; e
- 100 metros para lagos com mais de 20 hectares de área.

As APP's de lagos foram determinadas através de sua área, informação presente na base de dados geoespaciais destas feições. Não foram consideradas as APP's presentes em nascentes e encostas devido a falta de dados geoespaciais confiáveis destas áreas. As APP's foram determinadas a partir da função *Buffer* do ArcGIS®. Estes dados foram obtidos através da base cartográfica contínua do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2018a) e Santa Catarina (IBGE, 2018b), fornecidos no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000. Destaca-se que, devido suas limitações de escala, estas bases cartográficas podem não representar todos os atributos relacionados à modelagem adotada das APP's.

3.2.4 Cavernas naturais subterrâneas

As cavernas (ou cavidades naturais) são ecossistemas constituídos por sistemas de canais horizontais e/ou verticais, com fraturas geológicas de variações irregulares, formando um complexo sistema de condutos que preservam a biodiversidade local, a base de dados geoespaciais deste tipo de feição geográfica é apresentada por MMA (2022b), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000. Destaca-se que foi considerada a zona de amortecimento de 250 m a partir do centro das cavidades apresentadas na base de dados obtida, utilizando a função *Buffer* do ArcGIS®.

3.2.5 Formações florestais

O Brasil é um dos países com maior cobertura vegetal no mundo, com 59,7% do território nacional, cobertos por vegetação nativa MAPBIOMAS (2022). Com o processo de expansão urbana e ocupação do território evidencia-se que a manutenção da vegetação nativa e remanescentes florestais, auxiliam na conservação da biodiversidade, do solo, no aumento da produção agrícola, manutenção de recursos hídricos, redução e absorção

de emissões de carbono. Para este subcritério, considerou-se a categoria de atributos referente às formações florestais presentes na base apresentada em MAPBIOMAS (2018), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS WGS 1984.

3.2.6 Rios, córregos e lagos

Para efeitos técnicos, os rios podem ser definidos como correntes contínuas de água, mais ou menos caudalosos, que desaguam em outro rio, lago ou mar. Em geral, consideram-se rios os cursos d'água com significativa grandeza, no entanto, não há consenso exato a partir de qual tamanho utiliza-se esta nomenclatura, muitas vezes reservando-se o termo para os maiores e principais canais de uma bacia de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1974). Para cursos de água menores, em geral, adota-se a nomenclatura de córrego, arroio, riacho, entre outros. Já os lagos, são corpos d'água interiores de grande extensão sem comunicação direta com o mar, e quando a possuem, são denominados como lagunas.

A hidrografia da região em que a nova linha de transmissão será construída é um aspecto importante, sendo a largura de rios um fator que pode acarretar a necessidade de supressão vegetação natural no leito do curso d'água (APP's), evidenciando um impacto ambiental significativo e devendo ser evitado. Eventualmente, em rios com largura acentuada, há também a necessidade de construção de torres no interior da calha do mesmo que além de gerar impacto ambiental, agrega complexidade técnica ao projeto. Estes dados foram obtidos através da base cartográfica contínua do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2018a) e Santa Catarina (IBGE, 2018b), fornecidas no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000.

3.2.7 Áreas úmidas

As áreas úmidas são formadas por pantanais e superfícies terrestres cobertas de forma periódica por águas e cobertas originalmente por florestas ou outras formas de vegetação adaptadas à inundação (BRASIL, 2019). Destaca-se, que este tipo de ecossistema é importante para a biodiversidade pois abriga diversas espécies de fauna (anfíbios, répteis, aves e peixes) que dependem destas regiões para a reprodução e migração. No que diz respeito a linhas de transmissão, além do impacto ambiental causado pela execução da obra, podem ocorrer dificuldades de acesso às estruturas durante os anos de operação, uma vez que se tratam de regiões com alagamentos intermitentes, evidenciando também um obstáculo técnico-econômico. Para este subcritério considerou-se a categoria de atributos referente às áreas úmidas presentes na base apresentada em MAPBIOMAS (2018), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS WGS 1984.

3.2.8 Terras indígenas, comunidades quilombolas e assentamentos rurais

De acordo com BRASIL (1973) as terras indígenas são áreas tradicionalmente ocupadas por estes povos, que possuem direito exclusivo de explorar as riquezas naturais

do solo, dos rios e dos lagos nelas existentes, ressalvado o relevante interesse público da União. As comunidades quilombolas são formadas a partir dos povos que vivem em terras com remanescentes de Quilombos que obtiveram direito de propriedade definitiva, sendo este processo conduzido pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) (BRASIL, 1988). Quanto aos assentamentos rurais, o INCRA também conduz o processo de transferência de propriedades rurais improdutivas para famílias sem condições econômicas para adquirir e manter um imóvel rural por outras vias.

Em todos estes casos, a União possui papel importante na intermediação das negociações fundiárias em relação à compensação financeira de se estabelecer linhas de transmissão nestas áreas, fato que pode acarretar atrasos e disputas judiciais. As bases de dados geoespaciais destas áreas foram obtidas através dos órgãos governamentais responsáveis pelo seu gerenciamento com fonte apresentada na Tabela 8 e fornecidas no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000.

3.2.9 Patrimônio histórico

Neste trabalho, para modelar o patrimônio histórico adotou-se a base de dados geoespaciais de sítios arqueológicos apresentada por IPHAN (2022), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000. Tendo em vista que o Brasil possui mais de 26 mil sítios arqueológicos cadastrados e reconhecidos como parte integrante do patrimônio cultural brasileiro, sendo considerados bens patrimoniais da União (IPHAN, 2022). Considerou-se uma zona de influência de 120 metros obtida a partir do centro de cada sítio arqueológico, este processo foi realizado com a função *Buffer* do ArcGIS®.

3.2.10 Áreas de mineração

As áreas de mineração consideradas neste trabalho dizem respeito às concessões de lavras ativas da base de dados geoespaciais apresentada por ANM (2022), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000. Estas áreas, em geral, possuem o solo comprometido pelo processo de extração de minério, dificultando posicionamento de torres e construção de fundações. Ademais, trata-se de uma cadeia produtiva que utiliza maquinário pesado com altura significativa, sendo passível de violação das distâncias mínimas dos condutores.

3.2.11 Áreas de agricultura e silvicultura

Cerca de 7,8% do território nacional é coberto por algum tipo de produção agrícola (IBGE, 2020a). Em uma escala menor de produção, a silvicultura representa aproximadamente 1,1% do território nacional, tais áreas caracterizadas por plantios florestais de espécies exóticas ou nativas como monoculturas (IBGE, 2020b).

Estes critérios influenciam significativamente nos traçados de linhas de transmissão, uma vez que restringem os tipos de culturas que podem ser adotadas na faixa de servidão

das linhas. Para as áreas de silvicultura há um agravante devido a altura das árvores cultivadas, sendo necessária a supressão da vegetação na área dos corredores das linhas. Estes dados foram obtidos na base apresentada em MAPBIOMAS (2018), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS WGS 1984.

3.2.12 Campos e pastagens

As pastagens são áreas com formações herbáceas e herbáceo-arbustivas podendo ser nativas ou implantadas, e ocupam aproximadamente 21,2% do território brasileiro (EMBRAPA, 2020). No contexto das linhas de transmissão, este tipo de área pode ser considerada atrativa no âmbito técnico-econômico, pois em geral possui acessos facilitados, a presença de vegetação rasteira descarta a necessidade de supressão vegetal e há baixo risco de incidentes devido o contato da vegetação com os condutores. Em contrapartida, há necessidade de custos indenizatórios aos proprietários das terras devido a ocupação do corredor da linha de transmissão, além do impacto ambiental em espécies de fauna e flora nativa. Os dados geoespaciais destas áreas foram obtidos na base de dados apresentada em MAPBIOMAS (2018), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS WGS 1984.

3.2.13 Áreas urbanas

O interior de áreas urbanas, possivelmente, são as áreas mais complexas para determinação de traçados de linhas de transmissão, tendo vista a série de variáveis envolvidas no processo, como presença de prédios sensíveis, altura de edifícios, impacto visual, poluição e principalmente questões espaciais para posicionamento das torres. Na medida do possível os traçados devem desviar de regiões densamente povoadas e ocupadas, restringindo-se apenas ao caso de conexão da linha com a subestação. Os dados geoespaciais destas áreas foram obtidos na base de dados apresentada em MAPBIOMAS (2018), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS WGS 1984.

3.2.14 Linhas de transmissão e rodovias existentes

Segundo a EPE (2018) sempre que possível, o traçado das novas linhas de transmissão deve buscar proximidade com infraestrutura de apoio logístico e com acessos que permitam o tráfego de veículos motorizados que transportam carga de grande porte. Além de buscar prioritariamente compartilhamento ou justaposição com faixa de servidão de linhas de transmissão existentes ou planejadas, ou outros empreendimentos lineares, exceto para gasodutos e oleodutos, ou empreendimentos em que identificam-se restrições e impactos negativos superiores à vantagem em realizar o compartilhamento da faixa.

Pelo fato das bases de dados fornecerem apenas a diretriz destas estruturas, considerou-se uma faixa de servidão para as linha de transmissão de 100 m de largura, assim como para as estradas existentes considerou-se uma faixa de domínio de 60 metros. Para ambos

os casos utilizou-se a função *Buffer* do ArcGIS®. Destaca-se que as estradas consideradas são as rodovias estaduais e federais presentes nas áreas de estudo e obtidas em (BRASIL, 2022) e as linhas de transmissão consideradas fazem parte do SIN e estão apresentadas em EPE (2022). Ambas as bases são fornecidas no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000.

3.2.15 Risco geológico

Segundo o CPRM (2021), o risco geológico é a relação entre a probabilidade de ocorrência de um evento adverso de natureza geológica e a magnitude de suas consequências socioeconômicas. Na base de dados obtida, estão apresentadas as áreas com risco geológico alto e muito alto, sendo que os principais riscos considerados são: enxurradas, inundações, estiagem e movimentos de massa. Os movimentos de massa podem ser definidos como movimentos de solo, rocha e/ou vegetação sob a ação direta da gravidade, com possível contribuição de outro meio como água ou gelo (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). A integração deste tipo de variável na modelagem geoespacial pode prevenir possíveis traçados que cruzem encostas e áreas de potencial risco para o posicionamento das torres, ademais, este tipo de desastre natural é recorrente no Brasil, fato que corrobora para que o mesmo seja incluído nas análises. A base dados de risco geológico considerada é apresentada pelo Serviço Geológico do Brasil em CPRM (2021), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000.

3.2.16 Declividade do terreno

A declividade do terreno é a inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal, ou seja, a relação entre a diferença de altura entre dois pontos e a distância horizontal entre esses pontos, usualmente apresentado em percentual de inclinação ou declividade. O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (EMBRAPA, 2018), considera as classes de relevo apresentadas a seguir.

- Plano: superfície horizontal onde os desnivelamentos são muito pequenos, com declividades variáveis de 0% a 3%.
- Suave ondulado: superfície apresentando declives suaves, variáveis de 3% a 8%.
- Ondulado: superfície com colinas, apresentando declives moderados, variáveis de 8% a 20%.
- Forte ondulado: superfície com morros, apresentando declives fortes, variáveis de 20% a 45%.
- Montanhoso: superfície com predomínio de formas acidentadas com morros, montanhas e maciços montanhos, declives fortes e muito fortes de 45% a 75%.

- Escarpado: áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpamentos, declives muito fortes, usualmente com declividades superiores a 75%.

A base de dados geoespaciais utilizada para modelar este critério está apresentada em Weber e Hasenack (2004), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS WGS 1984. No que diz respeito ao traçado das linhas de transmissão, os tipos de relevo ao longo da diretriz impactam fortemente na complexidade das obras e na alocação de torres e instalação dos condutores. Segundo EPE (2018), terrenos com declividade superior a 75% devem ser evitados na medida do possível.

3.2.17 Velocidade média dos ventos

No contexto deste trabalho, considerar a velocidade média dos ventos na região de estudo consiste em buscar o aumento da capacidade de condução de corrente da linha de transmissão, uma vez que os mesmos auxiliam na troca de calor dos condutores através da convecção. O mapa de velocidade média dos ventos foi obtido através do Global Atlas Wind, projeto desenvolvido pelo departamento de energia eólica da Universidade da Dinamarca (DTU, 2022), sendo fornecido no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000. Os dados foram obtidos para uma altura de 50 m, cuja velocidade média máxima obtida para as regiões do estudo foi de 12,53 m/s. A análise de rajadas máximas de ventos e sua influência nos custos estruturais da linha não foi realizada nesse trabalho.

3.2.18 Aeródromos

Além das unidades de conservação removidas da análise, conforme detalhado anteriormente, também foram bloqueados os aeródromos e suas zonas de influência, consideradas, neste caso, como um raio de 3 km a partir do aeródromo, de acordo com BRASIL (2020). Para execução deste processo utilizou-se a função *Buffer* do ArcGIS®. Destaca-se que o bloqueio destas áreas consistiu em atribuir uma pontuação muito elevada para as mesmas (1.000.000). A base de dados geoespaciais utilizada para modelar este critério está apresentada em BRASIL (2022), fornecida no sistema de coordenadas geográficas GCS SIRGAS 2000.

3.3 Estudos de caso e implementação das análises

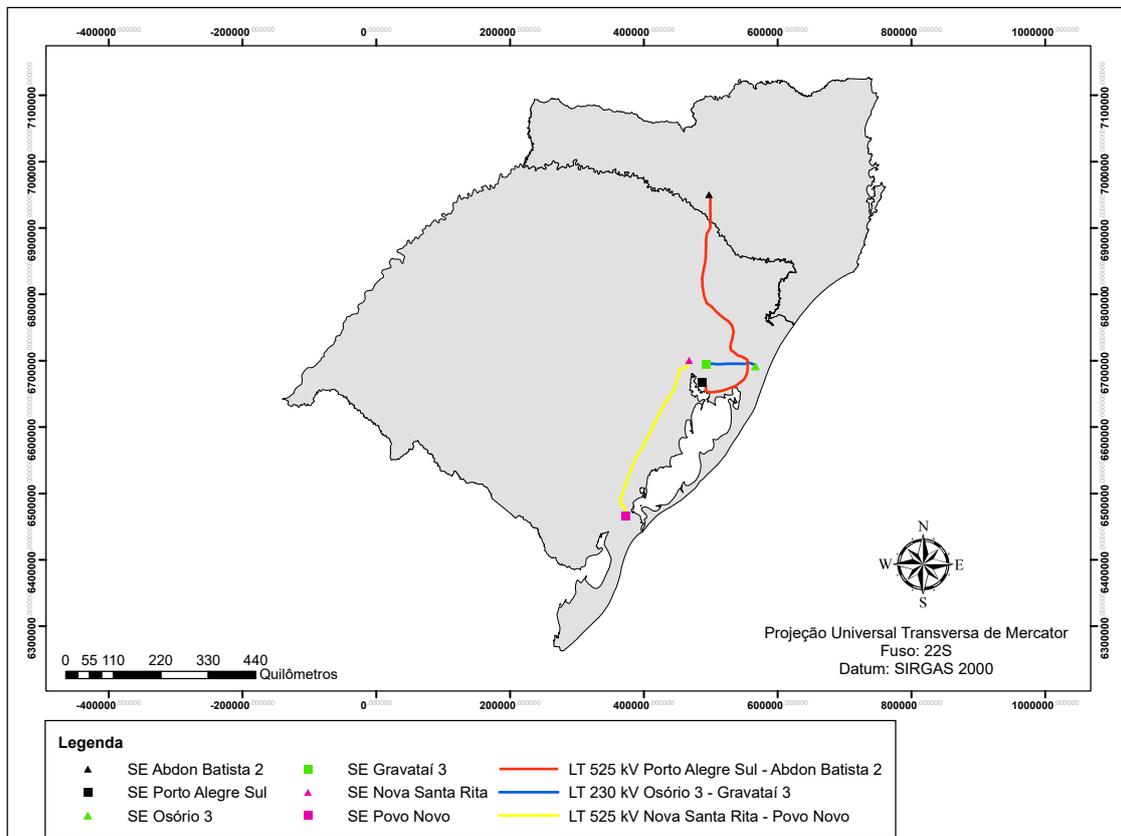
Nesta seção, estão apresentadas as linhas de transmissão adotadas como estudo de caso, assim como o detalhamento da implementação da análise multicritério e espacial.

3.3.1 Características dos Estudos de Caso

Os estudos de caso selecionados são linhas de transmissão localizadas na faixa leste do estado do Rio Grande do Sul e parte de Santa Catarina. A Figura 18 apresenta a posição

das linhas de transmissão selecionadas nos mapas destes estados.

Figura 18 – Localização das linhas de transmissão adotadas como estudo de caso



Fonte: do autor

Optou-se por linhas de transmissão com distintos comprimentos e complexidade técnica e socioambiental, permitindo avaliar o método adotado frente à estas particularidades específicas. A seguir está apresentado um breve detalhamento de cada linha adotada como estudo de caso.

3.3.1.1 Estudo de Caso 1: LT 230 kV Osório 3 - Gravataí 3

Esta linha de transmissão encontra-se licitada, e está em fase de construção. Irá operar com tensão de 230 kV e, em seu projeto original, o eixo principal da linha apresenta aproximadamente 77 km de comprimento. Conecta a subestação Osório 3, localizada no município de Osório à subestação Gravataí 3, localizada no município de Gravataí. Um de seus principais propósitos é escoar o potencial de geração eólica das usinas localizadas na região litorânea do Rio Grande do Sul, para os centros de carga na região metropolitana do estado. Encontra-se em uma região com complexidade socioambiental elevada, principalmente na região da subestação Osório 3.

3.3.1.2 Estudo de Caso 2: LT 525 kV Porto Alegre Sul - Abdon Batista 2

Esta linha de transmissão está planejada, no entanto, ainda não foi leiloadada. Irá operar com tensão de 525 kV e, em seu projeto original, o eixo principal da linha apresenta aproximadamente 394 km de comprimento. Conectará a subestação Porto Alegre Sul, localizada no município de Porto Alegre (RS) à subestação Abdon Batista 2, localizada no município de Abdon Batista (SC). Um de seus principais propósitos é aumentar a confiabilidade do atendimento ao estado do Rio Grande do Sul. Possui comprimento elevado com algumas mudanças de direção do traçado do seu eixo, cruza regiões serranas do estado do RS com presença de unidades de conservação ambiental.

3.3.1.3 Estudo de Caso 3: LT 525 kV Nova Santa Rita - Povo Novo

Esta linha de transmissão já está operando desde o ano 2015, possui tensão de 525 kV e o eixo principal da linha apresenta aproximadamente 268 km de comprimento. Conecta a subestação Nova Santa Rita, localizada no município de Nova Santa Rita (RS) à subestação Povo Novo, localizada no município de Rio Grande (RS). Esta linha também tem como um dos seus principais propósitos escoar o potencial de geração eólica das usinas localizadas na região sul do Rio Grande do Sul, para os centros de carga na região metropolitana do estado, além de aumentar a confiabilidade do sistema na região. Seu traçado tem característica retilínea sem desvios importantes, encontra-se em uma região com pouca variação de declividade e baixa densidade populacional.

3.3.2 Consolidação da análise espacial e multicritério

Nesta Seção está apresentada a consolidação da implementação da análise multicritério e análise espacial apresentadas nas seções 3.1 e 3.2, respectivamente. Este processo foi realizado utilizando o software ArcGIS® e foi composto pelas etapas apresentadas a seguir.

1. Estabeleceu-se um sistema de projeção cartográfica comum para todos os arquivos. Neste trabalho, adotou-se a projeção Universal Transversa de Mercator ZONA 22S, com Datum SIRGAS 2000. Este procedimento foi realizado com a função *project*.
2. Realizou-se a transformação dos arquivos com representação vetorial para arquivos com representação matricial, utilizando a função *Polygon to Raster*. Este processo foi realizado, pois a abordagem adotada utiliza arquivos matriciais para determinação do caminho de menor custo.
3. Compatibilizou-se a resolução espacial dos dados geoespaciais utilizando a função *Resampling* com método de interpolação *Nearest*. Neste trabalho, adotou-se o valor de 30 m para resolução das células dos arquivos matriciais.

4. Utilizando a ferramenta *clip*, determinou-se uma área de avaliação para cada estudo de caso adotado. Para o Estudo de Caso 1, considerou-se uma superfície de 4334 x 1401 células, para os Estudos de Caso 2 e 3, considerou-se uma superfície de 8001 x 11001 células.
5. Realizou-se o processo de reclassificação dos arquivos rasters com a função *Reclassify* adotando os valores apresentados na Tabela 7.

A partir das camadas de dados geoespaciais já processadas, foi realizado o procedimento de sobreposição das camadas de dados, a fim de elaborar as superfícies de custos para cada cenário de cada estudo de caso. Estas etapas estão detalhadas a seguir.

1. Inicialmente foram obtidas as superfícies de custo de cada critério utilizando a função *Mosaic* para sobreposição das camadas de subcritérios, formando as camadas representadas pela Equação (12).
2. Utilizando a função *Map Algebra* realizou-se a soma ponderada das camadas de critérios e suas classes, utilizando a Equação (11), considerando os pesos de critérios apresentados na Tabela 5 e os pesos de classe de critérios apresentados na Tabela 6.
3. Como resultado, obteve-se uma superfície de custos final, para cada cenário proposto para cada estudo de caso.

Os custos finais atribuídos para cada subcritério considerando cada cenário, estão apresentados graficamente no Apêndice A.

3.4 Análise de caminho de custo mínimo

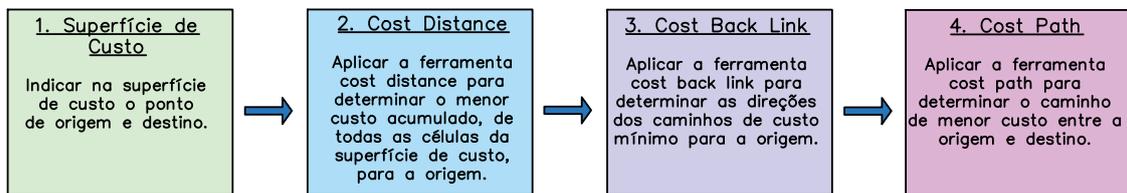
Pelo fato da abordagem representar um problema caracterizado através da análise de caminhos de custo mínimo, os principais softwares que utilizam SIG (ArcGIS® e QGIS®) já possuem ferramentas de análise de caminho de custo mínimo incorporadas. No entanto, há também a possibilidade de implementação de algoritmos em softwares que utilizam linguagens de programação como Python™ (ArcPy no ArcGIS®) ou Matlab® (*Mapping Toolbox*) e, nestes casos, o Algoritmo de Dijkstra é amplamente empregado como base nas análises. Deste modo, nas próximas duas subseções são apresentadas as principais características de cada uma das abordagens.

3.4.1 Análise de caminhos de custo mínimo no ArcGIS®

No âmbito do ArcGIS®, a análise de caminho de custo mínimo faz parte da *toolbox Spatial Analyst Tools* e consiste na aplicação de três ferramentas principais, de acordo com as etapas apresentadas na Figura 19.

Neste trabalho, estas ferramentas foram aplicadas para simulação dos cenários nos estudos de caso propostos e estão detalhadas a seguir.

Figura 19 – Etapas da aplicação de *Least Cost Path Analysis* no ArcGIS®



Fonte: do autor

1. Superfície de custo

Na primeira etapa, é estabelecida a origem e o destino do traçado na superfície de custo final obtida para cada cenário, ou seja, são especificados no espaço modelado, a região onde estarão localizadas as duas subestações que serão conectadas pela nova linha de transmissão. Ambas as subestações são identificadas como pontos vetoriais e convertidas para um raster específico.

