



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANDREZZA RAYANNE ALVES DE ALMEIDA**

**DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE CAMINHOS DE SERVIÇO UTILIZANDO O  
ALGORITMO DE LEAST-COST COM AUXÍLIO DO QGIS**

**FORTALEZA**

**2021**

ANDREZZA RAYANNE ALVES DE ALMEIDA

DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE CAMINHOS DE SERVIÇO UTILIZANDO O  
ALGORITMO DE LEAST-COST COM AUXÍLIO DO QGIS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A444d Almeida, Andrezza Rayanne Alves de.

Determinação dos custos de Caminhos de Serviço utilizando o algoritmo de Least-Cost com auxílio do QGIS / Andrezza Rayanne Alves de Almeida. – 2021.  
69 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.

1. Caminhos de Serviço. 2. Algoritmo de Least-Cost Path. 3. Sistema de Informação Geográfica. I. Título.  
CDD 620

---

ANDREZZA RAYANNE ALVES DE ALMEIDA

DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE CAMINHOS DE SERVIÇO UTILIZANDO O  
ALGORITMO DE LEAST-COST COM AUXÍLIO DO QGIS

Monografia apresentada ao Curso de  
Engenharia Civil da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 09/04/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Arielle Elias Arantes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. MSc. Aline Calheiros Espindola  
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior, pela orientação sem igual, pela paciência sem limites e pela crença de que é possível sim. Obrigada por me mostrar que o mundo de infraestrutura de transportes é muito maior do que projetar e construir estradas.

À Profa. Dra. Arielle Elias Arantes, por ter me mostrado o caminho e por não ter desistido. Obrigada também por ter aceitado participar da banca examinadora.

À Profa. MSc. Aline Calheiro Espíndola por ter aceitado participar da banca examinadora. Obrigada também pelas palavras de conforto e suporte.

Aos meus pais, por terem me dado todo o suporte para chegar até aqui. Sem o apoio incondicional deles às minhas decisões eu não teria aprendido a levantar depois das quedas.

A todos os meus familiares que sempre acreditaram em mim, em especial meu tio Raimundo. Em uma vida onde nem todos tem a sorte de ter um pai, eu tive dois que me apoiaram e me ajudaram a crescer.

Às minhas amigas Tayná Mendes, Lucianna Marçal e Flávia Karoline que se mantiveram presentes, apesar do tempo e da distância. Sem vocês, 2017 teria sido muito pior.

Aos meus amigos Edgar Galvão e Altanízio Júnior, por terem me ensinado mais sobre computadores do que eu estava disposta a aprender. Sem o Edgar eu seria menos extrovertida e confiante, sem o Altanízio eu não saberia Concreto.

Aos amigos que cultivei ao longo da graduação, tenham eles seguido em frente, tenham eles fincado raízes. Impossível lembrar dos momentos felizes na UFC e não pensar na Panelinha. Mateus Lira, Gabriel Amorim e Diego Ponte, eu seria uma pessoa melhor e uma pessoa pior sem vocês.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC, que me mostraram que a relação professor e aluno vai muito além da sala de aula e dos laboratórios de pesquisa.

Ao Pedro Guilherme Pinheiro Santos Fernandes por ter me ajudado a entregar esse trabalho.

## RESUMO

Caminhos de serviço são as vias por onde passam os caminhões responsáveis pelo transporte do solo necessário para se executar um projeto de terraplenagem. O planejamento desses caminhos é realizado, em geral, buscando a menor distância entre a origem e o destino do material. A má escolha desses caminhos aumentar o custo final de transporte, além de gerar transtornos ambientais e sociais. Assim, essa pesquisa tem como objetivo comparar os custos de caminhos de serviço gerados por um algoritmo de *Least-Cost Path* com os custos de caminhos de serviço de menor distância. Para isto, foi realizado um estudo de caso da duplicação da rodovia CE-040, localizada na cidade de Caucaia, Ceará, estudo esse feito com o programa QGIS, um *software* gratuito que permite visualizar, editar, criar, analisar e criar mapas utilizando dados georreferenciados, permitindo simular diferentes cenários. Com auxílio do QGIS, foi possível caracterizar o uso do solo numa área de 500 metros no entorno da rodovia. Após definir os locais de corte e aterro, foram identificadas as jazidas que forneceriam material para as áreas de aterro e simulados caminhos de serviço de menor distância por análise convencional e os caminhos utilizando o algoritmo de *Least-Cost Path*, considerando os critérios de declividade do terreno, existência de vias, presença de corpos d'água e possibilidade de desmatamento. Os custos para esses fatores foram definidos com base na literatura, enquanto os pesos foram baseados nas respostas obtidas através de um questionário realizado com 21 profissionais da área de Infraestrutura de Transporte. O custo médio por quilômetro para os caminhos de serviço de menor distância foi de R\$ 8.508,165 enquanto para os caminhos do algoritmo foi de R\$ 518,351. Essa diferença é consequência do custo da compensação ambiental necessária para se realizar o projeto. Porém, nos casos onde os caminhos de serviço de menor distância não passam em áreas protegidas, o custo médio é bem inferior aos custos dos caminhos gerados pelo algoritmo. Conclui-se que, em situações em que não há passagem dos caminhos de serviço por corpos d'água, o caminho de menor distância apresentará o menor custo. Espera-se resultados semelhantes em casos de ultrapassagem de obstáculos físicos.