2. Ferramenta *cost distance*

Na segunda etapa, utiliza-se a ferramenta distância de custo, do inglês *cost distance* para determinar um raster de saída em que cada célula recebe o menor custo acumulado para se chegar até a mesma, a partir da célula de origem. O algoritmo da ferramenta usa a representação de grafo, com vértices e arestas, onde o centroide de cada célula é um vértice e está conectado a nós adjacentes por arestas. Trata-se de um processo iterativo que inicia com a célula de origem, o objetivo é determinar o caminho de menor custo acumulado para se deslocar a todas as outras células. Trabalha-se com uma lista de custos acumulados calculados a partir das seguintes expressões:

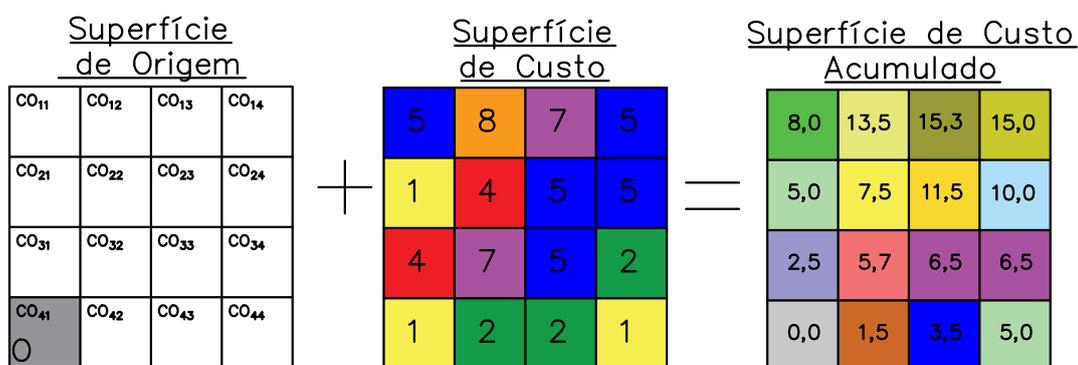
$$CC_{(O,P_i)} = CC_k + \mu \left(\frac{CO_{ij} + CO_{mn}}{2} \right) \leftrightarrow i = m \vee j = n, \quad (18)$$

$$CC_{(O,P_i)} = CC_k + \mu \left(\frac{CO_{ij} + CO_{mn}}{2} \right) \sqrt{2} \leftrightarrow i \neq m \vee j \neq n, \quad (19)$$

onde, $CC_{(O,P_i)}$ é o custo acumulado a partir da célula de origem até a i -ésima célula analisada, CC_k é o custo acumulado a partir da célula de origem até a célula predecessora, anteriormente avaliada. O termo CO_{ij} é o custo da célula representada pela i -ésima linha com a j -ésima coluna na forma matricial, o termo CO_{mn} é o custo da célula representada pela m -ésima linha com a n -ésima coluna na forma matricial e o termo μ é a resolução espacial do raster.

A partir da célula de origem, o algoritmo avalia qual o movimento, considerando o padrão *Queen*, que representa o menor custo associado. Desta forma, são testadas todas as possibilidades de movimento e executa-se sempre a de menor custo, portanto, o movimento ocorre sempre na direção da melhor solução. O custo acumulado a partir da origem até a célula sendo analisada é registrado na própria célula, então, toda a matriz (que representa a superfície de custo) é analisada, de modo que determina-se o menor custo de locomoção de um ponto de origem até todas as outras células da matriz. Os dados de entrada da ferramenta, são um arquivo raster indicando a origem (*O*) e o arquivo raster da superfície de custo. Um exemplo genérico da aplicação desta ferramenta está apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Raster de entrada e saída na aplicação da ferramenta *cost distance*



Fonte: do autor

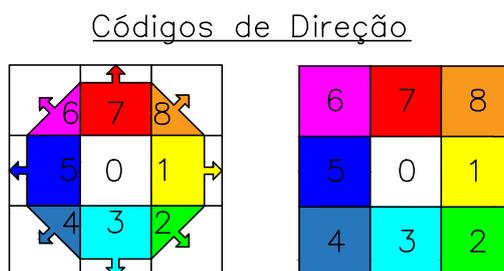
Esta superfície de custo possui resolução espacial ($\mu = 1$) e, o custo acumulado associado à origem possui valor zero ($CC_{k=0} = 0$). Para exemplificação do cálculo do custo acumulado, tomando como ponto de partida a célula de origem (co_{41}) e, como destino a célula (co_{44}), então, o deslocamento de menor custo de (co_{41}) para (co_{44}), passa por (co_{42}) e (co_{43}). Sendo que, o custo acumulado apresentado na célula ($co_{44} = 5$) da superfície de custo acumulado, é obtido aplicando-se a Equação (18). Na qual, ($CC_{k=0} = 0$), no início do processo e, conforme o caminho avança até a célula de destino, recebe o valor do custo acumulado do deslocamento. Destaca-se que esta é uma exemplificação da forma como o custo acumulado foi calculado no exemplo genérico proposto da Figura 20. No entanto, o método completo, testa e armazena os caminhos candidatos e o menor custo acumulado é atualizado ao longo do processo.

Nota-se, no entanto, que este raster de saída representado pela superfície de custo acumulado não fornece a informação do percurso percorrido até cada uma das células, mas apenas o custo acumulativo de cada célula para retornar ao local de origem, obtido através das Equações (18) e (19).

3. Ferramenta *cost back link*

Na terceira etapa, aplica-se a ferramenta de vínculo anterior de custo, do inglês *cost back link*, que retorna como saída, um raster que identifica a rota a ser tomada de qualquer célula, ao longo do caminho de menor custo de volta à origem. Para calcular o raster de vínculo regressivo atribui-se um valor numérico a cada célula de saída, de acordo com a direção que representa o menor custo, conforme apresentado na Figura 21.

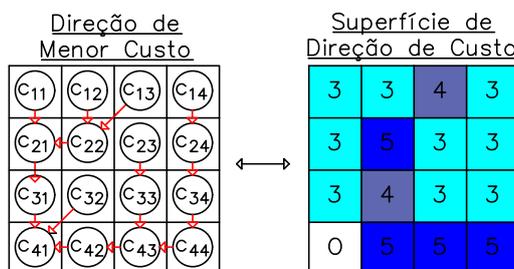
Figura 21 – Codificação adotada para indicação de direção



Fonte: do autor

O valor zero é utilizado para representar a célula de origem, os demais valores vão de 1 a 8, de acordo com a direção no sentido horário. Desta forma os dados de entrada para esta ferramenta são o arquivo raster de origem e o arquivo raster da superfície de custos acumulada, obtido na segunda etapa. Então, o algoritmo da ferramenta determina, a partir da célula de origem e dos menores custos acumulados, quais são as direções tomadas de cada célula para a origem, que resultam nestes menores custos. Na Figura 22, está apresentado o raster de saída que representa o vínculo anterior de custo para a superfície de custos genérica apresentada na Figura 20.

Figura 22 – Raster de direção de custo do exemplo genérico



Fonte: do autor

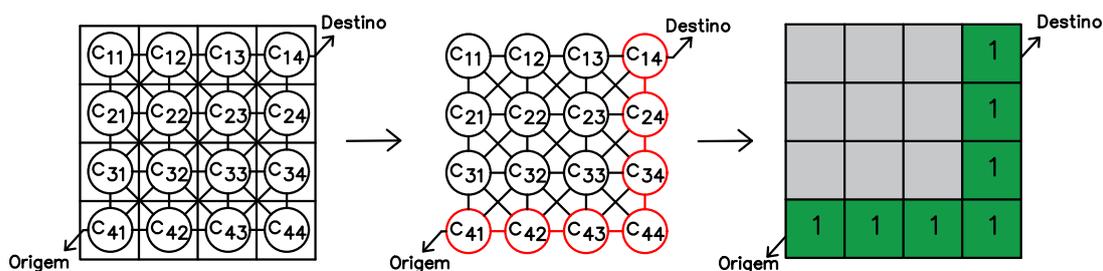
É possível observar que cada célula recebe o valor numérico do código que representa a direção de menor custo para retornar a célula de origem, de acordo com a

codificação apresentada na Figura 21.

4. Ferramenta *cost path*

A partir dos dois arquivos de saída obtidos com a Ferramenta *cost distance* e *cost back link* é possível identificar os caminhos de menor custo a partir da origem, para qualquer célula da superfície de custo. No entanto, deseja-se determinar apenas o caminho de menor custo que conecta os dois pontos de interesse pré-estabelecidos (origem e destino) que, neste caso, representam as duas subestações que serão conectadas pela linha de transmissão. Portanto, a quarta etapa do processo consiste em aplicar a ferramenta *cost path* que utiliza como entrada os dois rasters obtidos com as ferramentas anteriores, assim como a informação de destino e origem. A Figura 23, apresenta um exemplo genérico de caminho de menor custo.

Figura 23 – Caminho de menor custo para exemplo genérico



Fonte: do autor

Para este exemplo, supondo a célula c_{41} como origem e c_{14} como destino, o caminho de menor custo é representado pelo arquivo raster com células em verde. A partir deste arquivo é possível determinar a diretriz da linha de transmissão inserida nas células que formam o caminho de menor custo.

O fato do ArcGIS dividir o processo em etapas e diferentes ferramentas, é uma característica intrínseca dos softwares SIG, que buscam apresentar funções de maneira desagregada possibilitando a variação de análises e simulações de maneira mais acessível.

3.4.2 Algoritmo de Dijkstra implementado

Como mencionado anteriormente, optou-se por implementar o algoritmo de Dijkstra no software Matlab®, com o objetivo de comparar, para quatro experimentos genéricos, os resultados das simulações utilizando o código implementado e as ferramentas LCPA do ArcGIS®, descritas na última seção. Optou-se pelo algoritmo de Dijkstra, pois o mesmo é o ponto de partida para muitos dos algoritmos especializados na solução de problemas de caminhos de menor custo. Neste, o problema é estruturado através da rotulação de vértices para encontrar os caminhos que representam menor custo, de uma origem para todos os demais vértices de grafos com custos positivos nas arestas.

A superfície de custos formada por um arquivo raster de estrutura matricial deve ser convertida em uma estrutura de redes formada por um grafo (G) com $G = (N, M)$ onde N representa a quantidade de vértices e M representa a quantidade de arestas.

Pelo fato da abordagem utilizar um arquivo raster com estrutura matricial para modelagem da superfície de custos, é necessário realizar um procedimento prévio à aplicação do algoritmo. Inicialmente, determina-se um identificador (id) para cada célula presente na superfície de custos, transformando-as em vértices com “rótulos”.

Então, é necessário determinar as adjacências que cada célula possui, de modo a obter as arestas que cada vértice possui. Para isso, trabalha-se com dois vetores, s e t , ambos possuem o mesmo tamanho, que corresponde ao número de conexões que o grafo possui, lembrando que a abordagem considera fluxo bidirecional em cada aresta, conseqüentemente, existem dois caminhos possíveis em uma mesma aresta. A i -ésima posição do vetor s armazena o id de um determinado vértice do grafo, e esta mesma posição no vetor t , indica o vértice que o mesmo está conectado. Em ambos os vetores s e t , as suas posições correspondentes, indicam as conexões existentes no grafo. Deste modo, é necessário varrer a superfície de custos, com o objetivo de construir os dois vetores que representam as adjacências dos vértices, utilizando o padrão *Queen* de adjacência/conexão. Neste contexto, o vetor C armazena o custo das arestas (c_{ij}), calculado de acordo com as Equações (4) e (5). Então, a partir deste processo prévio, em que se obtém os vértices, arestas e custos de cada uma das mesmas, é possível aplicar o algoritmo de Dijkstra, sintetizado no Quadro do Algoritmo 1.

Uma das características deste algoritmo é utilizar uma lista de vértices fechados (F) e uma lista de vértices abertos (A). A sistemática consiste em passar um vértice para a lista (F) quando o caminho de custo mínimo da origem até aquele vértice for determinado, caso contrário o vértice permanece na lista de vértices abertos (A). O algoritmo mantém um vetor ct , cujo i -ésimo elemento guarda o custo acumulado calculado entre o vértice de origem (vértice 1) e ele próprio. O i -ésimo elemento do vetor rot armazena o vértice predecessor ao vértice i , no caminho entre a origem e ele próprio.

No início do algoritmo, se atribui o valor de zero para distância do vértice 1 a ele próprio ($ct[1] = 0$), atribui-se infinito para a primeira posição de rot , ($rot[1] = inf$) e zero para os demais valores do vetor. A lista de nós abertos recebe o vetor N que contém todos os ids dos vértices do grafo, a lista de nós fechados (F), inicialmente, é vazia.

O algoritmo deve iterar até que todos os vértices do grafo tenham sido incluídos na lista (F). Desta forma, em cada iteração o algoritmo escolhe e remove um vértice da lista (A). Iniciando pelo vértice 1 (origem), o próximo vértice r avaliado é aquele que representa o menor custo acumulado de locomoção, ou seja, o menor valor $ct[r]$. Neste caso, este vértice é incluído na lista (F) e todos os seus vizinhos que não se encontram na lista (F) são examinados. Tais vértices formam o conjunto (V), representando os vértices examinados na iteração atual.

Algoritmo 1: Algoritmo de Dijkstra

Entrada: $G = (N, M)$, $C = [c_{ij}]$

- 1 $ct[1] \leftarrow 0$
- 2 $rot[1] \leftarrow \infty$
- 3 **para** $i = 2$ até n **faça**
- 4 $ct[i] \leftarrow \infty$
- 5 $rot[i] \leftarrow 0$
- 6 **fim**
- 7 $A \leftarrow \{N\}$
- 8 $F \leftarrow \emptyset$
- 9 **enquanto** $F \neq N$ **faça**
- 10 $r \leftarrow j \in A$, tal que $ct[j]$ é mínimo dentre os elementos de A
- 11 $F \leftarrow F \uplus \{r\}$
- 12 $A \leftarrow A \setminus \{r\}$
- 13 $V \leftarrow V \setminus F$
- 14 **para** $i \in V$ **faça**
- 15 $p \leftarrow \min \{ct[i], (ct[r] + c_{ri})\}$
- 16 **se** $p < ct[i]$ **então**
- 17 $ct[i] \leftarrow p$
- 18 $rot[i] \leftarrow r$;
- 19 **senão**
- 20 **fim**
- 21 **fim**
- 22 **fim**

23 Fonte: Adaptado de (GOLDBARG; GOLDBARG, 2012)

Nota-se, que o vértice a ser examinado, em cada iteração, é sempre aquele que acumula o menor valor relativo à distância entre ele e o vértice origem. Esta é uma das principais características do algoritmo e o motivo por ser classificado como algoritmo “guloso”, pois se desloca sempre em direção da melhor solução.

Para cada vértice i de (V) , verifica-se se a distância da origem até ele próprio é maior que a distância da origem até r mais o valor da aresta c_{ri} . Em caso positivo, o caminho da origem até o vértice i passando pelo vértice r é menor do que o caminho anteriormente encontrado entre a origem e i . Neste caso, o valor $ct[i]$ é atualizado com $ct[r] + c_{ri}$ e $rot[i]$ é atualizado com r , indicando que o vértice anterior a i no caminho entre a origem e i é o vértice r .

O algoritmo pode ser utilizado para encontrar o caminho mais curto entre todos os vértices do grafo, desde que seja executado uma vez para cada vértice como origem. Este

algoritmo foi implementado no software Matlab[®] e validado através de quatro superfícies de custos genéricas, confrontando os resultados obtidos com as ferramentas do ArcGIS[®] descritas na Seção 3.4.2. Os resultados obtidos estão apresentados no próximo capítulo. Destaca-se que no Apêndice B, estão apresentadas as etapas de um caso genérico de solução de um problema utilizando o algoritmo de Dijkstra.

4 RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO E EXPERIMENTOS PROPOSTOS

Neste capítulo, estão apresentados e discutidos os resultados encontrados a partir das simulações utilizando a implementação do algoritmo de Dijkstra, assim como os resultados obtidos para os três estudos de caso propostos simulados no ArcGIS®.

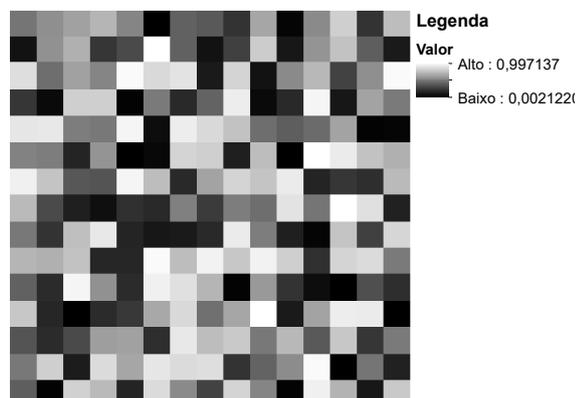
4.1 Verificação do algoritmo de caminho de custo mínimo

Com o objetivo de se avaliar o algoritmo de Dijkstra e as ferramentas LCPA do ArcGIS® (detalhadas na Seção 3.4.1), implementou-se um código computacional no software Matlab® utilizando o algoritmo apresentado na seção 3.4.2. Os resultados obtidos através da simulação do código, foram confrontados através da simulação das mesmas superfícies de custos, utilizando as ferramentas LCPA. Nas próximas subseções estão apresentados os resultados obtidos para os quatro experimentos propostos.

4.1.1 Experimento 1

Neste experimento adotou-se uma superfície de custos genérica de dimensão 15 x 15, apresentada na Figura 24.

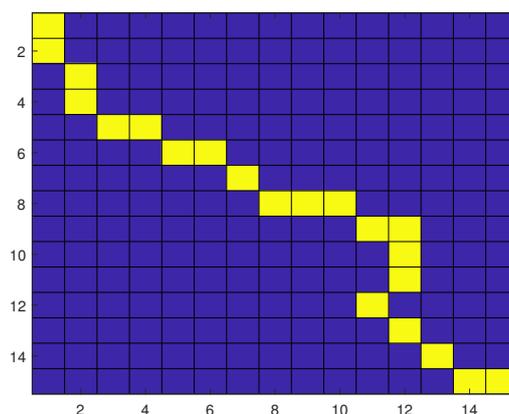
Figura 24 – Superfície de custo genérica utilizada no experimento 1



Fonte: do autor

Esta superfície possui 225 células com resolução espacial de $\mu = 1$ m, foi obtida utilizando a função *rand* do Matlab® e exportada como um arquivo raster com extensão *.tif*, através das ferramentas do *Mapping Toolbox* do software. Optou-se por determinar o caminho de menor custo que conecta o vértice 1 ($S_{1,1}$), no extremo esquerdo superior da superfície, com o vértice 225 ($S_{15,15}$) no extremo direito inferior da superfície de custo. O caminho de menor custo, obtido utilizando o algoritmo implementado, está apresentado em amarelo na Figura 25.

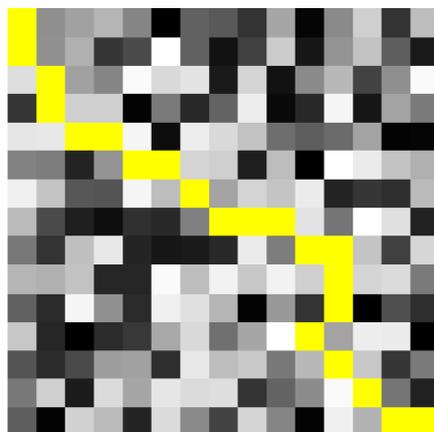
Figura 25 – Caminho de menor custo obtido no experimento 1 (código implementado)



Fonte: do autor

Para a mesma superfície de custos apresentada na Figura 24, obteve-se o caminho de custo mínimo utilizando as ferramentas LCPA do ArcGIS®, que está apresentado em amarelo na Figura 26.

Figura 26 – Caminho de menor custo obtido no experimento 1 (ferramentas LCPA)



Fonte: do autor

Nota-se, que em ambas as simulações, foram obtidas a mesma rota de vértices do caminho de menor custo. Conseqüentemente, tomando como referência o centróide de cada

célula e traçando uma diretriz que conecta as mesmas, também obteve-se o mesmo comprimento para ambos os caminhos. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9.

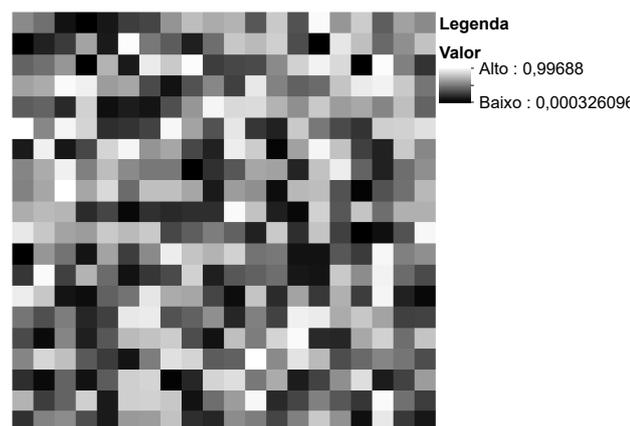
Parâmetro	Resultado
Caminho de Menor Custo (Vértices)	1 – 16 – 32 – 47 – 63 – 64 – 80 – 81 – 97 – 113 – 114 – 115 – 131 – 132 – 147 – 162 – 176 – 192 – 208 – 224 – 225
Comprimento (m)	24, 1421
Custo Final	5, 5672 (Código) 5, 4292 (Ferramentas LCPA)

A pequena diferença no custo final, pode ser atribuída a arredondamentos numéricos em ambas as simulações, tendo em vista que a rota obtida para ambas as simulações foi a mesma. Através deste experimento foi possível verificar desempenho satisfatório da implementação computacional do Algoritmo de Dijkstra e das ferramentas de LCPA.

4.1.2 Experimento 2

Neste experimento, adotou-se uma superfície de custos genérica de dimensão 20 x 20, apresentada na Figura 27.

Figura 27 – Superfície de custo genérica utilizada no experimento 2

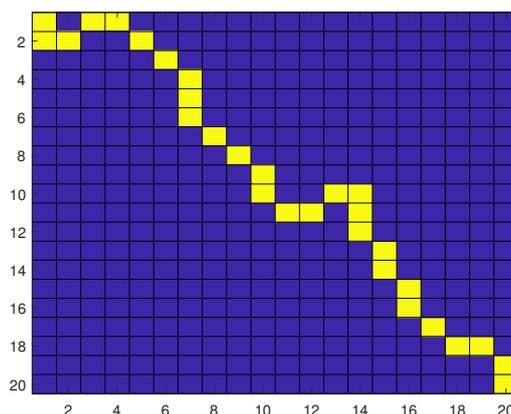


Fonte: do autor

Esta superfície possui 400 vértices, com resolução espacial $\mu = 1$ m, foi obtida utilizando a função *rand* do Matlab® e exportada como um arquivo raster com extensão *tif*, através das ferramentas do *Mapping Toolbox* do software. Neste experimento, optou-se por aumentar a dimensão da superfície de custo, a fim de avaliar se o desempenho do código implementado se mantém satisfatório. Como realizado anteriormente, optou-se por

determinar o caminho de menor custo que conecta o vértice 1 ($S_{1,1}$), no extremo esquerdo superior da superfície, com o vértice 400 ($S_{20,20}$) no extremo direito inferior da superfície de custo. O caminho de menor custo obtido utilizando o algoritmo implementado, está apresentado em amarelo na Figura 28.

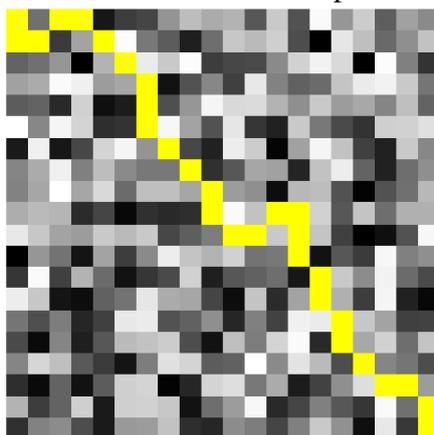
Figura 28 – Caminho de menor custo obtido no experimento 2 (código implementado)



Fonte: do autor

O caminho de menor custo obtido através da aplicação das ferramentas de LCPA presentes no ArcGIS® está apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Caminho de menor custo obtido no experimento 2 (ferramentas LCPA)



Fonte: do autor

Nota-se que, para este experimento, em ambas as simulações também foram obtidas as mesmas rotas de vértices do caminho de menor custo. Além disso, tomando como referência o centróide de cada célula e traçando uma diretriz que conecta as mesmas, também obteve-se o mesmo comprimento para ambos os caminhos. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação de resultados obtidos para experimento 2

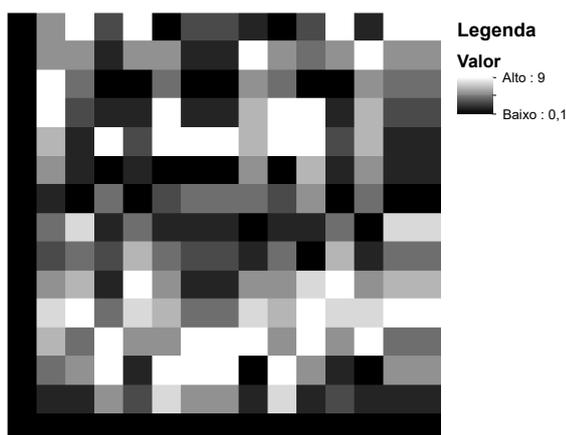
Parâmetro	Resultado
Caminho de Menor Custo (Vértices)	1 – 21 – 22 – 3 – 4 – 25 – 46 – 67 – 87 – 107 – 128 – 149 – 170 – 190 – 211 – 212 – 193 – 194 – 214 – 234 – 255 – 275 – 296 – 316 – 337 – 358 – 359 – 380 – 400
Comprimento (m)	33,79
Custo Final	6,86012 (Código) 6,716506 (Ferramentas LCPA)

Pelo fato da superfície de custo ter aumentado de tamanho, nota-se que o comprimento e número de vértices do caminho mínimo também cresceram em relação ao experimento 1. Neste caso, também há uma pequena diferença no custo final, que pode ser atribuída a arredondamentos numéricos em ambas as simulações, tendo em vista que a rota obtida para ambas as simulações foi a mesma.

4.1.3 Experimento 3

Neste experimento, optou-se por elaborar uma superfície de custos em que um caminho mínimo esteja bem evidente, atribuindo valores de custo elevados para um determinado número de células e valores reduzidos para um caminho na margem da superfície de custo, como pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Superfície de custo genérica utilizada no experimento 3

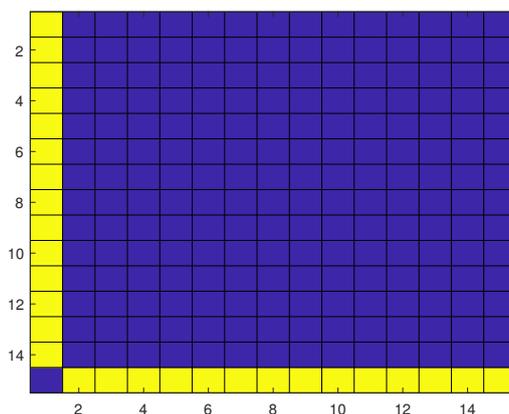


Fonte: do autor

A dimensão adotada da superfície foi de 15 x 15, totalizando 225 vértices com resolução espacial $\mu = 1$ m. Nota-se um caminho de menor custo que conecta o vértice 1 ($S_{1,1}$), no extremo esquerdo superior da superfície, com o vértice 225 ($S_{15,15}$) no extremo direito inferior da superfície de custo, ambos os vértices estabelecidos para serem conectados na simulação. Para as células de custo elevado da superfície foram atribuídos aleatoriamente

valores entre 1 e 9; para as células de custo reduzido utilizou-se o valor de 0,1. A superfície de custos também foi exportada como um arquivo raster com extensão *.tif*, através das ferramentas do *Mapping Toolbox* do Matlab®. O caminho obtido através da simulação com código computacional implementado, está apresentado na Figura 31.

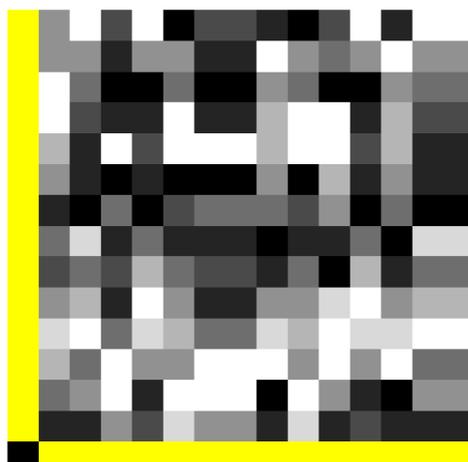
Figura 31 – Caminho de menor custo obtido no experimento 3 (código implementado)



Fonte: do autor

O caminho de menor custo obtido através da aplicação das ferramentas de LCPA presentes no ArcGIS® está apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Caminho de menor custo obtido no experimento 3 (ferramentas LCPA)



Fonte: do autor

Nota-se que para este experimento, em ambas as simulações, também foram obtidas as mesmas rotas de vértices do caminho de menor custo, e de fato em ambas as simulações as rotas encontradas se deram através do caminho preferencial pré-estabelecido propositalmente. Tomando como referência o centróide de cada célula e traçando uma diretriz que conecta as mesmas, também obteve-se o mesmo comprimento para ambos os caminhos. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação de resultados obtidos para experimento 3

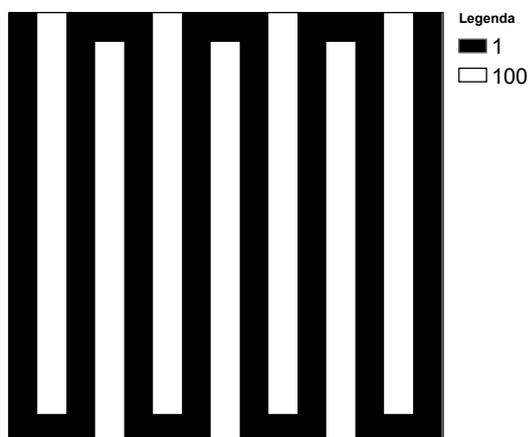
Parâmetro	Resultado
Caminho de Menor Custo (Vértices)	1 – 16 – 31 – 46 – 61 – 76 – 91 – 106 – 121 – 136 – 151 – 166 – 181 – 196 – 212 – 213 – 214 – 215 – 216 – 217 – 218 – 219 220 – 221 – 222 – 223 – 224 – 225
Comprimento (m)	27,41
Custo Final	2,7412 (Código) 2,7414 (Ferramentas LCPA)

Para este experimento, a diferença entre o custo final obtido com o código implementado e as ferramentas LCPA ficou inferior se comparada com os experimentos 1 e 2, pelo fato das células que formam o caminho mínimo possuírem valor único de 0,1, reduzindo o impacto dos arredondamentos com valores aleatórios das células.

4.1.4 Experimento 4

Neste último experimento optou-se por criar uma superfície de custos, simulando um labirinto, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Superfície de custos genérica experimento 4

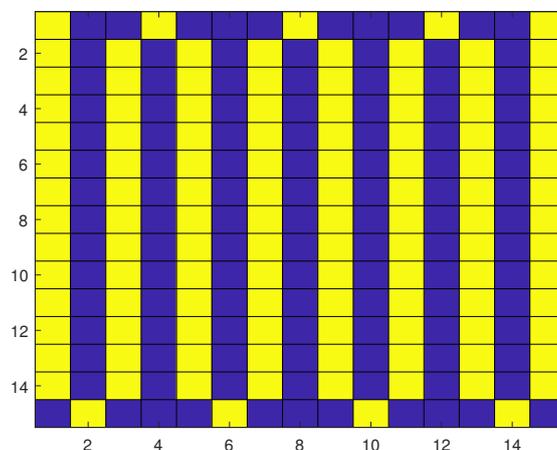


Fonte: do autor

As células em branco simulam os obstáculos e possuem valor 100, já as células pretas, com valor unitário, formam o caminho preferencial, utilizou-se resolução espacial $\mu = 1$ m, com superfície de dimensão 15 x 15. Esta superfície possui 225 vértices, foi construída manualmente e exportada como um arquivo raster com extensão *.tif*, através das ferramentas do *Mapping Toolbox* do Matlab®. Neste experimento, optou-se por determinar o caminho de menor custo que conecta o vértice 1 ($S_{1,1}$), no extremo esquerdo superior da superfície, com o vértice 15 ($S_{1,15}$) no extremo direito superior da superfície de custo. O caminho de menor custo obtido utilizando o algoritmo implementado, está

apresentado em amarelo na Figura 34.

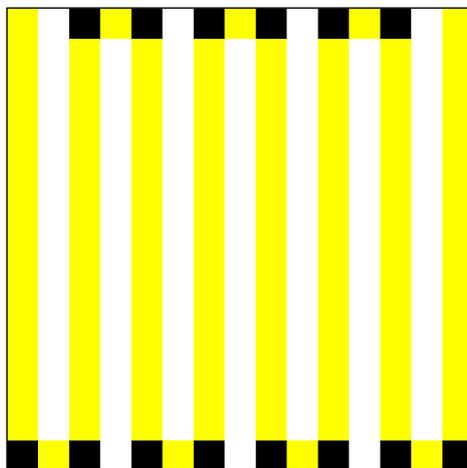
Figura 34 – Caminho de menor custo obtido no experimento 4 (código implementado)



Fonte: do autor

O caminho de menor custo obtido através da aplicação das ferramentas de LCPA presentes no ArcGIS® está apresentado em amarelo na Figura 35.

Figura 35 – Caminho de menor custo obtido no experimento 4 (ferramentas LCPA)



Fonte: do autor

Para este experimento, em ambas as simulações, também foram obtidas as mesmas rotas de vértices do caminho de menor custo. Ademais, nota-se que a solução de caminho mínimo coincide com o caminho pré-estabelecido na superfície de custos e, portanto, para este experimento, também obteve-se desempenho satisfatório em ambas as ferramentas. Tomando como referência o centróide de cada célula e traçando uma diretriz que conecta as mesmas, também obteve-se o mesmo comprimento para ambos os caminhos. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Comparação de resultados obtidos para experimento 4

Parâmetro	Resultado
	1 – 16 – 31 – 46 – 61 – 76 – 91 – 106 – 121 – 136 – 151 166 – 181 – 196 – 212 – 198 – 183 – 168 – 153 – –138 – 123 – 108 – 93 – 78 – 63 – 48 – 33 – 18 – 4 – 20 – 35 – 50 – 65 – 80 – 95 – 110 – 125 – 140 – 155 – 170 185 – 200 – 216 – 202 – 187 – 172
Caminho de Menor Custo (Vértices)	157 – 142 – 127 – 112 – 97 – 82 – 67 – 52 –37 – 22 – 8 – 24 – 39 – 54 – 69 – 84 –99 – 114 – 129 – 144 – 159 – 174 – 189 –204 – 220 – 206 – 191 – 176 – 161 – 146 – 131 – 116 –101 – 86 – 71 – 56 – 41 – 26 – 12 – 28 – 43 – 58 –73 – 88 – 103 – 118 – 133 – 148 – 163 – 178 – 193 208 – 224 – 210 – 195 – 180 – 165 150 – 135 – 120 – 105 – 90 – 75 – 60 – 45 – 30 – 15
Comprimento (m)	117,7990
Custo Final	117,7990 (Código) 117,7990 (Ferramentas LCPA)

Pelo fato das células que formam o caminho mínimo possuírem valor unitário, o custo final coincidiu com o comprimento do caminho, neste caso, os erros com arredondamentos foram eliminados.

4.1.5 Discussão dos resultados dos experimentos

A realização dos experimentos teve como objetivo desenvolver o conhecimento das particularidades do algoritmo de Dijkstra e das ferramentas LCPA do ArcGIS®. Destaca-se que, foi realizada uma implementação simplificada do algoritmo, com finalidade de avaliação de caminhos de menor custo em superfícies de custo genéricas com dimensão reduzida. Desta forma, o código implementado necessitaria de aprimoramentos para ser aplicado na determinação dos traçados de linhas de transmissão. Como por exemplo, automatização do processo de agregação dos arquivos raster para formação da superfície de custo final e implementação de técnica de otimização robusta para redução do tempo de simulação. Sobre este último, a Tabela 13 apresenta a comparação dos tempos obtidos em cada simulação dos experimentos para os dois métodos adotados.

Tabela 13 – Tempos de simulação para os experimentos

Experimento	Ferramenta	
	ArcGIS®	Do autor
1 (15 x 15)	2,74 s	191,45 s
2 (20 x 20)	2,85 s	5647,99 s
3 (15 x 15)	2,95 s	437,33 s
4 (15 x 15)	4,44 s	325,83 s

Nota-se que, conforme a dimensão da superfície de custo aumenta, o tempo de simulação também cresce, desta forma, para superfícies de custo que representam uma região de dimensão elevada, tornaria-se inviável a utilização da implementação realizada. Desta forma, optou-se por utilizar as ferramentas LCPA do ArcGIS® para simulação dos estudos de caso propostos, pois apresentam funções otimizadas para este tipo de análise de geoprocessamento.

4.2 Simulações dos estudos de caso

Nesta seção, estão apresentados os resultados obtidos através das simulações dos cenários propostos para cada um dos estudos de caso, adotando a metodologia apresentada no Capítulo 3. Destaca-se que todas as simulações foram realizadas utilizando as ferramentas de LCPA do ArcGIS® (detalhadas na Seção 3.4.1).

4.2.1 Estudo de Caso 1

Neste estudo de caso, foram simulados os quatro cenários propostos para a LT 230 kV Osório 3 - Gravataí 3. A Tabela 14 apresenta os comprimentos e o custo total dos traçados obtidos para cada um dos cenários. Além disso, está apresentado o acréscimo percentual de comprimento de cada cenário, em relação ao projeto original.

Tabela 14 – Comprimento e custo final para cenários do Estudo de Caso 1

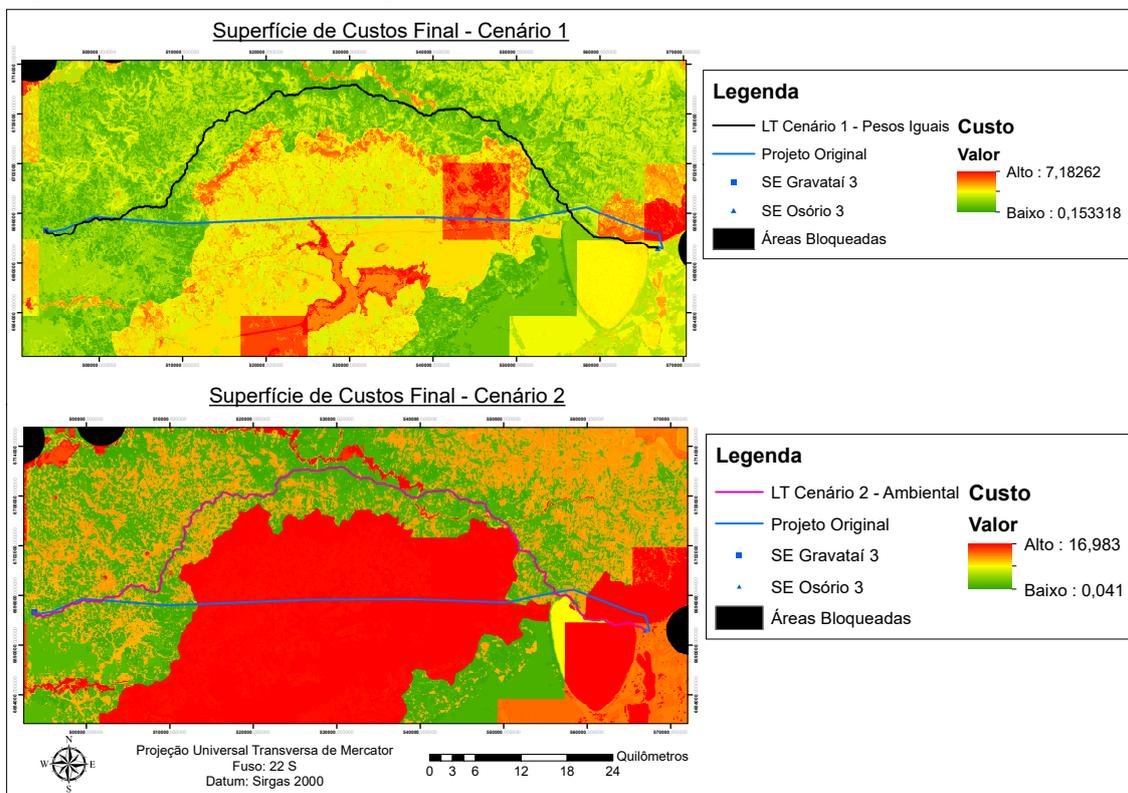
Cenário	Comprimento (km)	Acréscimo Comprimento (%)	Custo Total
1	98,25	27,38%	64958,3
2	103,03	33,58%	41368,0
3	89,64	16,22%	45100,4
4	81,47	5,63%	64629,9
Projeto Original	77,13	-	-

É possível observar que nenhum cenário simulado resultou em um comprimento de linha menor que o original, sendo o mais próximo, o Cenário 4, que atribui menor peso para critérios sociais e ambientais, e maior peso para os critérios técnico-econômicos. Por se tratar de um estudo de caso de linha curta, nota-se que os desvios representaram acréscimo elevados em relação ao comprimento da linha no projeto original, principalmente para o cenário em que critérios ambientais possuem maior peso. Este resultado evidencia um aspecto que normalmente é identificado neste tipo de projeto, traçados que buscam reduzir impactos socioambientais, em geral, possuem maior comprimento. Como consequência, estes critérios acabam sendo tratados como externalidades no processo de tomada de decisão.

As Figuras 36 e 37, apresentam os traçados obtidos para cada cenário simulado, assim como as superfícies de custo finais obtidas para os mesmos. Para todos os cenários simulados, a presença de uma unidade de conservação com área significativa entre as

duas subestações, influenciou consideravelmente os resultados. Esta UC trata-se da APA Banhado Grande que pode ser visualizada com mais detalhes na parte central do mapa superior da Figura 38.

Figura 36 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 1 e 2 do Estudo de Caso 1

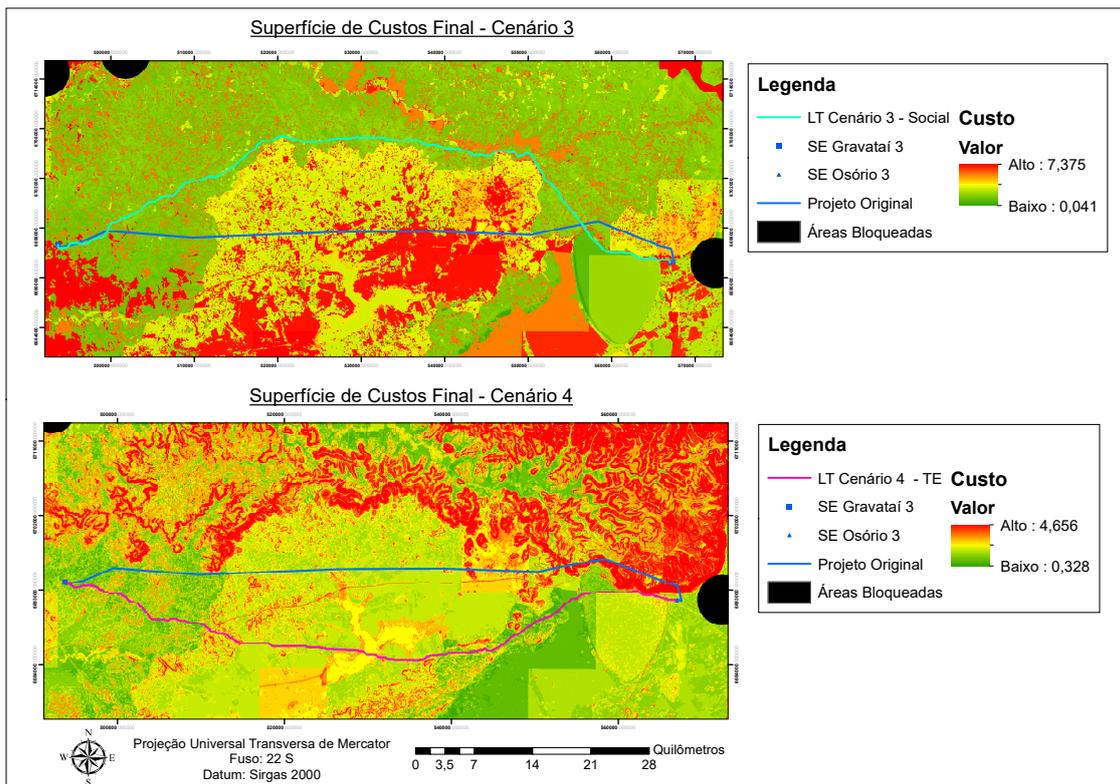


Fonte: do autor

Verifica-se para os resultados dos Cenários 1 e 2, que a pontuação elevada da APA Banhado Grande criou grandes áreas de baixa atratividade nas superfícies de custo, ocasionando em desvios da mesma. Para o Cenário 3, mesmo com as pontuações dos critérios ambientais com peso reduzido, ainda houve um desvio significativo. Neste caso, as regiões com presença de áreas com agricultura na região central da superfície de custo possuíram influência, uma vez que possuem peso mais elevado neste cenário. Estas áreas podem ser visualizadas no mapa inferior da Figura 39. É possível verificar que, neste cenário, apesar do desvio da APA Banhado Grande, foi obtida uma solução com menor comprimento em relação aos Cenários 1 e 2, pois as formações florestais com menor peso, foram cruzadas mais ativamente, conforme pode ser visualizado no mapa inferior da Figura 38.

Para o Cenário 4, pelo fato dos critérios técnico-econômicos possuírem maior peso, nota-se que a solução obtida é distinta dos demais cenários, uma vez que a declividade do terreno assumiu peso significativo e a região superior da superfície de custo possui regiões com declividade acentuada, como apresentado no mapa central da Figura 40. Nota-se que o relevo na parte inferior da superfície de custos, onde se estabeleceu a solução da simula-

Figura 37 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 3 e 4 do Estudo de Caso 1



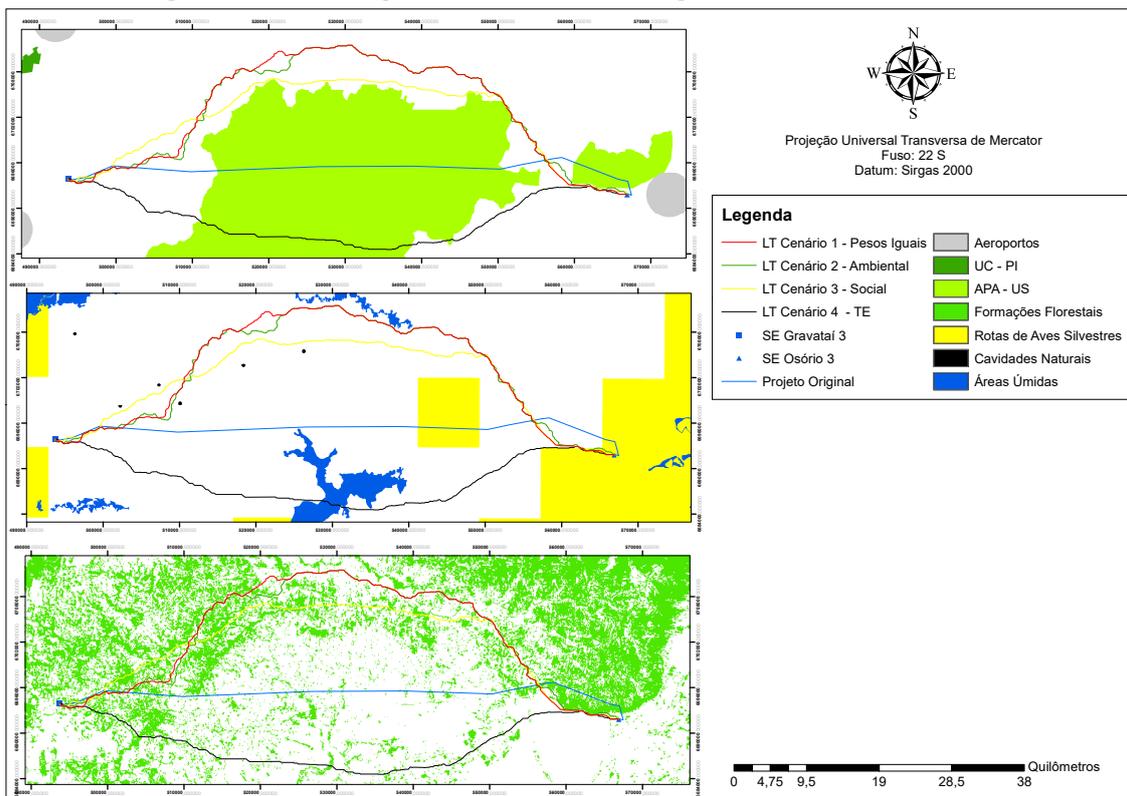
Fonte: do autor

ção do Cenário 4, varia entre plano e ondulado, já na parte superior o relevo possui zonas montanhosas e escarpadas, portanto, evitadas na solução, por possuírem peso elevado. É possível observar no mapa central da Figura 40, que esta solução priorizou regiões com campos e pastagens, pois possuem pontuações baixas e que de fato representam soluções atrativas.

Quanto ao traçado do projeto original, é possível observar que o mesmo cruza tanto a APA Banhado Grande, quanto a APA Morro de Osório, localizada na parte direita do mapa superior da Figura 38. No mapa inferior da Figura 40, é possível verificar que o motivo destas travessias está relacionado com a busca do paralelismo com outras linhas de transmissão. Além disso, este aspecto está relacionado com o fato destas APA's possuírem classificação como de uso sustentável, sendo possível verificar presença de áreas agrícolas, de pastagem, outros empreendimentos lineares e até áreas urbanas no interior das mesmas, como apresentado nas Figuras 39 e 40. No entanto, destaca-se que este processo causa impactos para a população e meio ambiente, além de causar danos a paisagem cênica, principalmente na região de Morro de Osório.

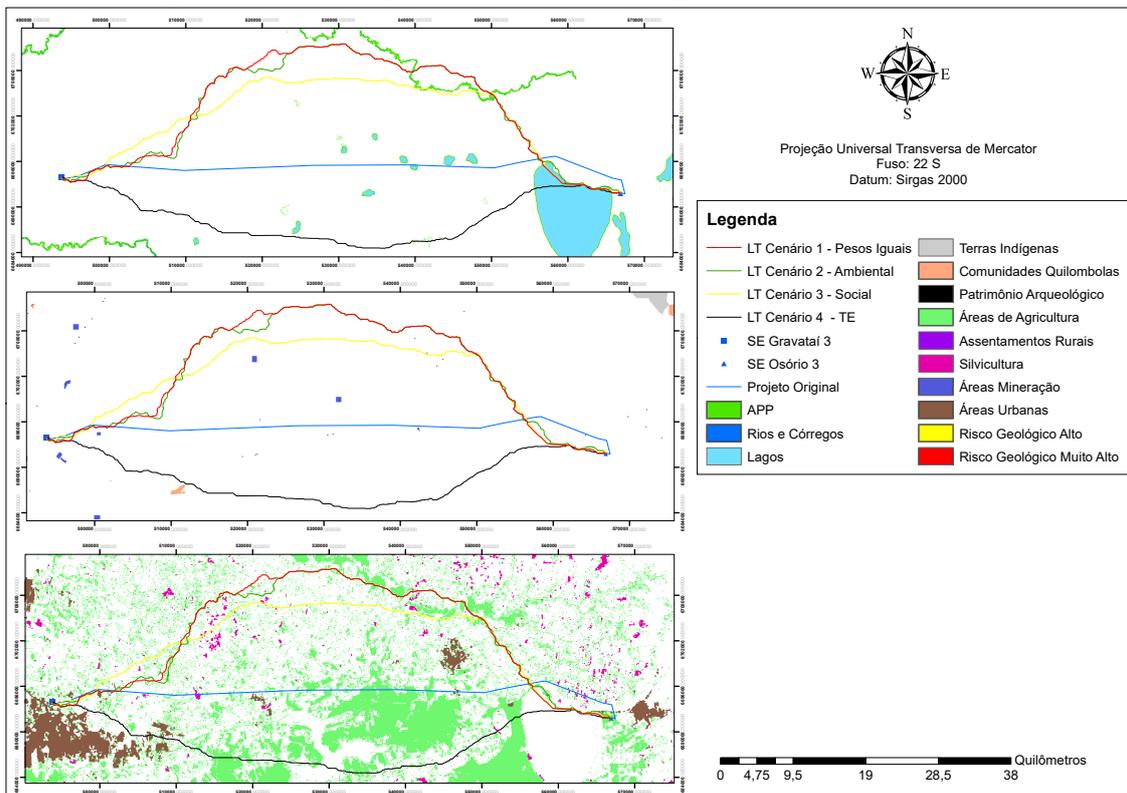
É possível observar no mapa superior da Figura 39, que no início do traçado das soluções de todos os cenários, existem trechos no interior de um corpo d'água, evidenciando que esta zona se mostrou atrativa neste trecho inicial, independentemente, do cenário adotado. Há um aspecto subjetivo neste tipo de avaliação, uma vez que este tipo feição geo-

Figura 38 – Presença de subcritérios na região do Estudo de Caso 1



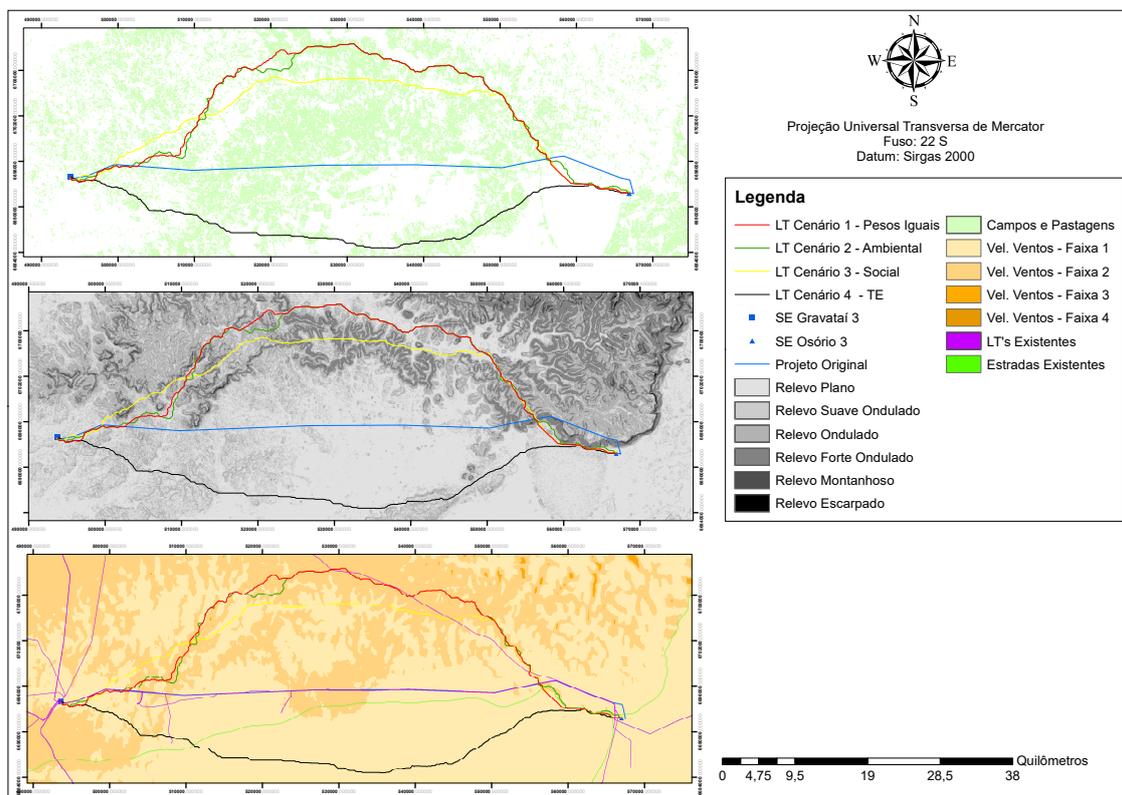
Fonte: do autor

Figura 39 – Presença de subcritérios na região do Estudo de Caso 1



Fonte: do autor

Figura 40 – Presença de subcritérios na região do Estudo de Caso 1



Fonte: do autor

gráfica possui importância ambiental e também há um empecilho técnico-econômico significativo em se construir linhas de transmissão no interior de corpos d'água e provavelmente o trecho inicial dessa solução seria descartado.

Com o objetivo de verificar quantitativamente o efeito da variação dos pesos entre os cenários, optou-se por determinar a quantidade de células de cada um dos subcritérios que foram cruzadas pelos traçados obtidos em cada um dos cenários. Para isso, utilizou-se a função *buffer* do ArcGIS® para determinar um corredor simples para cada diretriz de traçado, adotando-se a largura de 60 m. Os resultados estão apresentados na Tabela 15. As colunas CEN1, CEN2, CEN3 e CEN4 se referem aos Cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente, a coluna PO se refere ao projeto original da linha de transmissão e a coluna TOTAL se refere à quantidade de células que cada subcritério possui na superfície de custo do estudo de caso.

Foi possível verificar que áreas como terras indígenas, comunidades quilombolas, sítios arqueológicos, assentamentos rurais, áreas de mineração, cavidades naturais, risco geológico e algumas faixas de declividade e velocidade média dos ventos, não foram cruzadas em nenhum dos cenários. Além disso, em nenhum cenário as áreas bloqueadas (aeródromos e UC's de proteção integral) foram cruzadas pelos traçados.

Tabela 15 – Quantidade de células cruzadas para cada subcritério do Estudo de Caso 1

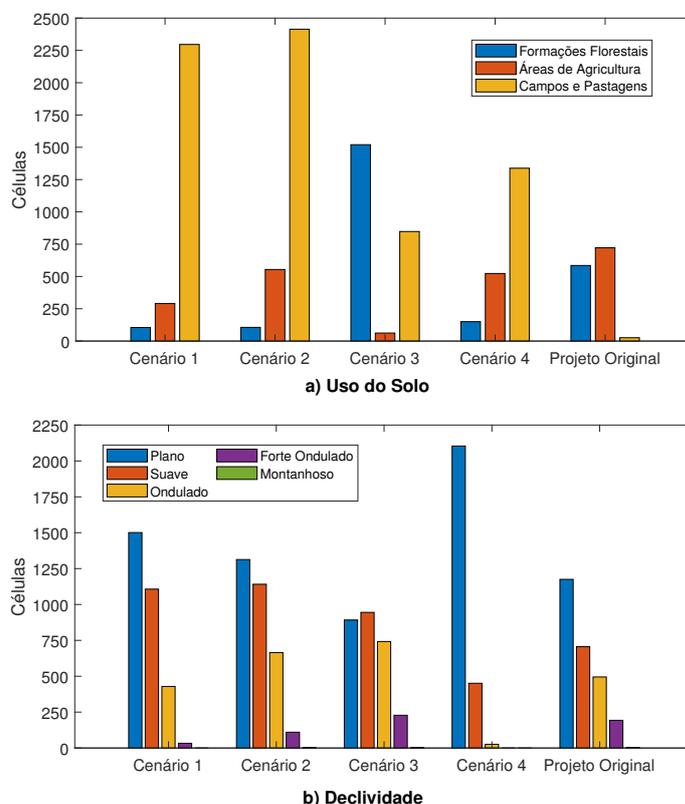
Subcritério	TOTAL	CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	PO
Áreas de Preservação Ambiental	$1,41 \times 10^6$	0	0	0	972	1532
Áreas de Preservação Permanente	$1,22 \times 10^5$	90	108	119	36	18
Rotas de Aves Silvestres	$1,88 \times 10^6$	142	112	151	153	410
Cavidades Naturais	$1,55 \times 10^3$	0	0	0	0	0
Formações Florestais	$1,50 \times 10^6$	105	106	1520	150	585
Áreas Úmidas	$3,38 \times 10^6$	0	0	0	98	0
Rios	$6,25 \times 10^4$	3	1	6	0	0
Lagos	$3,90 \times 10^5$	205	22	216	321	7
Terras Indígenas	$2,45 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Comunidades Quilombolas	$5,45 \times 10^5$	0	0	0	0	0
Sítios Arqueológicos	$8,63 \times 10^2$	0	0	0	0	0
Áreas de Agricultura	$1,29 \times 10^6$	291	554	62	523	722
Assentamentos Rurais	$5,45 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Silvicultura	$8,96 \times 10^4$	6	6	2	7	0
Campos e Pastagens	$1,60 \times 10^6$	2296	2414	848	1338	26
Áreas de Mineração	$2,50 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Áreas Urbanas	$5,65 \times 10^5$	10	10	5	36	21
Linhas de Transmissão	$4,38 \times 10^4$	30	30	39	12	1947
Estradas	$1,86 \times 10^4$	21	74	19	5	3
Risco Geológico - Alto	$8,83 \times 10^3$	0	0	0	0	0
Risco Geológico - Muito Alto	$3,32 \times 10^3$	0	0	0	0	0
Declividade - Plano	$3,17 \times 10^6$	1501	1313	892	2104	1175
Declividade - Suave	$1,28 \times 10^6$	1107	1141	945	451	706
Declividade - Ondulado	$1,02 \times 10^6$	429	665	742	26	495
Declividade - Forte Ondulado	$5,35 \times 10^5$	33	110	228	0	193
Declividade - Montanhoso	$6,39 \times 10^4$	0	2	2	0	4
Declividade - Escarpado	$4,52 \times 10^3$	0	0	0	0	0
Velocidade Média Ventos (Faixa 1)	$4,09 \times 10^6$	0	0	0	0	0
Velocidade Média Ventos (Faixa 2)	$1,94 \times 10^6$	0	0	0	0	0
Velocidade Média Ventos (Faixa 3)	$3,62 \times 10^4$	1859	2091	1146	116	556
Velocidade Média Ventos (Faixa 4)	$1,50 \times 10^1$	1211	1140	1663	2465	2017
Aeródromos	$1,98 \times 10^5$	0	0	0	0	0
UC - Proteção Integral	$7,50 \times 10^3$	0	0	0	0	0

Os subcritérios relacionados ao uso do solo possuem bastante variação quanto às células cruzadas a partir do cenário considerado. Para os Cenários 1, 2 e 4 as soluções de traçados priorizaram áreas com campos e pastagens e agricultura. Para o Cenário 3, em que estes subcritérios possuem maior peso, houve uma redução de travessias nestas áreas, com aumento de travessias em formações florestais que neste cenário, possuem menor peso. Quanto às faixas de declividade, nota-se um comportamento similar para os Cenários 1, 3 e 4, com priorização das áreas de menor declividade e repulsão de áreas com maior declividade. Para o Cenário 4, em que este critério possui maior peso, nota-se que a solução priorizou de forma mais significativa áreas de baixa declividade.

A Figura 41 apresenta o total de células cruzadas que são representadas pelos princi-

pais subcritérios relacionados ao uso do solo e para todas as faixas de declividade.

Figura 41 – Travessias em células de subcritérios relacionados ao uso do solo e declividade para o Estudo de Caso 1



Fonte: do autor

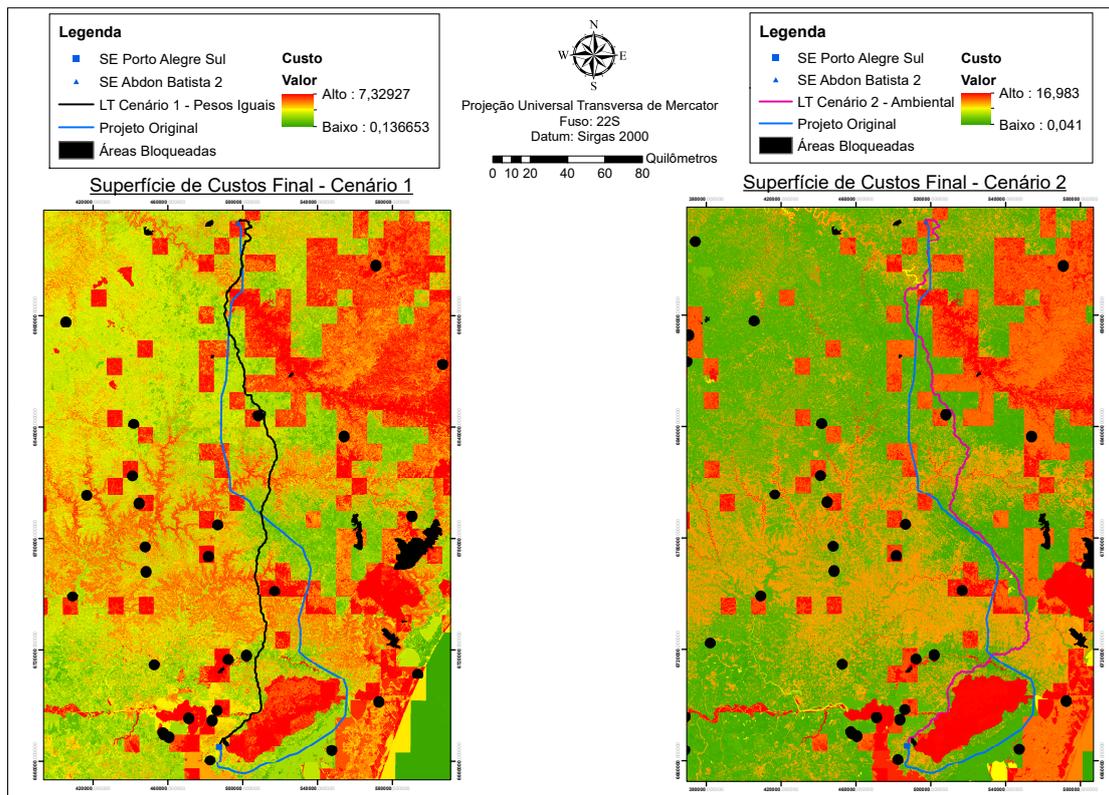
Este tipo de análise pode ser útil para o tomador de decisão, pois em regiões com grande variação dos custos fundiários e que, portanto, determinadas áreas possuem maior custo em detrimento de outras, torna-se possível visualizar alternativas de traçados mais atrativas visando diminuição de custos fundiários e indenizatórios.

Quanto aos critérios ambientais, os traçados dos Cenários 1, 2 e 3 eliminaram travessias de áreas de preservação ambiental e o Cenário 4 reduziu em 36,5% estas travessias. Além disso, em relação ao projeto original, para todos os cenários reduziram-se em média 65% as travessias em áreas com presença e rotas de aves silvestres. Desconsiderando o Cenário 3, houve uma redução média de 79% de travessias em áreas com formações florestais em relação ao projeto original.

4.2.2 Estudo de Caso 2

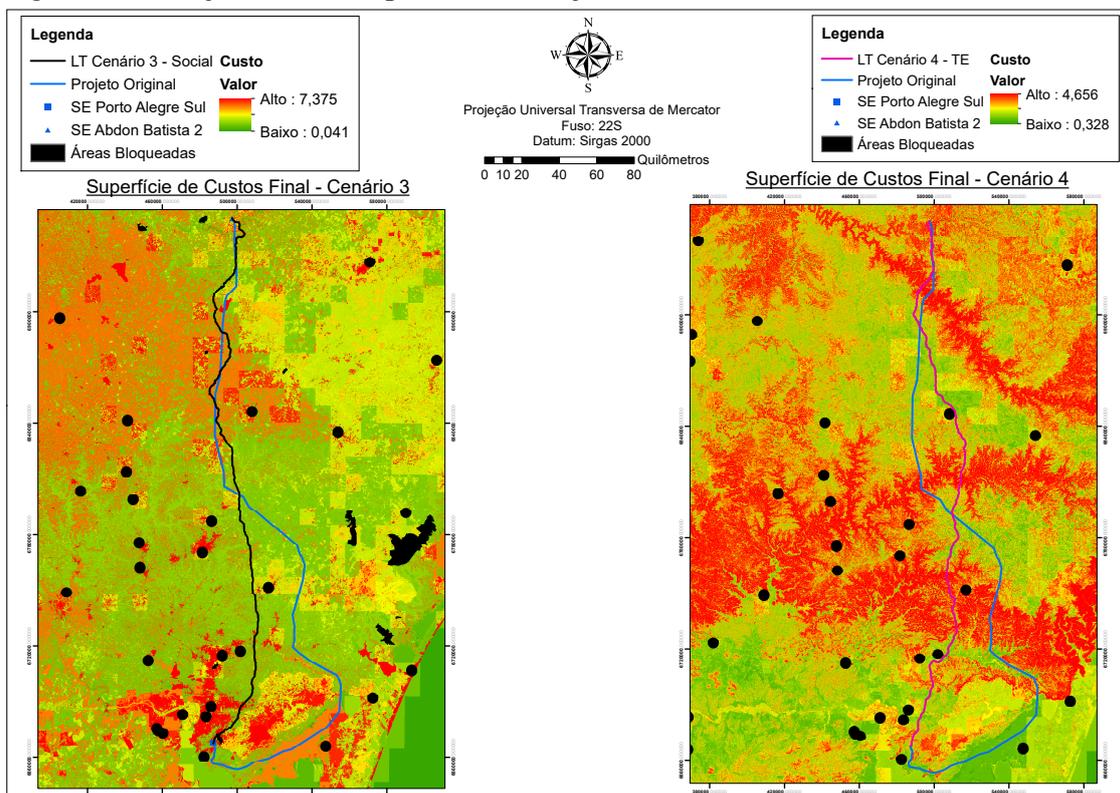
Neste estudo de caso, foram simulados os quatro cenários propostos para a LT 525 kV Porto Alegre Sul - Abdon Batista 2. A Figura 42 apresenta os traçados obtidos para os Cenários 1 e 2 e a Figura 43 apresenta os traçados obtidos para os Cenários 3 e 4. Além disso, ambas as figuras apresentam as superfícies de custo de cada cenário.

Figura 42 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 1 e 2 do Estudo de Caso 2



Fonte: do autor

Figura 43 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 3 e 4 do Estudo de Caso 2



Fonte: do autor

Para o Cenário 1, com pesos iguais para todas as classes de critérios, o resultado obtido busca, de maneira geral, uma diretriz em linha reta que conecta as duas subestações, com desvios pontuais em áreas bloqueadas e com sensibilidade ambiental elevada. Para o Cenário 2, em que a classe de critérios ambientais possui maior peso, nota-se desvios mais acentuados de áreas com presença de aves silvestres e formações florestais, como apresentado na Figura 44.

Para o Cenário 3, em que os critérios sociais possuem maior peso, é possível notar, na Figura 42, que a segunda metade do traçado obtido nesta simulação se assemelha com o traçado do projeto original, fato que se repete para o Cenário 4, em que o peso dos critérios técnico-econômicos é maior, exceto pelo fato que neste, há um trecho em que os traçados (original e simulado) estão espelhados.

A Tabela 16 apresenta os comprimentos e o custo total dos traçados simulados para cada um dos cenários, além disso, está apresentado o acréscimo percentual de comprimento, de cada cenário, em relação ao projeto original.

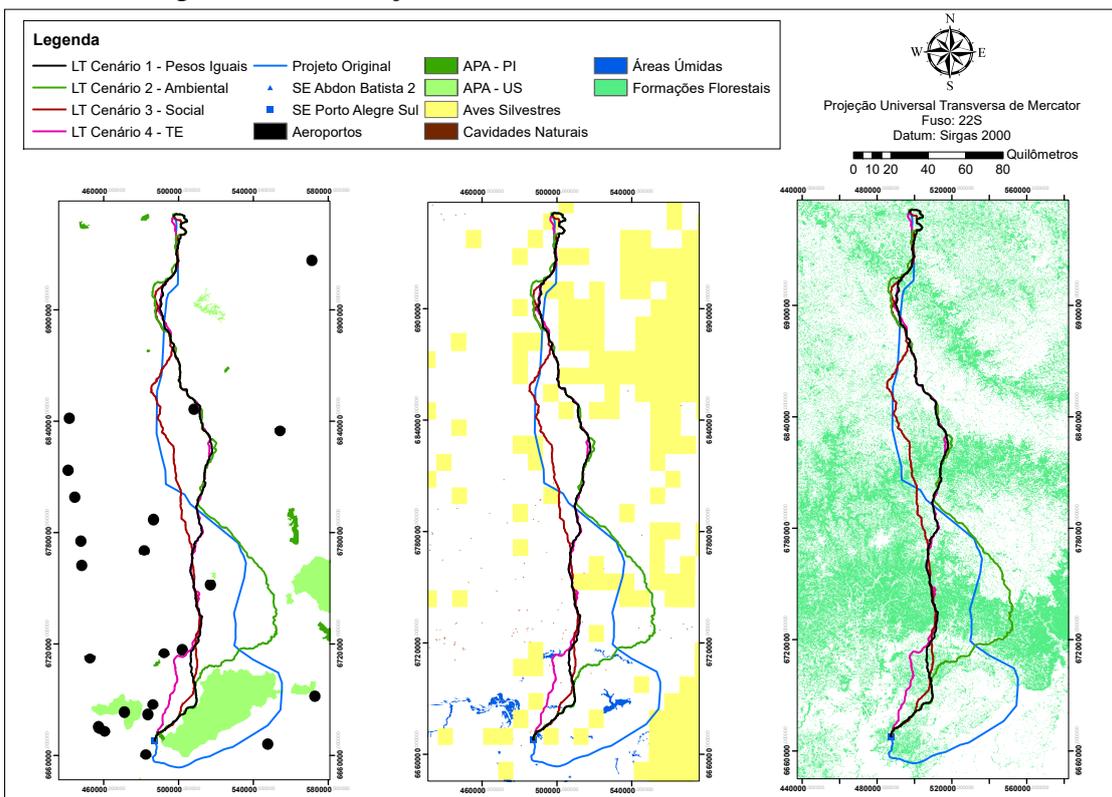
Tabela 16 – Comprimento e custo final dos cenários do Estudo de Caso 2

Cenário	Comprimento (km)	Acréscimo Comprimento (%)	Custo Total
1	360,84	-8,29	232807,7
2	430,28	9,36	93138,6
3	343,34	-12,74	164554,6
4	342,08	-13,06	276941,1
Projeto Original	393,46	-	-

Para os Cenários 1, 3 e 4, os comprimentos de traçados obtidos nas simulações, são menores que o comprimento do traçado no projeto original. Este fato está relacionado com o desvio realizado na APA Banhado Grande, apresentada no mapa esquerdo da Figura 44. É possível observar que o traçado original realiza o desvio dessa APA pela parte inferior do mesmo, já os traçados dos cenários simulados realizam o desvio pela parte superior. Do ponto de vista técnico, este desvio do projeto original se mostra vantajoso, pois na parte inferior da APA existem áreas de agricultura, poucas zonas urbanizadas e com poucas formações florestais, como pode ser observado nas Figuras 44, 45 e 46, no entanto há um acréscimo significativo de extensão de comprimento.

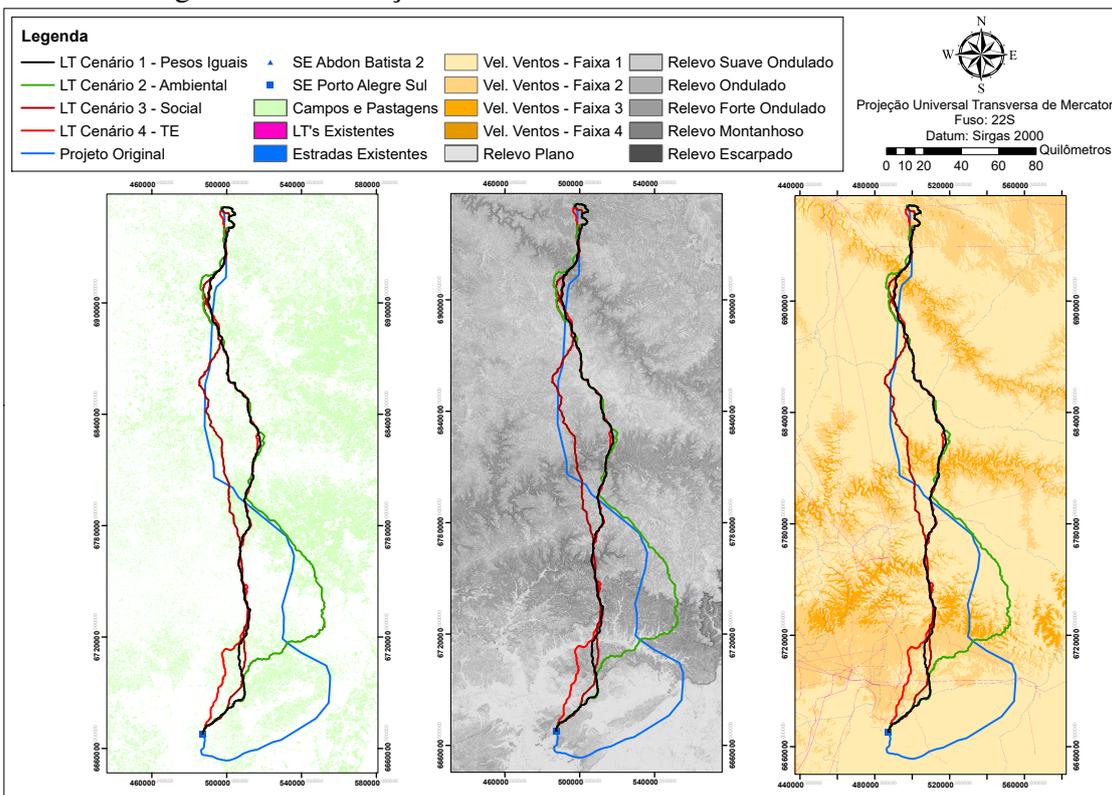
Este estudo de caso possui comprimento elevado, áreas de preservação ambiental, áreas urbanizadas e elevada variação da declividade, sendo que esta, teve impacto significativo nos traçados obtidos nos cenários simulados. A Figura 45 apresenta a declividade da região, sendo possível notar, no mapa central, que existem zonas de declividade acentuadas, com relevo montanhoso e escarpado. Em todas soluções existem desvios pontuais destas áreas, em que os traçados buscam zonas de menor declividade. Este aspecto pode ser observado inclusive no traçado do projeto original, pois seu trecho inicial utiliza um corredor de baixa declividade para transpor a encosta da serra presente na parte inferior direita da superfície de custos.

Figura 44 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 2



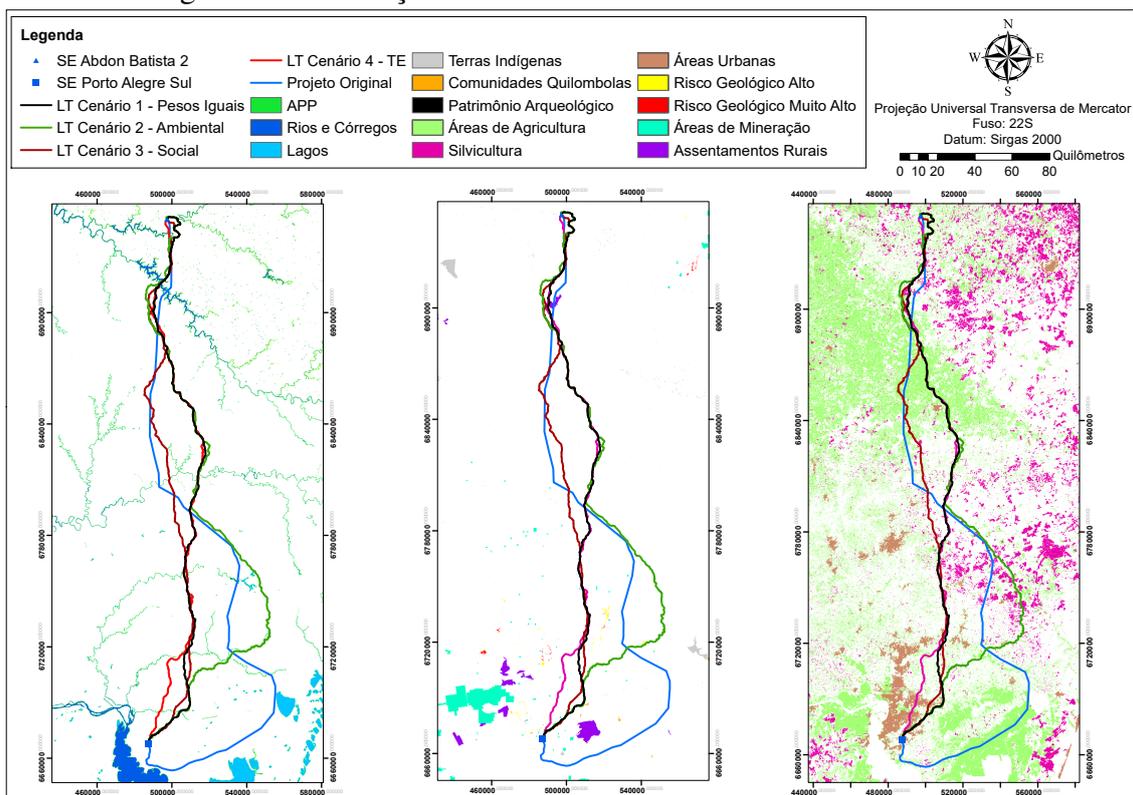
Fonte: do autor

Figura 45 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 2



Fonte: do autor

Figura 46 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 2



Fonte: do autor

Com o objetivo de verificar quantitativamente o efeito da variação dos pesos entre os cenários, optou-se por determinar a quantidade de células de cada um dos subcritérios que foram cruzadas pelos traçados obtidos em cada um dos cenários. Para isso, utilizou-se a função *buffer* do ArcGIS® para se determinar um corredor simples para cada diretriz de traçado, adotando-se a largura de 60 m. Os resultados estão apresentados na Tabela 17. As colunas CEN1, CEN2, CEN3 e CEN4 se referem aos Cenários 1, 2, 3 e 4 respectivamente, a coluna PO se refere ao projeto original da linha de transmissão, e a coluna TOTAL se refere à quantidade de células que cada subcritério possui na superfície de custo do estudo de caso.

Áreas como terras indígenas, comunidades quilombolas, patrimônio arqueológico e cavidades naturais não foram cruzadas em nenhum dos cenários. Em nenhum cenário as áreas bloqueadas (aeródromos e UC's de proteção integral) foram cruzadas.

O traçado do projeto original não cruza nenhuma área urbana, já para os cenários simulados nota-se que há travessia desse tipo de área em todos os casos, no entanto, para o Cenário 3, em que estas áreas possuem peso mais elevado, apenas 29 células foram cruzadas. As áreas urbanas são extremamente complexas para construção de uma linha de transmissão, portanto, este fato, pode evidenciar a necessidade de que este subcritério possua maior pontuação atribuída, reduzindo sua presença nos corredores preferenciais, independentemente do cenário.

Tabela 17 – Quantidade de células cruzadas para cada subcritério no Estudo de Caso 2

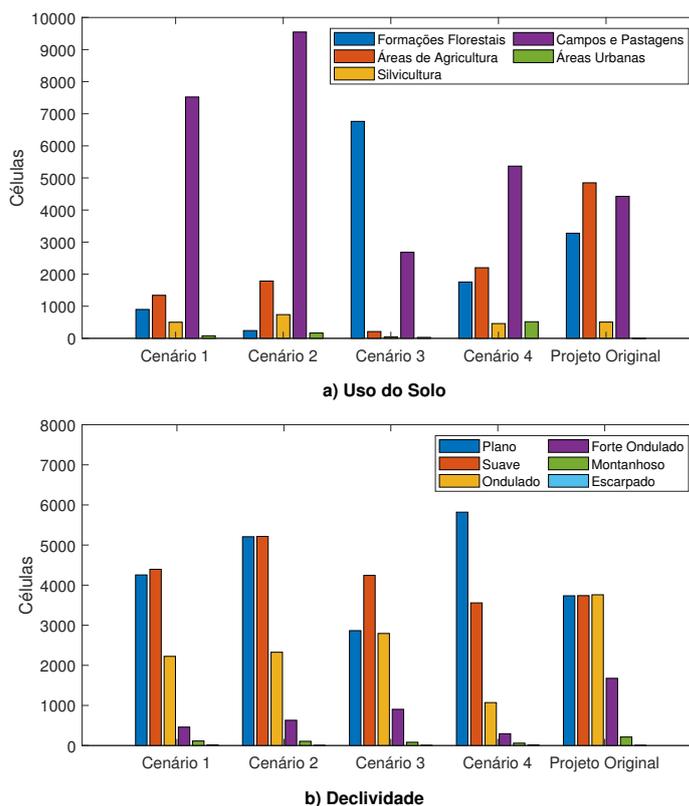
Subcritério	TOTAL	CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	PO
Áreas de Preservação Ambiental	$2,652 \times 10^6$	0	0	0	0	74
Áreas de Preservação Permanente	$1,107 \times 10^6$	30	25	50	46	51
Rota de Aves Silvestres	$2,129 \times 10^8$	42	37	208	348	2254
Cavidades Naturais	$3,264 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Formações Florestais	$2,872 \times 10^7$	900	241	6763	1755	3274
Áreas Úmidas	$7,747 \times 10^5$	9	3	48	21	0
Rios	$1,023 \times 10^6$	55	25	85	75	41
Lagos	$1,770 \times 10^6$	0	0	4	0	14
Terras Indígenas	$2,077 \times 10^5$	0	0	0	0	0
Comunidades Quilombolas	$5,575 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Patrimônio Arqueológico	$8,881 \times 10^3$	0	0	0	0	0
Áreas de Agricultura	$2,485 \times 10^7$	1341	1785	211	2201	4848
Assentamentos Rurais	$2,520 \times 10^5$	0	0	0	0	103
Silvicultura	$6,216 \times 10^6$	502	739	47	460	506
Campos e Pastagens	$2,050 \times 10^7$	7523	9547	2682	5368	4425
Áreas de Mineração	$7,134 \times 10^5$	0	0	0	34	0
Áreas Urbanas	$1,475 \times 10^6$	78	166	29	517	0
Linhas de Transmissão	$2,930 \times 10^5$	36	44	24	35	216
Estradas	$1,683 \times 10^5$	8	8	7	6	14
Risco Geológico - Alto	$1,008 \times 10^5$	4	6	13	12	0
Risco Geológico - Muito Alto	$2,551 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Declividade - Plano	$1,845 \times 10^7$	4255	5207	2866	5820	3735
Declividade - Suave	$2,225 \times 10^7$	4395	5215	4243	3558	3739
Declividade - Ondulado	$2,832 \times 10^7$	2224	2327	2795	1071	3760
Declividade - Forte Ondulado	$1,581 \times 10^7$	460	630	903	295	1676
Declividade - Montanhoso	$2,895 \times 10^6$	114	106	82	60	213
Declividade - Escarpado	$2,713 \times 10^5$	14	2	2	10	3
Velocidade Média Ventos (Faixa 1)	$5,616 \times 10^4$	3	8	8	3	0
Velocidade Média Ventos (Faixa 2)	$5,292 \times 10^6$	574	364	705	513	357
Velocidade Média Ventos (Faixa 3)	$2,593 \times 10^7$	2689	3611	3104	3385	2324
Velocidade Média Ventos (Faixa 4)	$5,673 \times 10^7$	8196	9504	7074	6913	10445
Aeródromos	$9,341 \times 10^5$	0	0	0	0	0
UC - Proteção Integral	$5,805 \times 10^5$	0	0	0	0	0

É possível observar no mapa central da Figura 46 e na Tabela 17 que o traçado do projeto original cruza um assentamento rural e, para os cenários simulados, houve um desvio pontual dessa área eliminando a travessia, evidenciando que de fato esta zona representou uma baixa área de atratividade.

A Figura 47 apresenta o total de células cruzadas que são representadas pelos principais subcritérios relacionados ao uso do solo e para todas as faixas de declividade. Neste estudo de caso, também é possível observar que nos Cenários 1, 2 e 4 em que os subcritérios campos e pastagens possuem menor peso, há uma priorização destas áreas. No Cenário 3, em que este critério possui maior peso, o traçado cruza uma maior quantidade de células com formações florestais, que para este cenário possuem menor peso. Em

menor escala, este comportamento se repetiu para as áreas de agricultura. Quanto à declividade, para os Cenários 1, 2 e 3 há um maior equilíbrio entre as três faixas mais baixas de declividade, com priorização das mesmas. No Cenário 4, que este critério possui maior peso, nota-se que foi obtida uma solução com priorização mais significativa de faixas de relevo plano.

Figura 47 – Travessias em células de subcritérios relacionados ao uso do solo e declividade para o Estudo de Caso 2



Fonte: do autor

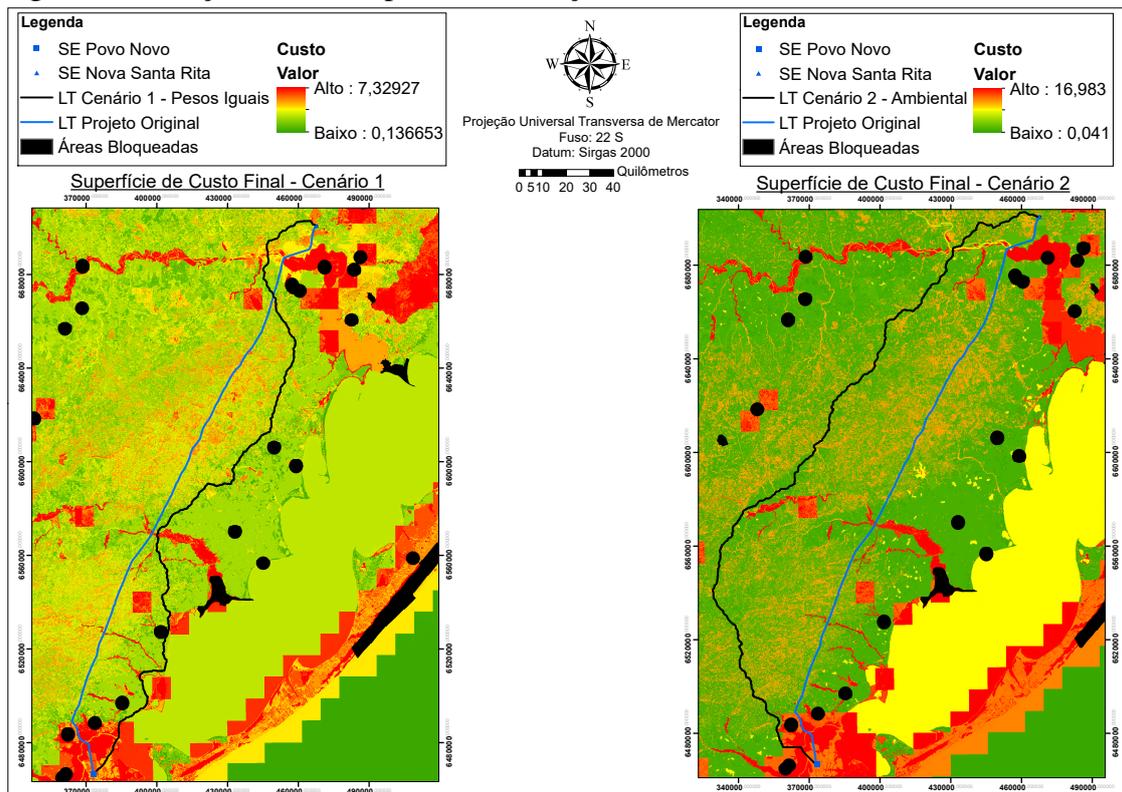
Para todos os cenários, em relação ao traçado do projeto original, há um decréscimo de travessias em áreas ambientalmente sensíveis. Nos quais, eliminou-se as travessias de unidades de conservação e, se reduziu, em média, 92% as travessias em áreas com presença de aves silvestres. Além disso, para os Cenários 1, 2 e 4 houve uma redução média de 70% as travessias em áreas com formações florestais.

4.2.3 Estudo de Caso 3

Neste estudo de caso, foram simulados os quatro cenários propostos para a LT 525 kV Nova Santa Rita - Povo Novo. A Figura 48 apresenta os traçados obtidos para os Cenários 1 e 2, assim como as superfícies de custo finais obtidas para cada cenário.

Para o Cenário 1, como pesos iguais para todas as classes de critérios, o traçado muda sua direção em diversos pontos de sua extensão, este aspecto está relacionado com a

Figura 48 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 1 e 2 do Estudo de Caso 3



Fonte: do autor

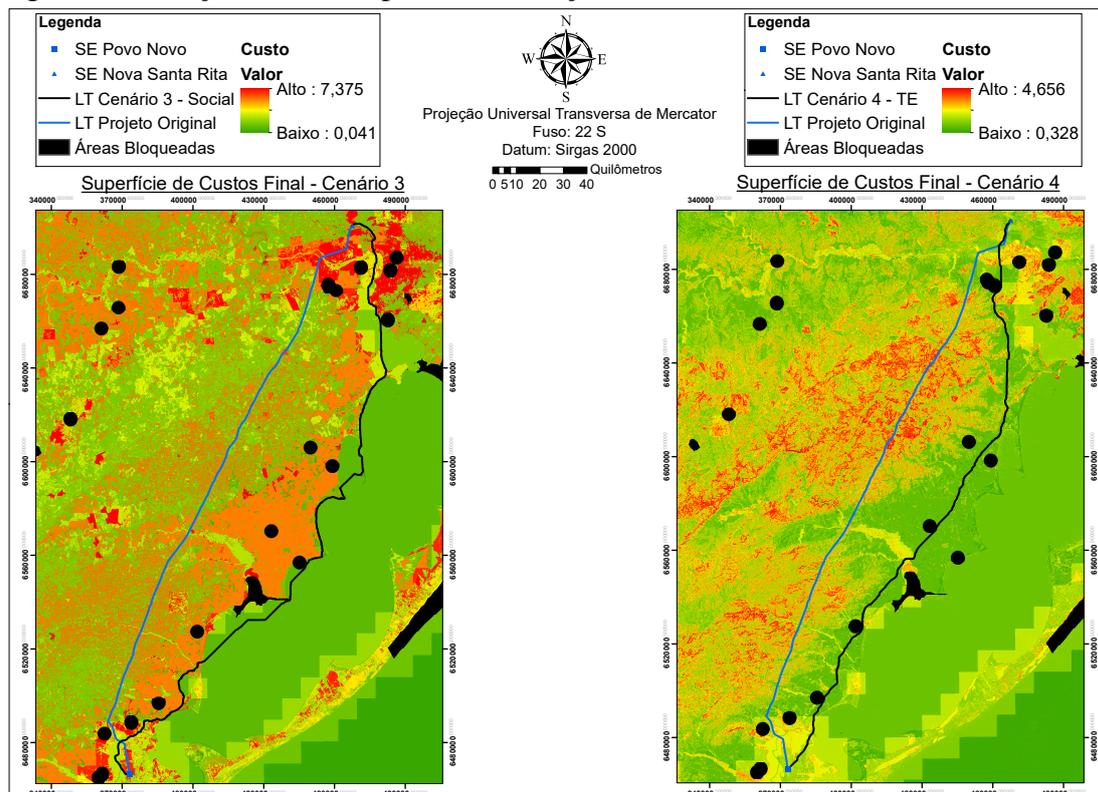
presença elevada de formações florestais e áreas úmidas na região de estudo, que neste caso possuem pontuação elevada. Desta forma, neste cenário, há uma priorização de áreas de agricultura e campos e pastagens (regiões de baixa pontuação), que pode ser visualizada nas Figuras 50, 51 e 52. Para o Cenário 2, com perspectiva ambiental, nota-se que o traçado priorizou um corredor de baixo custo localizado na parte esquerda do mapa, formado por trechos de áreas de campos e pastagens, como pode ser observado na Figura 52.

Na Figura 49 estão apresentados os traçados obtidos para os Cenários 3 e 4, assim como as superfícies de custo finais obtidas para cada cenário.

Para o Cenário 3, com perspectiva social, a solução obtida apresentou uma distorção significativa, tendo em vista que seu traçado ficou em grande parte no interior do Lago Guaíba e Lagoa dos Patos, como pode ser observado na Figura 51. Este aspecto está relacionado com o fato de que nesta região há uma grande quantidade de áreas de campos e pastagens e agricultura, que neste cenário possuem pesos elevados, desta forma, os corpos hídricos representaram uma solução atrativa, por possuírem baixo peso neste cenário.

A solução do Cenário 4, representou uma solução atrativa do ponto de vista técnico-econômico, uma vez que se concentrou em áreas com presença de agricultura com poucas mudanças de direção. Além disso, é possível notar no mapa central da Figura 52 que o traçado priorizou áreas com relevo plano em praticamente todo seu percurso.

Figura 49 – Traçados obtidos para as simulações dos Cenários 3 e 4 do Estudo de Caso 3



Fonte: do autor

A Tabela 18 apresenta os comprimentos e o custo final dos traçados simulados para cada um dos cenários, além disso, está apresentado o acréscimo percentual de comprimento, de cada cenário, em relação ao projeto original.

Tabela 18 – Comprimento e custo final dos cenários do Estudo de Caso 3

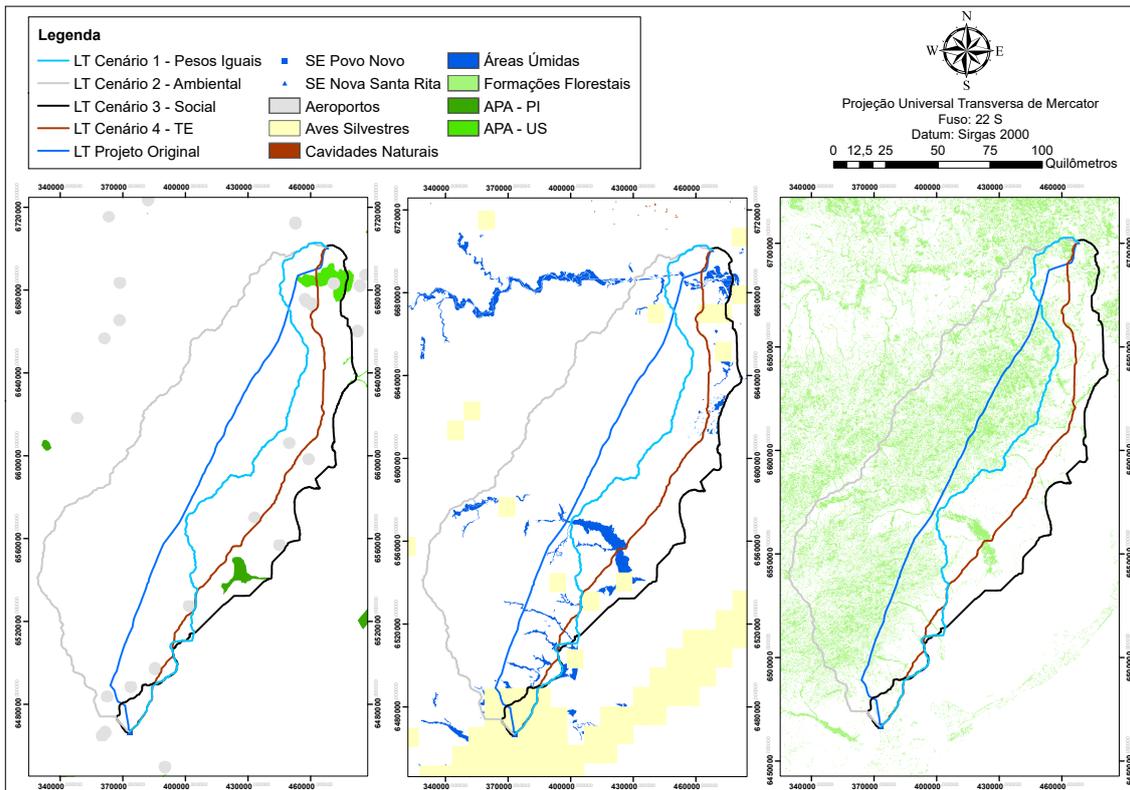
Cenário	Comprimento (km)	Acréscimo Comprimento (km)	Custo Final
1	344,09	28,41%	195692,7
2	376,90	40,66%	125449,0
3	340,53	27,08%	104171,9
4	285,33	6,48%	169333,4
Projeto Original	267,96	-	-

O traçado obtido para o Cenário 4 apresentou extensão similar ao projeto original, com acréscimo de apenas 6,48% no seu comprimento, para os demais cenários há um acréscimo significativo no comprimento das linhas.

Quanto aos critérios da classe ambiental, é possível observar no mapa esquerdo da Figura 50, que o traçado do projeto original realiza um desvio de uma APA de uso sustentável na região, estes desvios também foram realizados para os traçados obtidos nos Cenários 1 e 2. No entanto, observa-se que para os Cenários 3 e 4, ambos os traçados cruzam a APA.

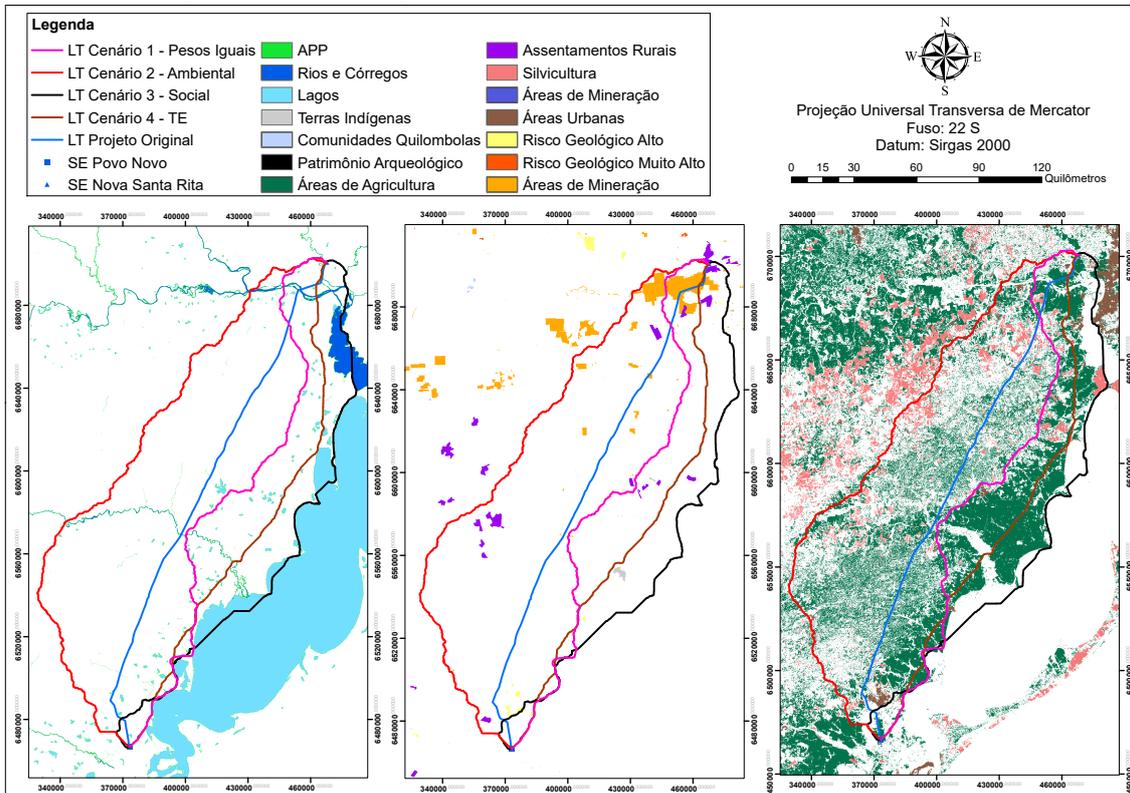
Com o objetivo de verificar quantitativamente o efeito da variação dos pesos entre os

Figura 50 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 3



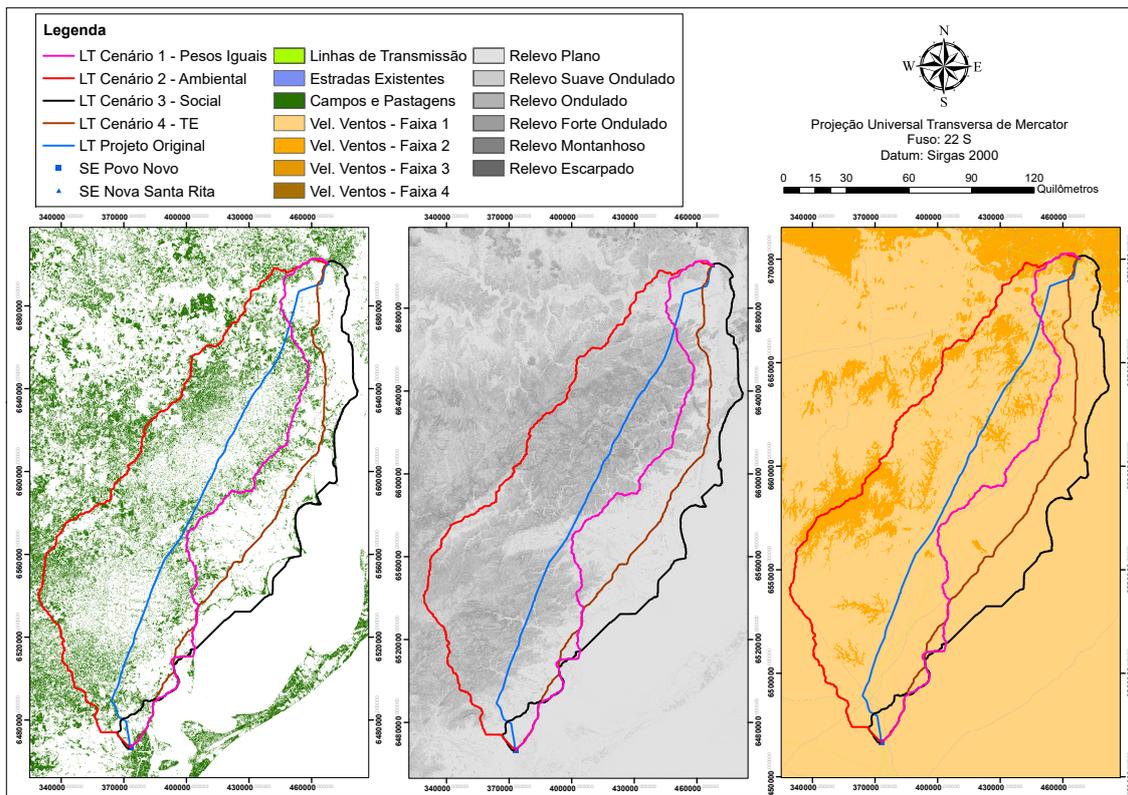
Fonte: do autor

Figura 51 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 3



Fonte: do autor

Figura 52 – Presença de subcritérios na área do Estudo de Caso 3



Fonte: do autor

cenários, optou-se por determinar a quantidade de células de cada um dos subcritérios que foram cruzadas pelos traçados obtidos em cada um dos cenários. Para isso, utilizou-se a função *buffer* do ArcGIS® para se determinar um corredor simples para cada diretriz de traçado, adotando-se a largura de 60 m. Os resultados estão apresentados na Tabela 19. As colunas CEN1, CEN2, CEN3 e CEN4 se referem aos Cenários 1, 2, 3 e 4 respectivamente, a coluna PO se refere ao projeto original da linha de transmissão, e a coluna TOTAL se refere à quantidade de células que cada subcritério possui na superfície de custo do estudo de caso.

Áreas como terras indígenas, comunidades quilombolas, patrimônio arqueológico, cavidades naturais não foram cruzadas em nenhum dos cenários. Assim como, em nenhum cenário as áreas bloqueadas (aeródromos e UC's de proteção integral) foram cruzadas.

É possível observar, que assim como para o Estudo de Caso 1, o projeto original deste traçado priorizou principalmente o paralelismo com linhas de transmissão existentes, fato que se evidencia pelo elevado número de células cruzadas neste subcritério. É possível notar, a partir do mapa central da Figura 50 e dos resultados apresentados na Tabela 16, que na região da área de estudo há grande presença de áreas úmidas, desta forma para os Cenários 1, 2 e 4, existem desvios pontuais destas áreas ou minimização das travessias.

Tabela 19 – Quantidade de células cruzadas para cada subcritério no Estudo de Caso 3

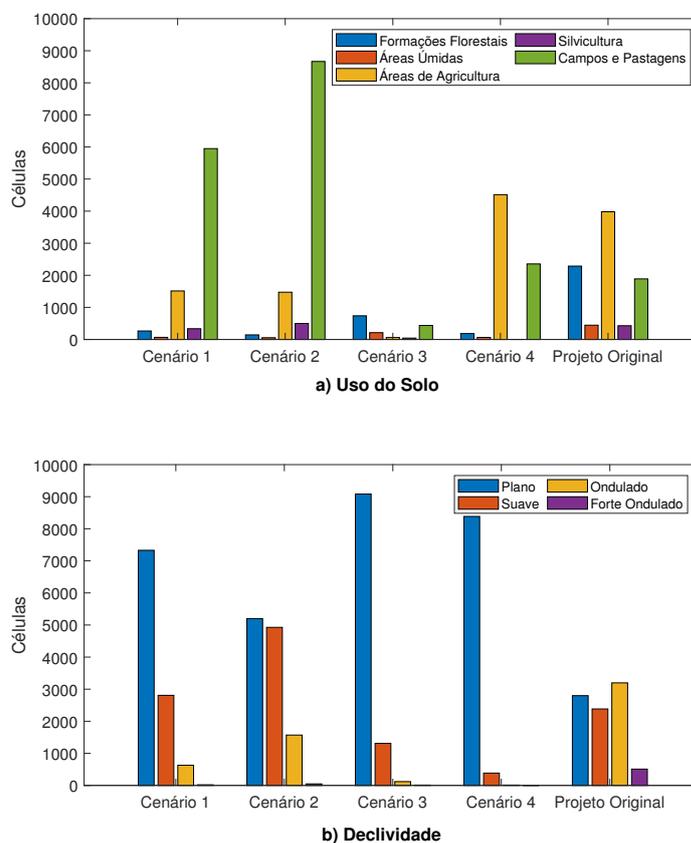
Subcritério	TOTAL	CEN1	CEN2	CEN3	CEN4	PO
Áreas de Preservação Ambiental	$1,643 \times 10^6$	0	0	408	135	0
Áreas de Preservação Permanente	$8,198 \times 10^5$	117	35	814	158	50
Rota de Aves Silvestres	$1,129 \times 10^7$	842	517	1381	1067	840
Cavidades Naturais	$1,559 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Formações Florestais	$1,573 \times 10^7$	265	143	737	184	2286
Áreas Úmidas	$3,427 \times 10^6$	66	55	212	64	445
Rios	$8,037 \times 10^5$	33	30	1668	145	52
Lagos	$1,210 \times 10^7$	17	0	3238	85	12
Terras Indígenas	$2,598 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Comunidades Quilombolas	$1,198 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Patrimônio Arqueológico	$3,278 \times 10^3$	0	0	0	0	0
Áreas de Agricultura	$2,192 \times 10^7$	1512	1473	61	4513	3981
Assentamentos Rurais	$5,045 \times 10^5$	0	0	0	23	88
Silvicultura	$3,527 \times 10^6$	335	499	43	3	428
Campos e Pastagens	$1,535 \times 10^7$	5949	8666	436	2354	1887
Áreas de Mineração	$8,419 \times 10^5$	43	7	0	315	696
Áreas Urbanas	$1,124 \times 10^6$	17	58	3	17	0
Linhas de Transmissão	$2,300 \times 10^5$	43	55	52	24	5605
Estradas	$1,466 \times 10^5$	46	35	5	6	15
Risco Geológico - Alto	$1,201 \times 10^5$	78	27	0	54	04
Risco Geológico - Muito Alto	$1,598 \times 10^4$	0	0	121	0	0
Declividade - Plano	$4,883 \times 10^7$	7329	5201	9082	8385	2798
Declividade - Suave	$1,784 \times 10^7$	2808	4927	1310	385	2384
Declividade - Ondulado	$1,639 \times 10^7$	630	1570	119	11	3197
Declividade - Forte Ondulado	$4,390 \times 10^6$	20	48	11	1	509
Declividade - Montanhoso	$5,251 \times 10^5$	0	0	0	0	3
Declividade - Escarpado	$2,742 \times 10^4$	0	0	0	0	0
Velocidade Média Ventos (Faixa 1)	$1,282 \times 10^3$	0	0	0	0	0
Velocidade Média Ventos (Faixa 2)	$1,143 \times 10^6$	0	0	0	0	0
Velocidade Média Ventos (Faixa 3)	$1,264 \times 10^7$	1008	3640	475	197	667
Velocidade Média Ventos (Faixa 4)	$7,421 \times 10^7$	9779	8106	10047	8585	8224
Aeródromos	$8,994 \times 10^5$	0	0	0	0	0
UC - Proteção Integral	$7,710 \times 10^5$	0	0	0	0	0

A Figura 53 apresenta o total de células cruzadas que são representadas pelos principais subcritérios relacionados ao uso do solo e para todas as faixas de declividade. Neste estudo de caso também é possível verificar a presença significativa do subcritério campos e pastagens e áreas de agricultura nas soluções obtidas.

Para o resultado obtido com o Cenário 1, como pesos iguais para critérios, apesar do comprimento da solução possuir um acréscimo de 77 km em relação ao projeto original, muito pelo fato de sua diretriz principal mudar de direção muitas vezes, nota-se uma redução importante de travessias em áreas com formações florestais (88%) e um aumento significativo de travessias em áreas de campos e pastagens (215%). Para o Cenário 4, verifica-se comprimento similar ao projeto original e, uma redução de 46% de travessias

de áreas com formações florestais, representando uma alternativa interessante, também do ponto de vista ambiental.

Figura 53 – Travessias de células relacionadas a uso do solo e declividade para o Estudo de Caso 3



Fonte: do autor

Apesar de todos os traçados obtidos com os cenários simulados possuírem maior comprimento que o traçado do projeto original, de maneira geral, este acréscimo de comprimento acarretou em uma redução de travessias em áreas ambientalmente sensíveis para cada cenário. Com destaque para o Cenário 2, em que há uma redução de 38% nas travessias de áreas com presença e rotas de aves silvestres, em 93% nas áreas com formações florestais, 30% nas áreas de preservação permanente e 45% nas áreas úmidas.

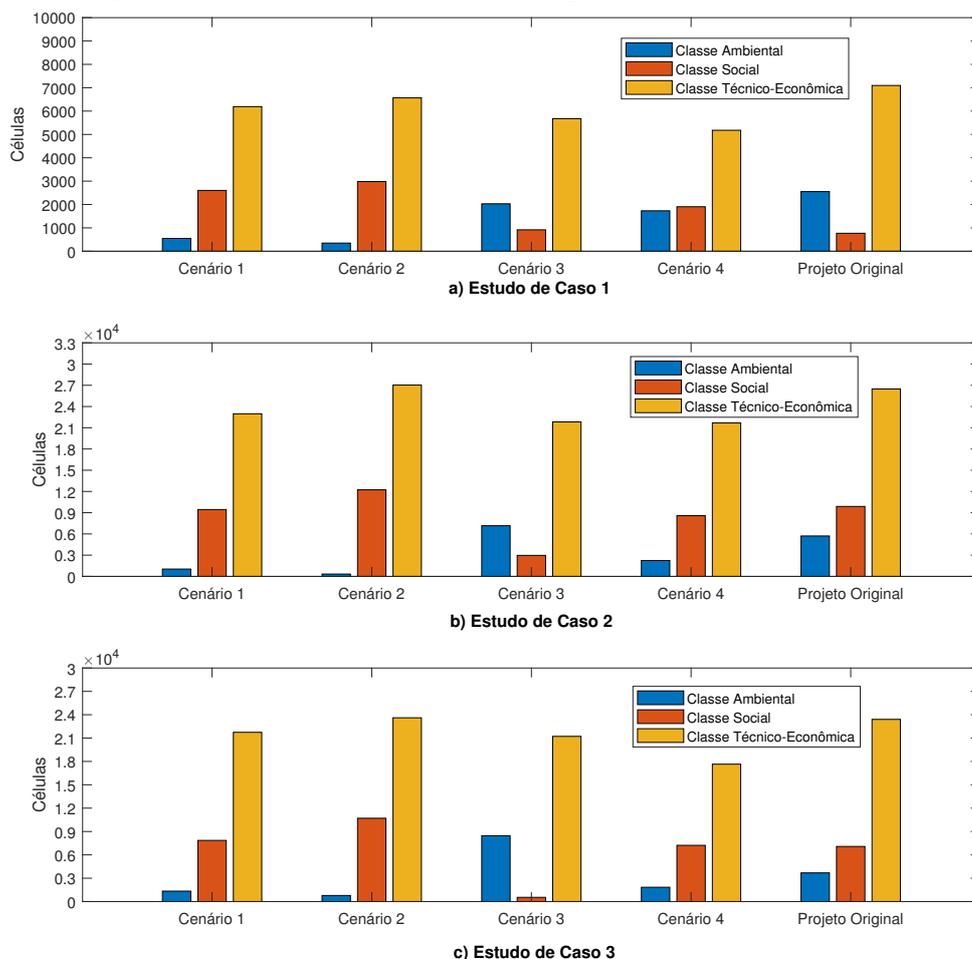
4.2.4 Discussão geral sobre os resultados

A partir das simulações realizadas foi possível observar que a variação do peso das classes de critérios de fato impacta fortemente nas áreas cruzadas pelos traçados obtidos nas simulações. Na Figura 54, está apresentado o total de células cruzadas para cada classe de critérios e cenários simulados.

Realizando uma comparação entre os cenários para os diferentes estudos de caso, é possível notar que para todos os estudos de caso, os Cenários 1 e 2, sempre representaram a menor quantidade de travessias de critérios da classe ambiental. Este aspecto evidencia

que apesar do Cenário 1 possuir pesos iguais para as classes, se mostrou com viés ambiental. Quanto ao Cenário 2, este aspecto é de fato esperado, uma vez que possui maior peso de critérios ambientais. Para o Cenário 3, com perspectiva social, este aspecto se repete, ou seja, para todos os estudos de caso, este cenário representou a menor quantidade de travessias dos critérios sociais.

Figura 54 – Quantidade total de células cruzadas por cenário simulado e classe de critério



Fonte: do autor

Para a classe de critérios técnico-econômica, destaca-se que a declividade cobre todas as células da superfície de custo, então, há naturalmente uma maior quantidade de travessias destas áreas. Ademais, a velocidade média dos ventos também impacta neste critério pois, da mesma forma, também está discretizada em todas as células da superfície de custos. Por este fato, nota-se que a classe técnico-econômica é a que possui a maior quantidade de células cruzadas. Esta análise permite verificar um comportamento presente em todos os estudos de caso, em que os Cenários 4 sempre apresentaram a solução de menor comprimento entre todas as soluções, pois o peso elevado da declividade acaba induzindo a redução de comprimento das mesmas.

As Tabelas 20 e 21 apresentam a quantidade de células cruzadas para cada cenário e

estudo de caso, considerando os critérios adotados neste trabalho, sendo que EC1, EC2, EC3 e EC4, representam os Estudos de Caso 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 20 – Quantidade de células cruzadas para cada critério dos Cenários 1 e 2

Critérios	Cenário 1			Cenário 2		
	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3
Áreas Ambientalmente Sensíveis	340	981	1290	326	306	750
Recursos Hídricos	208	55	50	23	25	30
Relevante Interesse Histórico e Cultural	0	0	0	0	0	0
Uso do Solo	2603	9447	7856	2984	12237	10703
Infraestrutura Linear Existente	51	44	89	104	52	90
Risco Geológico	0	4	78	0	6	27
Declividade do Terreno	3070	11462	10787	3231	13487	11746
Velocidade Média Ventos	3070	11462	10787	3231	13487	11746

Tabela 21 – Quantidade de células cruzadas para cada critério dos Cenários 3 e 4

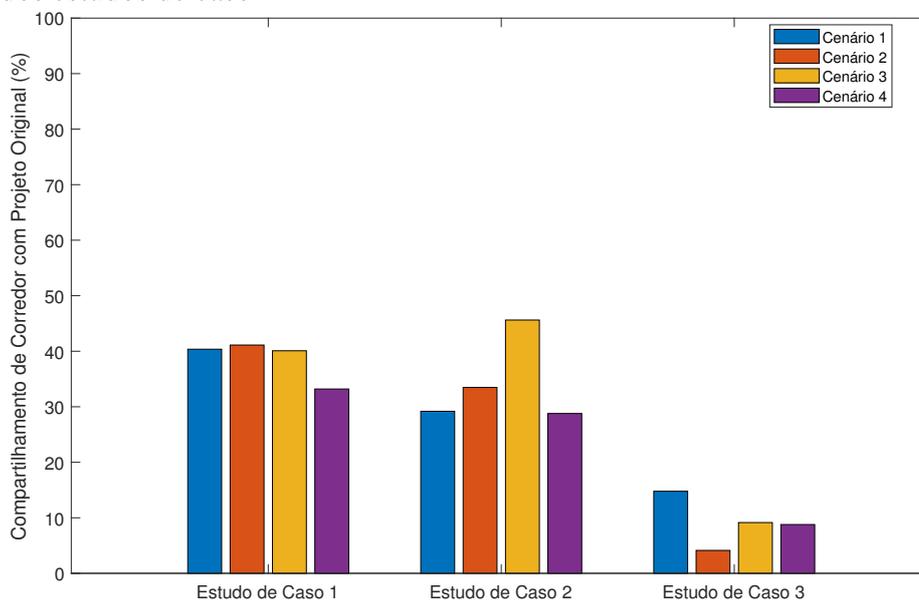
Critérios	Cenário 3			Cenário 4		
	EC1	EC2	EC3	EC1	EC2	EC3
Áreas Ambientalmente Sensíveis	1808	7069	3552	1409	2170	1608
Recursos Hídricos	222	89	4906	321	75	230
Relevante Interesse Histórico e Cultural	0	0	0	0	0	0
Uso do Solo	917	2969	543	1904	8580	7225
Infraestrutura Linear Existente	58	31	57	17	41	30
Risco Geológico	0	13	121	0	12	54
Declividade do Terreno	2809	10891	10522	2581	10814	8782
Velocidade Média Ventos	2809	10891	10522	2581	10814	8782

É possível notar que os subcritérios relacionados ao uso do solo, também possuem grande presença de células cruzadas pelos traçados, uma vez que, este critério também possui ampla presença nas superfícies de custo. Neste contexto, declividade e uso do solo, foram os critérios de maior importância nas soluções, uma vez que representam

pontuações elevadas em alguns subcritérios e estão distribuídos por toda a superfície de custo. O critério de velocidade média de ventos, apesar de possuir ampla presença na superfície de custos, representa menor influência no traçado, devido à baixa pontuação de seus subcritérios.

Segundo EPE (2018), os traçados discutidos nos relatórios R1 e R3 devem ser baseados em um corredor de estudo com largura de 10 km. Desta forma, estes corredores foram obtidos para os projetos originais dos estudos de caso, sendo possível verificar o percentual de presença dos traçados dos cenários simulados nestes corredores dos projetos originais, a Figura 55 apresenta os resultados encontrados.

Figura 55 – Percentual de compartilhamento de corredor com projeto original para simulações dos estudos de caso



Fonte: do autor

É possível verificar que os cenários do Estudo de Caso 3 apresentam menor presença no interior do corredor do projeto original. Os Estudos de Caso 1 e 2 possuem comportamento similar, com destaque para o Cenário 3 do Estudo de Caso 2, que possui maior participação entre todos os cenários e estudos de caso, este aspecto já havia sido discutido e fica visível no mapa apresentado de seu traçado. O Cenário 1, com pesos iguais para todas as classes de critérios, apresentou maior presença no Estudo de Caso 3, e se mostrou similar aos outros cenários nos demais estudos de caso. No entanto, de forma geral, nota-se que nenhum cenário apresentou superioridade significativa sobre os demais.

Em um contexto do planejamento da expansão da transmissão, a determinação dos corredores de estudo deve contemplar possibilidades de traçados em que todas as classes de critérios sejam contempladas, permitindo que os traçados seja estabelecidos da forma mais sustentável possível e alinhados com as diretrizes estabelecidas pela EPE no horizonte do planejamento. Desta forma, esta análise permitiu visualizar que em cenários

de projeto com perspectivas definidas, houve presença baixa ou regular de soluções nos corredores dos projetos originais.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método para determinação de traçados de novas linhas de transmissão utilizando análise de decisão multicritério e sistemas de informação geográfica. Através da revisão bibliográfica, buscou-se obter um conjunto de critérios compatível com os adotados no planejamento da expansão dos sistemas de transmissão no Brasil. Foram determinadas pontuações de atratividade para estes critérios a partir de uma análise sistemática de publicações que utilizam análise multicritério e pesquisas estruturadas com especialistas. Esta análise permitiu uma avaliação abrangente da subjetividade intrínseca do processo. Ainda, serviu como base para determinação das pontuações utilizadas neste trabalho, as quais foram aplicadas em estudo de caso envolvendo três linhas de transmissão. Para estas, foram determinados traçados através da elaboração de quatro cenários de variação de pesos dos critérios, considerando pesos iguais, perspectiva ambiental, social e técnico-econômica.

Com o objetivo de compreender a abordagem de caminhos de custo mínimo aplicada a técnicas e ferramentas SIG-MCDA, optou-se por implementar o algoritmo de Dijkstra. A partir de quatro experimentos genéricos, realizou-se uma análise comparativa dos resultados obtidos através do algoritmo e da simulação dos mesmos experimentos no ArcGIS®. Para ambos os casos, as simulações apresentaram resultados satisfatórios, em que para as superfícies de custo propostas foram encontrados os mesmos traçados.

No que diz respeito às simulações dos estudos de caso, utilizou-se a plataforma ArcGIS® para modelagem dos dados geoespaciais e determinação dos traçados dos cenários. Para o Estudo de Caso 1, foi possível verificar que a presença de uma área de preservação ambiental de grande extensão, entre as duas subestações a serem conectadas, influenciou significativamente na determinação dos resultados. Os traçados obtidos para os Cenários 1, 2 e 3 realizaram desvios desta área, acarretando em um acréscimo significativo de comprimento da linha em relação ao projeto original. Para o traçado do Cenário 4, em que os critérios técnico-econômicos possuem maior peso, foi obtido o traçado com maior similaridade de comprimento ao projeto original, e por consequência de menor comprimento entre todos os cenários simulados.

A linha de transmissão do Estudo de Caso 2 foi selecionada para análise, pois está

inserida em uma área com complexidade técnica e socioambiental elevada. Ainda, neste estudo de caso, foram obtidos os traçados de maior similaridade de rota com o projeto original, evidenciando que a metodologia apresentou soluções técnicas viáveis em um ambiente com complexidade elevada.

No Estudo de Caso 3, selecionado para análise por possuir baixa complexidade técnica e socioambiental, foram obtidas soluções de menor similaridade com o projeto original, além disso, verificou-se que subcritérios relacionados ao uso do solo impactaram significativamente nos resultados deste estudo de caso. Ademais, para todos os estudos de caso, verificou-se que o critério declividade e uso do solo possuem forte influência nos traçados, uma vez que possuem grande representatividade nas superfícies de custos.

Para todos os estudos de caso, foi possível verificar que a variação dos pesos dos cenários impactou significativamente nos traçados obtidos. Além disso, pelo fato de os cenários terem sido elaborados através da atribuição de pesos elevados de acordo com uma perspectiva de projeto relacionada com as classes de critérios. Foi possível observar que para cada cenário simulado, a perspectiva considerada de acordo com a classe de maior peso, representou a solução com menor quantidade de travessias dos traçados nas áreas representadas por esta classe. Dessa forma, é possível afirmar que o método apresentado neste trabalho auxilia na obtenção de um grupo de possíveis traçados, que podem ser posteriormente analisados de forma mais detalhada com a incorporação de outros aspectos importantes para a tomada de decisão.

Nos Cenários 4, em que os critérios técnico-econômicos possuem maior peso e critérios sociais e ambientais possuem menor peso, foi possível observar que, para os três estudos de caso propostos, foram obtidos os traçados com menor comprimento. Neste caso, é possível afirmar que, em um contexto de simulações que aspectos socioambientais são tratados como externalidades, foi possível obter traçados de menor comprimento.

Do ponto de vista dos traçados dos projetos originais dos estudos de caso, foi possível observar que o critério de paralelismo com linhas de transmissão já existentes é utilizado. Este aspecto ficou evidente nos Estudos de Caso 1 e 3, em que os traçados das linhas originais compartilham a maior parte de sua rota com corredores de linhas que já existem no local. Assim, pode-se concluir que o aspecto técnico-econômico, nestes casos, se sobrepõe a uma avaliação integrada de demais critérios.

A metodologia apresentada neste trabalho tem como principal objetivo fornecer uma diretriz principal de projeto para estabelecimento de traçado de linha de transmissão, em que a partir de um conjunto de alternativas, seja selecionada a que melhor se adequa ao projeto. Ademais, entende-se que métodos completamente automatizados podem auxiliar a tomada de decisão, porém não excluem uma análise subjetiva de especialistas. Neste contexto, a metodologia auxilia na inserção de critérios muitas vezes ignorados, incorporando-os ao processo de tomada de decisão desde a fase de planejamento da expansão. Desta forma, pode haver a redução de riscos e custos relativos a aspectos não

considerados inicialmente, principalmente no que diz respeito a grandes desvios, licenciamento ambiental, disputas judiciais e compensação financeira por questões fundiárias. Este tipo de abordagem também pode fornecer subsídio para discussão mais fundamentada com a comunidade afetada e outros *stakeholders*, como em audiências públicas.

Em um contexto que a sustentabilidade na geração de energia tem sido amplamente discutida, e que as fontes renováveis tem crescido em participação nas matrizes energéticas dos países, é necessário que a expansão da transmissão também acompanhe esta tendência. Considerar desde a fase de planejamento até a fase de execução dos projetos uma visão abrangente de todos os aspectos envolvidos no processo, pode contribuir para escolhas que reduzam os impactos socioambientais na construção de novas linhas de transmissão.

5.1 Publicações realizadas

Durante o mestrado foram desenvolvidos dois artigos, apresentados em congressos e, listados a seguir.

1. CASTIGLIO, GUILHERME; KLAS, JULIANA ; DAL FORNO, MARLISE. Avaliação da abordagem dos impactos ambientais no planejamento da expansão dos sistemas de transmissão de energia elétrica no Brasil: Análise do caso da linha de transmissão de 230 kV Osório 3 - Gravataí 3. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE 2020, 2020. Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020.
2. CASTIGLIO, GUILHERME; KLAS, JULIANA ; DAL FORNO, MARLISE ; RESENER, MARIANA. Power Line Routing Considering Aspects of Sustainable Development and Complex Environments. In: 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Latin America (ISGT Latin America), 2021, Lima. 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 2021. p. 1.

5.2 Estudos futuros

Como possíveis trabalhos futuros, entende-se que os temas e tópicos apresentados a seguir possuem potencial para serem abordados:

- elaboração de pesquisas estruturadas com especialistas, visando a obtenção de uma amostra com representatividade suficiente para elaboração das pontuações e pesos de critérios;
- aplicação de ferramentas que buscam mitigar possíveis distorções na análise multicritério, como teoria Fuzzy e otimização multiobjetivo;

- proposição de modelo de otimização utilizando conceitos de SIG-MCDA para determinação do traçado ótimo de linhas de transmissão, adicionando restrições como mudanças de direção, custos financeiros, além dos critérios socioambientais;
- para o contexto brasileiro da expansão da transmissão, aprofundar a modelagem multicriterial para que seja aplicada no processo de planejamento e elaboração do relatório R1;
- elaborar uma metodologia baseada em etapas e processos para determinação de alternativas de traçados, considerando aspectos socioambientais e técnico-econômicos;
- elaborar ferramentas e indicadores para avaliação quantitativa das características dos traçados.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Resolução Normativa N° 67, Estabelece critérios para a composição da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, Brasília, 2004.

ANEEL. **Planejamento Energético**: Inserção da Variável Ambiental na Expansão da Oferta de Energia Elétrica. Rio de Janeiro-RJ: Synergia, 2020.

ANM. Sistema de Informações Geográficas da Mineração. **Agência Nacional de Mineração**, [S.l.], 2022.

ARAÚJO, F. R. N. de. **Coordenação de dados, valores e participação de atores na tomada de decisão em estudos de alternativas locais de linhas de transmissão**: uma proposta utilizando modelagem espacial e análise multicriterial. 2016. 216 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ARONOFF, S. Geographic information systems: a management perspective. **Geocarto International**, [S.l.], v.4, n.4, p.58–58, 1989.

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, 2018.

BAGLI, S.; GENELETTI, D.; ORSI, F. 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, 2011.

BELLMAN, R. On a routing problem. **Quarterly of applied mathematics**, [S.l.], v.16, n.1, p.87–90, 1958.

BIASOTTO, L. D. *et al.* Comportamento de voo de aves em resposta ao uso de sinalizadores em linhas de transmissão de energia elétrica. **Iheringia. Série Zoologia**, [S.l.], v.107, 2017.

BOBERG, A. L.; MONIS-KHOO, S. A. The Delphi method: a review of methodology and an application in the evaluation of a higher education program. **The Canadian Journal of Program Evaluation**, [S.l.], v.7, n.1, p.27, 1992.

BRASIL. Lei Nº 6001, Dispõe sobre o Estatuto Nacional do Índio. **Constituição da República Federativa do Brasil**, Brasília-DF, n.vol. 1, dez 1973.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. **Presidente da República**, Brasília-DF, n.vol. 1, dez 1988.

BRASIL. Lei 12.651, Estabelece o no Código Florestal do Brasil. **Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos**, Brasília-DF, 2017.

BRASIL. Decreto Federal nº 10.141 - Estabelece Comitê Nacional das Zonas Úmidas. **Ministério do Meio Ambiente**, Brasília-DF, n.vol. 1, dez 2019.

BRASIL. ICA 63-19, Estabelece Critérios de Análise Técnica da Área de Aeródromos. **Ministério da Defesa - Comando da Aeronáutica**, Brasília-DF, 2020.

BRASIL. Mapas das Infraestruturas de todos os modos de transportes. **Ministério de Infraestrutura e Transportes**, [S.l.], 2022.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. **Principles of geographical information systems**. [S.l.]: Oxford university press, 2015.

CAMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução a Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos-SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

CAMPOS, P. B. R.; ELMIRO, M. A. T.; NOBREGA, R. A. D. A. A utilização da modelagem ambiental para sistematização do conhecimento tácito: identificação de corredores preferenciais para linhas de transmissão de energia elétrica. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.l.], v.20, n.4, p.765–783, 2014.

CHENG, M.-Y.; CHANG, G.-L. Automating utility route design and planning through GIS. **Automation in Construction**, [S.l.], v.10, n.4, p.507–516, 2001.

CHOOBINEH, F.; BURGMAN, T. Transmisson Line Route Selection: an application of k-shortest paths and goal programming. **IEEE transactions on power apparatus and systems**, [S.l.], n.11, p.3253–3259, 1984.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. [S.l.]: Editora Blucher, 1974.

CLAUDIO, C. F. B. R. **Projetos de estruturas lineares: o transporte e suas trilhas e os caminhos da energia-os limites da sustentabilidade**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, 2007.

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

CONAMA. Resolução N°01, Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, Brasília-DF, n.vol. 1, dez 1986.

CPRM. Guia de Procedimentos Técnicos do Departamento de Gestão Territorial: Setorização de áreas de Risco Geológico. **Serviço Geológico do Brasil**, Brasília-DF, 2021.

DEDEMEN, Y. **A multi-criteria decision analysis approach to GIS-based route selection for overhead power transmission lines**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — , 2013.

DEMIRCAN, S.; AYDIN, M.; DURDURAN, S. S. Finding optimum route of electrical energy transmission line using multi-criteria with Q-learning. **Expert Systems with Applications**, [S.l.], v.38, n.4, p.3477–3482, 2011.

DIJKSTRA, E. W. *et al.* A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische mathematik**, [S.l.], v.1, n.1, p.269–271, 1959.

DTU. Global Wind Atlas. **Technical University of Denmark - Department of Wind Energy**, Denmark, 2022.

EASTMAN, J. R. Multi-criteria evaluation and GIS. **Geographical information systems**, [S.l.], v.1, n.1, p.493–502, 1999.

EC. Public engagement and acceptance in the planning and implementation of European electricity interconnectors - Third report of the Commission Expert Group on electricity interconnection targets. **European Comission**, [S.l.], 2019.

EKEL, P. Y. *et al.* Two-stage multicriteria georeferenced express analysis of new electric transmission line projects. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [S.l.], v.108, p.415–431, 2019.

ELAMIN, I.; DUFFUAA, S.; YASSEIN, H. Transmission line route selection by goal programming. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [S.l.], v.12, n.2, p.138–143, 1990.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, Brasília-DF, 2018.

EMBRAPA. Agricultura e Preservação Ambiental: Uma Análise do Cadastro Ambiental Rural. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, Campinas-SP, jan 2020.

ENGIE. **Relatório R3 - Caracterização e Análise Socioambiental - LT 500 kV Ponta Grssa - Assis C1 e C2**. [S.l.: s.n.], 2020.

EPE. Diretrizes para a Elaboração dos Relatórios Técnicos para a Licitação de Novas Obras da Rede Básica. **Empresa de Pesquisa Energética**, Brasília-DF, 2018.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília-DF: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

EPE. **Análise Socioambiental das Fontes Energéticas do PDE 2030**. Brasília-DF: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

EPE. Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro. **Empresa de Pesquisa Energética**, Brasília-DF, 2022.

EPRI-GTC. **Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology**. Palo Alto, CA, and Tucker, GA: Electric Power Research Institute, Inc - Georgia Transmission Corporation, 2006.

EPRI-GTC. **Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology**. Palo Alto, CA, and Tucker, GA: Electric Power Research Institute, Inc - Georgia Transmission Corporation, 2019.

EROĞLU, H.; AYDIN, M. Optimization of electrical power transmission lines routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS. **Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, [S.l.], v.23, n.5, p.1418–1430, 2015.

FISHBURN, P. C. Additive utilities with incomplete product sets: application to priorities and assignments. **Operations Research**, [S.l.], v.15, n.3, p.537–542, 1967.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem Complicação**. [S.l.]: Oficina de textos, 2008. v.1.

FREIMAN, F. P. **Modelagem espacial multicriterial para a definição automática de diretrizes de linha de transmissão de energia elétrica**. 2019. 75 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Rio de Janeiro, 2019.

FREIMAN, F. P.; SANTOS, D. R. dos. Planejamento do Traçado de Diretrizes de Linha de Transmissão de Energia Elétrica Baseado em Otimização Multicritério e SIG. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.l.], v.71, n.3, p.878–905, 2019.

FUNAI. Dados Georreferenciados das Terras Indígenas no Brasil. **Fundação Nacional do Índio**, Brasília-DF, 2022.

FURTADO, R. **Custos Ambientais da Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro-RJ: Synergia, 2016.

FURTADO, R. C. **The incorporation of environmental costs into power system planning in Brazil**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Imperial College London (University of London), 1996.

FURTADO, R. C. *et al.* Inclusão de Custos Ambientais nos Orçamentos de Empreendimentos de Transmissão. **XV SNPTEE-Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu**, [S.l.], 1999.

GILES, R. H.; SMART, C. W. **POWER, a Computer System for Corridor Location**. USA: Office of Biological Services, Fish and Wildlife Service, US Department, 1976. v.117.

GOLDBARG, M.; GOLDBARG, E. **Grafos: conceitos, algoritmos e aplicações**. [S.l.]: Elsevier, 2012.

GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; CONEJO, A.; CAÑIZARES, C. **Sistemas de Energia Elétrica: análise e operação**. Rio de Janeiro: GEN-LTC, 2018. 554 p.

GONÇALVES, A. B. An extension of GIS-based least-cost path modelling to the location of wide paths. **International Journal of Geographical Information Science**, [S.l.], v.24, n.7, p.983–996, 2010.

GONÇALVES, V. M. *et al.* Transmission line routing optimization using rapid random trees. **Electric Power Systems Research**, [S.l.], v.194, p.107096, 2021.

GRASSI, S. *et al.* A GIS-based process for calculating visibility impact from buildings during transmission line routing. In: **Connecting a digital Europe through location and place**. [S.l.]: Springer, 2014. p.383–402.

GROSSARDT, T.; BAILEY, K.; BRUMM, J. Analytic minimum impedance surface: geographic information system-based corridor planning methodology. **Transportation Research Record**, [S.l.], v.1768, n.1, p.224–232, 2001.

GROSSARDT, T.; BAILEY, K.; BRUMM, J. Structured public involvement: problems and prospects for improvement. **Transportation Research Record**, [S.l.], v.1858, n.1, p.59–102, 2003.

HO, W.; MA, X. The state of the art integrations and applications of the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], v.267, n.2, p.399-414, 2018.

HWANG, C.-L.; YOON, K. Methods for multiple attribute decision making. In: **Multiple attribute decision making**. [S.l.]: Springer, 1981. p.58–191.

IBGE. Base Cartográfica do Estado do Rio Grande do Sul, Escala 1:25.000. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Brasília-DF, 2018.

IBGE. Base Cartográfica do Estado de Santa Catarina, Escala 1:25.000. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Brasília-DF, 2018.

IBGE. Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil: 2016–2018. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Brasília-DF, 2020.

IBGE. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Brasília-DF, n.vol. 35, jan 2020.

INCRA. Dados Georreferenciados das Comunidades Quilombolas Reconhecidas no Brasil. **Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária**, Brasília-DF, 2022.

INCRA. Dados Georreferenciados dos Projetos de Assentamentos Rurais no Brasil. **Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária**, Brasília-DF, 2022.

IPHAN. Dados Georreferenciados dos Sítios Arqueológicos no Brasil. **Instituto Patrimônio Histórico e Artístico Nacional**, Brasília-DF, 2022.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-criteria decision analysis: methods and software**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

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.

JANNUZZI, G. d. M.; SWISHER, J. N. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis**. [S.l.: s.n.], 1997. 246–246 p.

KIESSLING, F. *et al.* **Overhead power lines: planning, design, construction**. [S.l.]: Springer, 2003. v.759.

KUMAR, A. *et al.* A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v.69, p.596–609, 2017.

- 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.
- LIKERT, R. A technique for the measurement of attitudes. **Archives of psychology**, [S.l.], 1932.
- LIMA, R. **Otimização de traçado de linhas de transmissão por meio de avaliação multicritério e Sistema de Informações Geográficas (SIG)**. 2015. 73 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- LIMA, R. M. de *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.
- LONGLEY, P. A. *et al.* **Geographic information science and systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.
- MAGUIRE, D. J. An overview and definition of GIS. **Geographical information systems: Principles and applications**, [S.l.], v.1, n.1, p.9–20, 1991.
- MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International journal of geographical information science**, [S.l.], v.20, n.7, p.703–726, 2006.
- MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria decision analysis in geographic information science**. [S.l.]: Springer, 2015. v.1.
- MAPBIOMAS. Projeto MAPBIOMAS - Coleção 4 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. **General Handbook Algorithm: Theoretical Basis Document**, [S.l.], 2018.
- MAPBIOMAS. **Análise Detalhada da Ocupação e Uso da Terra no Brasil. MAPBIOMAS**, [S.l.], 2022.
- MCCORMAC, J. C.; SARASUA, W.; DAVIS, W. **Surveying**. [S.l.]: Wiley Global Education, 2012.
- MMA. **Dados Georreferenciados do Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. Ministério do Meio Ambiente**, Brasília-DF, 2022.
- MMA. **Dados Georreferenciados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE). Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas**, Brasília-DF, 2022.

- MONCECCHI, D. **Exploiting valley extraction algorithms for improving power transmission line routing**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Italy, 2020.
- MONTEIRO, A. M. V. *et al.* Análise espacial de dados geográficos. **Brasília: Embrapa**, [S.l.], 2004.
- 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, 2005.
- MUELLER, C. E.; KEIL, S. I.; BAUER, C. Effects of spatial proximity to proposed high-voltage transmission lines: evidence from a natural experiment in lower saxony. **Energy Policy**, [S.l.], v.111, p.137–147, 2017.
- NOBREGA, I. J. da. **Otimização da rota de linhas de transmissão utilizando uma metodologia de avaliação multicritério**. 2019. 163 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.
- OLIVEIRA, A. d. *et al.* Relatório anual de rotas e áreas de concentração de aves migratórias no Brasil. **CEMAVE/ICMBio**, [S.l.], 2016.
- ONS. Extensão das Linhas de Transmissão. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**, [S.l.], jun 2021.
- PIVETEAU, N. **A novel approach to the routing problem of overhead transmission lines**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Geographisches Institut der Universität Zürich, 2017.
- REIS, L. B. dos; SANTOS, E. C. **Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. [S.l.]: Editora Manole, 2006.
- SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of mathematical psychology**, [S.l.], v.15, n.3, p.234–281, 1977.
- SAN CRISTÓBAL, J. R. **Multi criteria analysis in the renewable energy industry**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- SANTOS, A. H. M. *et al.* Optimizing routing and tower spotting of electricity transmission lines: an integration of geographical data and engineering aspects into decision-making. **Electric Power Systems Research**, [S.l.], v.176, p.105953, 2019.
- SCHITO, J.; MONCECCHI, D.; RAUBAL, M. Determining transmission line path alternatives using a valley-finding algorithm. **Computers, Environment and Urban Systems**, [S.l.], v.86, p.101571, 2021.

SHAFIULLAH, M. *et al.* Role of spatial analysis technology in power system industry: an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v.66, p.584–595, 2016.

SHANDIZ, S. G. *et al.* Investigation of different methods to generate Power Transmission Line routes. **Electric Power Systems Research**, [S.l.], v.165, p.110–119, 2018.

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, 2011.

STUCKY, J. L. D. On applying viewshed analysis for determining least-cost paths on digital elevation models. **International Journal of Geographical Information Science**, [S.l.], v.12, n.8, p.891–905, 1998.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

VEGA, M.; SARMIENTO, H. G. Image processing application maps optimal transmission routes. **IEEE computer applications in power**, [S.l.], v.9, n.2, p.47–51, 1996.

VERONESI, F. *et al.* Automatic selection of weights for GIS-based multicriteria decision analysis: site selection of transmission towers as a case study. **Applied Geography**, [S.l.], v.83, p.78–85, 2017.

VOOGD, J. **Multicriteria evaluation for urban and regional planning**. 1982. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Delftsche Uitgevers Maatschappij, 1982.

WANG, J.-J. *et al.* Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and sustainable energy reviews**, [S.l.], v.13, n.9, p.2263–2278, 2009.

WEBER, E. Aula 3: fundamentos de sig e introdução ao arcgis. **DIL01166: Sistemas de Informação Geográfica A**, [S.l.], 2021.

WEBER, E.; HASENACK, H. Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação. , Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia, 2004.

WEEDY, B. Environmental aspects of route selection for overhead lines in the USA. **Electric power systems research**, [S.l.], v.16, n.3, p.217–226, 1989.

XU, J.; LATHROP JR, R. G. Improving cost-path tracing in a raster data format. **Computers & Geosciences**, [S.l.], v.20, n.10, p.1455–1465, 1994.

YU, A. S. *et al.* Tomada de decisão nas organizações: uma visão multidisciplinar. **São Paulo: Saraiva**, [S.l.], 2011.

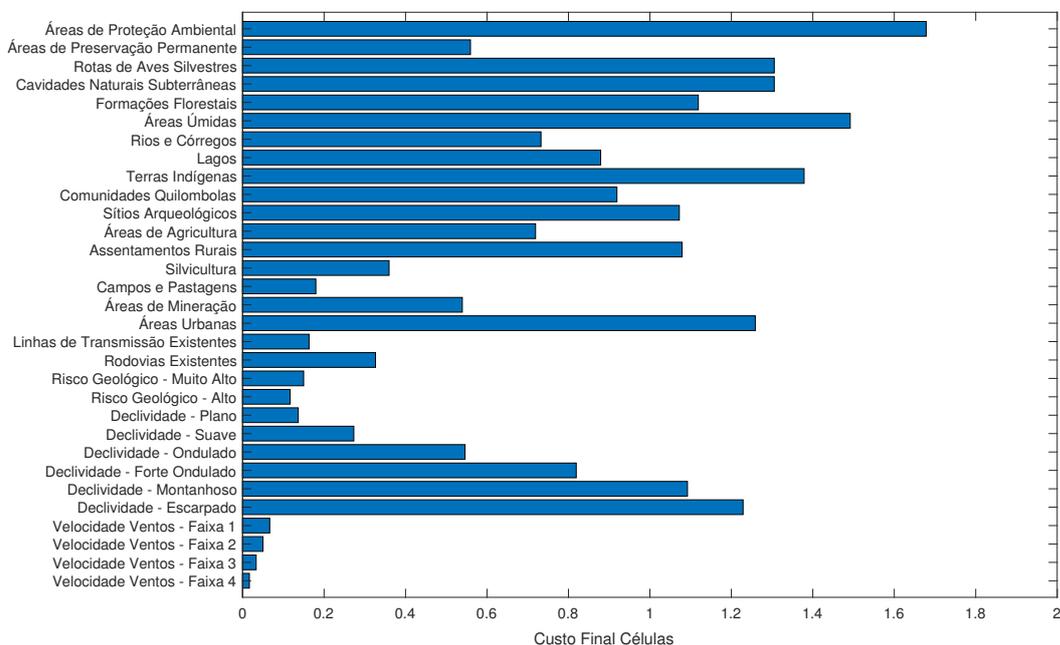
YU, C.; LEE, J.; MUNRO-STASIUK, M. J. Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning. **International Journal of Geographical Information Science**, [S.l.], v.17, n.4, p.361–376, 2003.

ZIPF, M. *et al.* Multi-criteria high voltage power line routing an open source GIS-based approach. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S.l.], v.8, n.8, p.316, 2019.

APÊNDICE A CUSTO FINAL ASSOCIADO À CADA SUBCRITÉRIO NA ABORDAGEM ADOTADA

A Figura 56 apresenta o custo final associado para cada subcritério no Cenário 1, estes valores foram associados à superfície de custo final deste cenário, a partir da Equação (11), com aplicação dos pesos de critérios e pesos de suas classes.

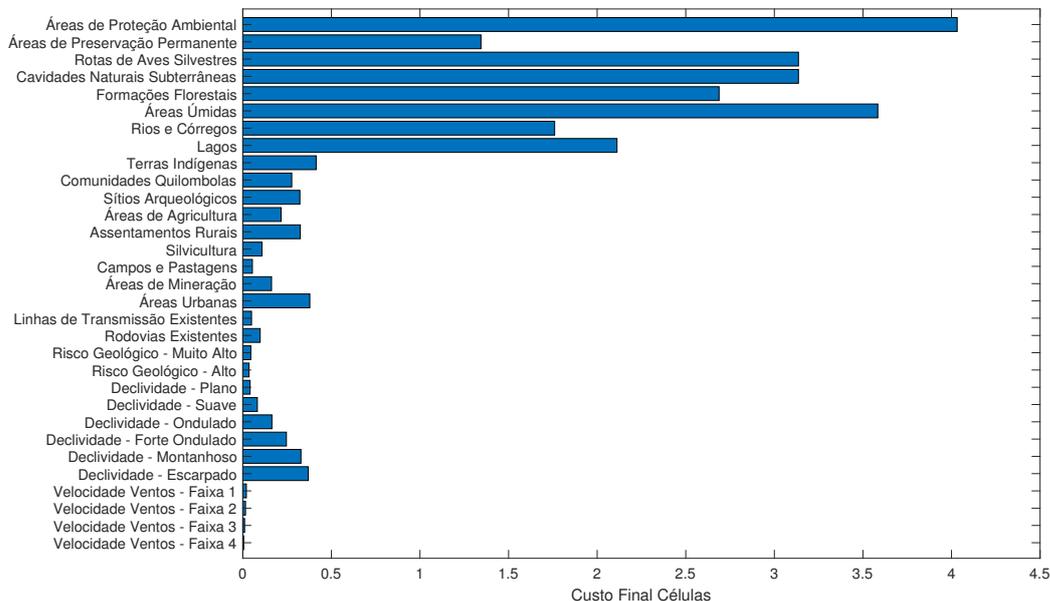
Figura 56 – Custo final dos subcritérios do Cenário 1



Fonte: do autor

A Figura 57 apresenta o custo final associado para cada subcritério no Cenário 2, estes valores foram associados à superfície de custo final deste cenário, a partir da Equação (11), com aplicação dos pesos de critérios e pesos de suas classes.

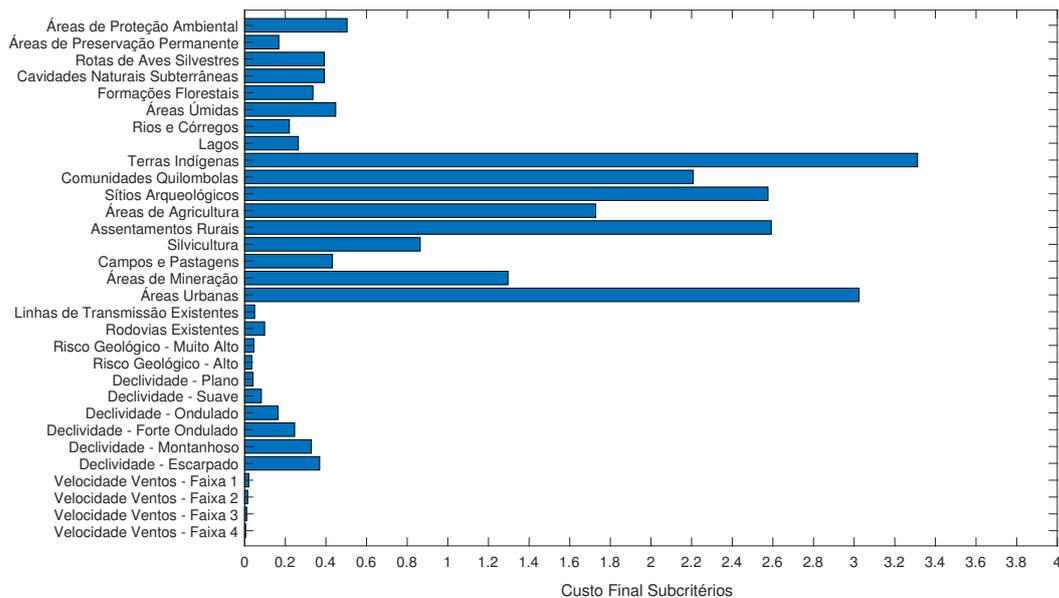
Figura 57 – Custo final dos subcritérios do Cenário 2



Fonte: do autor

A Figura 58 apresenta o custo final associado para cada subcritério no Cenário 3, estes valores foram associados à superfície de custo final deste cenário, a partir da Equação (11), com aplicação dos pesos de critérios e pesos de suas classes.

Figura 58 – Custo final dos subcritérios do Cenário 3

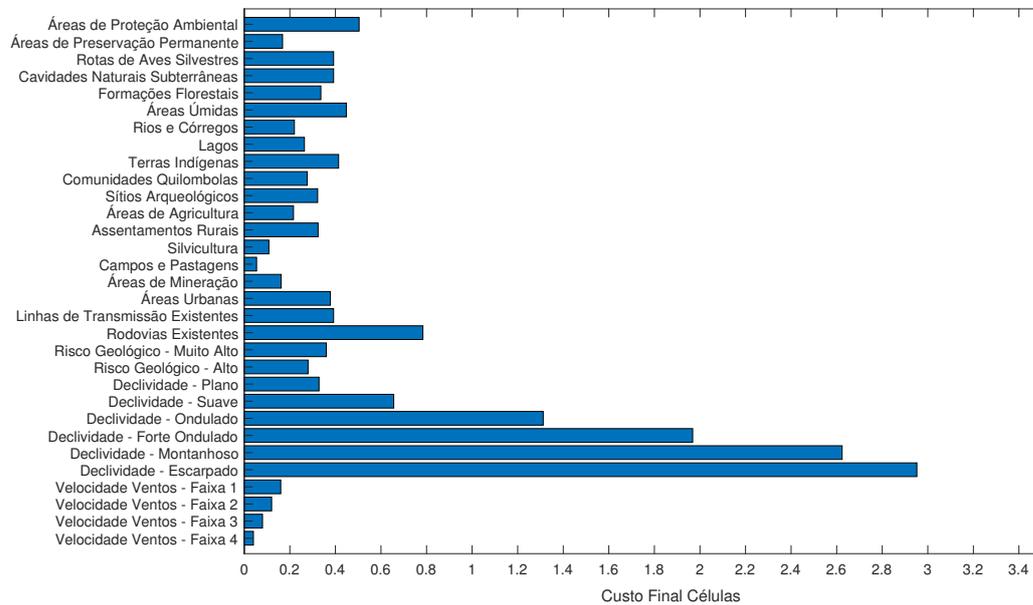


Fonte: do autor

A Figura 59 apresenta o custo final associado para cada subcritério no cenário 4, estes valores foram associados à superfície de custo final deste cenário, a partir da Equação

(11), com aplicação dos pesos de critérios e pesos de suas classes.

Figura 59 – Custo final dos subcritérios do Cenário 4

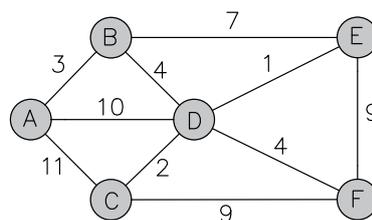


Fonte: do autor

APÊNDICE B EXEMPLO GENÉRICO DO ALGORITMO DE DIJKSTRA

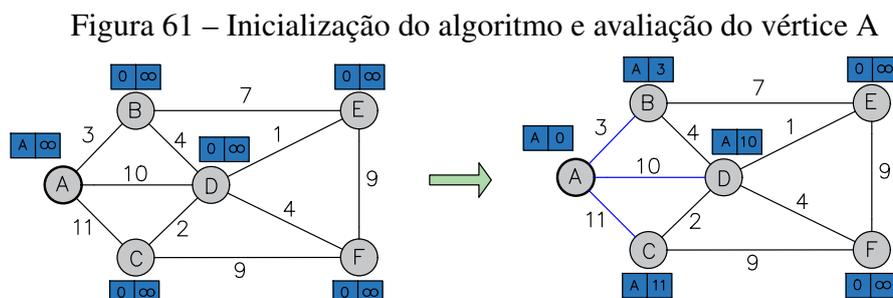
Com o objetivo de ilustrar os principais aspectos do algoritmo de Dijkstra, neste Apêndice está apresentada sua aplicação no grafo da Figura 60, no qual, tomando-se como origem o vértice A, deseja-se conhecer o menor custo acumulado para deslocamento aos demais vértices, considerando os custos das arestas.

Figura 60 – Grafo exemplo



Fonte: do autor

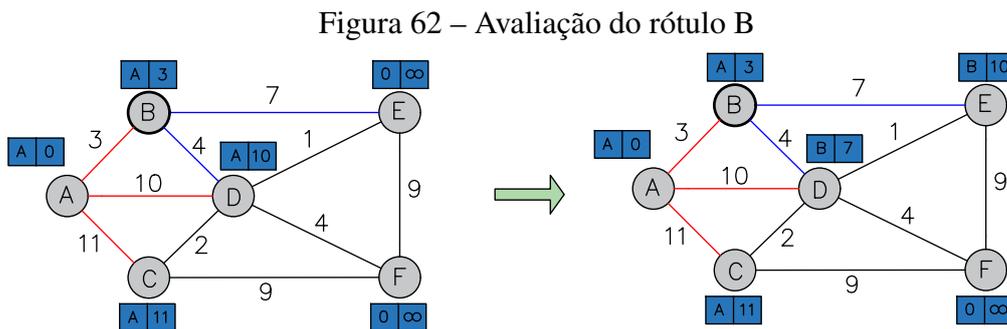
Na Figura 61, é possível observar que todos os vértices w recebem um rótulo, apresentado em azul acima dos vértices, e possuem duas posições, a primeira $rot[w]$, representando o vértice antecessor e a segunda $ct[w]$ representando o custo acumulado até aquele vértice, conforme apresentado no algoritmo da seção 3.4.2.



Fonte: do autor

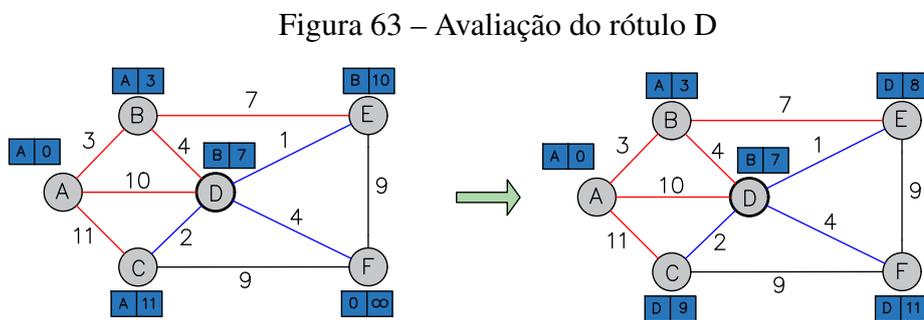
Na etapa de inicialização, os vértices do grafo, com exceção da origem, recebem

na primeira posição do rótulo $rot[w] = 0$ e valor de infinito no custo acumulado, na segunda posição. Conforme pode ser visualizado na Figura 61, a partir do vértice A, as arestas disponíveis para percurso são para os vértices B, D e E, que recebem o custo de deslocamento até as mesmas e o vértice antecessor. Como o algoritmo busca sempre a solução de menor custo, o próximo vértice avaliado é o B, conforme apresentado na Figura 62. Nesta iteração o vértice A passa para a lista de vértices já visitados, assim como B.



Fonte: do autor

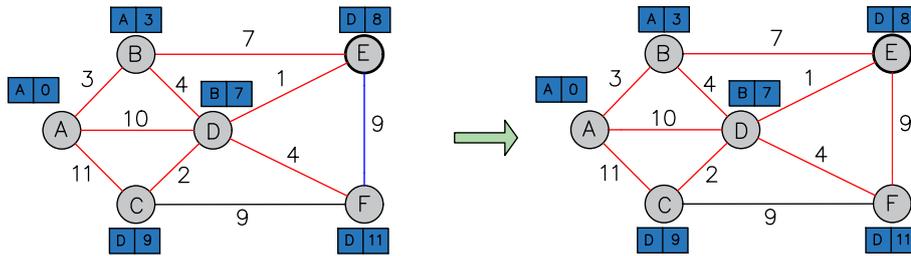
Nesta iteração o vértice D possui seu valor de custo acumulado atualizado uma vez que o caminho A-B-D tem menor custo que o caminho A-D. O vértice E também tem seu valor atualizado, passando de infinito para 10, no entanto, o próximo vértice a ser analisado é o D, por ser o de menor custo acumulado. A Figura 63 apresenta a avaliação do rótulo D, neste caso, a lista de vértices visitados possui A, B e D.



Fonte: do autor

A partir do vértice D, é possível analisar o vértice C, E e F. Nesta iteração, o valor do vértice C é atualizado, pois o caminho A-B-D-C possui menor custo que o caminho A-C. O próximo vértice a ser analisado é o E, por possuir o menor custo acumulado.

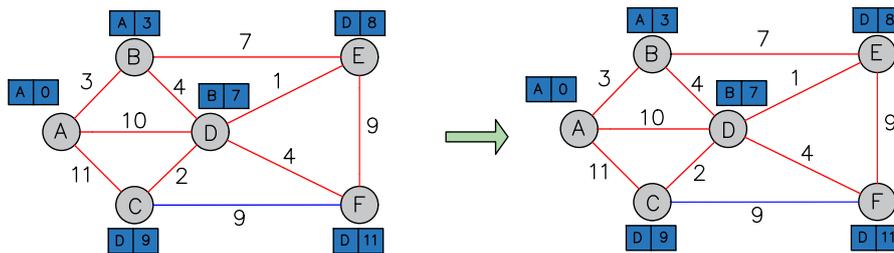
Figura 64 – Avaliação do rótulo E



Fonte: do autor

Nesta iteração a lista de vértices visitados possui A, B, D e E. A partir do vértice E, nenhum caminho representa um valor de custo acumulado menor que os já determinados, nada se altera. Por fim, avalia-se o rótulo F, pois representa o único vértice não avaliado com aresta adjacente ao vértice E.

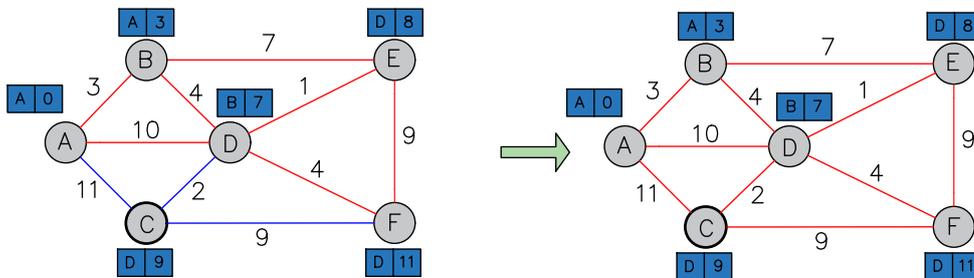
Figura 65 – Avaliação do rótulo F



Fonte: do autor

Pelo fato de não haver nenhuma solução que represente menor custo, nenhum valor é atualizado. Por fim avalia-se o vértice C, conforme Figura 66.

Figura 66 – Avaliação do rótulo C

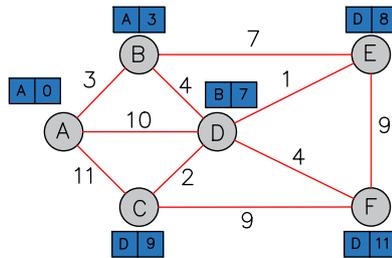


Fonte: do autor

Este vértice também não possui nenhuma solução com menor custo acumulado melhor do que a já rotulada. Desta forma, a partir da avaliação de todos os vértices do grafo, o

rótulo azul apresenta para cada vértice, o menor custo acumulado para se chegar até o mesmo, a partir da origem. Além disso, apresente o vértice antecessor que o precede neste caminho de menor custo. A Figura 67 apresenta este arranjo para o grafo adotado como exemplo.

Figura 67 – Resultado final



Fonte: do autor

A origem, possui zero como custo mínimo, para o vértice B, o custo é 3, para o vértice C é 9, para o vértice D é 7, para o vértice E é 8 e para o vértice F é 11.