**Palavras-chave:** Caminhos de Serviço. Algoritmo de *Least-Cost Path*. Sistema de Informação Geográfica.

## ABSTRACT

Haul routes (or services paths) are the roads through which the trucks responsible for transporting the soil necessary to carry out an earthwork project. The planning of these paths is generally done trying to achieve the shortest distance between origin and destination locals of the material. Not choosing an optimal path increases the final cost of transportation, in addition to generating environmental and social upheavals. Thus, this research aims to compare the costs of haul routes generated by a Least-Cost Path algorithm using the costs of the shortest service paths. For this, a case study of duplicating the highway CE-040, located in the city of Caucaia, Ceará was carried out. QGIS, a free software that allows viewing, editing, creating, and analyzing maps through georeferenced data (also allowing the simulation of different scenarios), was also used in the study. With the help of QGIS, it was possible to identify different land uses in an area of 500 meters around the highway. After defining the cut and earth fill locations, the mineral deposits that would provide material for the filled areas were identified, and simulations of service paths were executed (by conventional analysis of shorter service paths, and using the Least-Cost Path algorithm, considering the criteria of slope of the terrain, existence of roads, presence of water bodies, and the possibility of deforestation. The costs for these variables were defined based on the literature, while its ponderation factors were based on the answers of 21 professionals in the area of Transport Infrastructure (obtained through a questionnaire). The average cost per kilometer for service paths with the shortest distance was R\$ 8,508,165 while for the algorithm paths it was R\$ 518,351. This difference is a consequence of the cost of environmental compensation necessary to carry out the project. However, in cases where the service paths with the shortest distance do not cross protected areas, the average cost is much lower than the costs of the paths generated by the algorithm. It is concluded that, in situations where the service paths do not cross bodies of water, the shortest path will have the lowest cost. Similar results are expected in cases of overcoming physical obstacles.

**Palavras-chave:** Haul routes. Least-Cost Path algorithm. Geographic Information System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Exemplo de execução de um grafo do algoritmo de Dijkstra.....	19
Figura 02 - Solução do algoritmo de Dijkstra .....	20
Figura 03 - Ambiente de trabalho do software QGis.....	22
Figura 04 - Complemento Road Graph .....	23
Figura 05 - Escalas e diferenças de pontuações MACBETH de base .....	26
Figura 06 - Modelo de composição disponibilizada pelo SICRO .....	27
Figura 07 - Etapas da pesquisa. ....	28
Figura 08 - Trecho da rodovia do Estudo de Caso .....	29
Figura 09 - Comparação entre fatores utilizando o MACBETH. N1: Proximidade a corpos d'água, N2: Desmatamento e Limpeza da Camada Vegetal, N3: Vias Já Existentes, N4: Rampa e N5: Ruído.....	34
Figura 10 - Comparação entre fatores utilizando o MACBETH. N1: Rampa, N2: Desmatamento e Limpeza de Camada Vegetal, N3: Proximidade de Corpos d'água e N4: Vias Já Existentes. ....	35
Figura 11 – Classificação do uso do solo .....	36
Figura 12 - Classificação e uso do solo. ....	37
Figura 14 - Imagem de Custo gerada no QGIS .....	39
Figura 13 - Localização dos pontos de Aterro e de Empréstimo.....	40
Figura 15 - Relatório Analítico de Composição de Custo para desmatamento, deslocamento, limpeza de área e estocagem do material de limpeza com árvores de diâmetro até 0,15m. ....	43
Figura 16 - Caminhos de serviço com menor distância.....	44
Figura 17 - Caminhos determinados pelo algoritmo de Least-Cost Path.....	47
Figura 18 - Caminhos gerados pelos dois métodos. ....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Categorização dos critérios para escolha do caminho de serviço .....	33
Gráfico 02 - Peso definido pelo MACBETH para cada critério. N1: Proximidade a corpos d'água, N2: Desmatamento e Limpeza da Camada Vegetal, N3: Vias Já Existentes, N4: Rampa e N5: Ruído.....	34
Gráfico 03 - Peso definido pelo MACBETH para cada critério. N1: Rampa, N2: Desmatamento e Limpeza de Camada Vegetal, N3: Proximidade de Corpos d'água e N4: Vias Já Existentes. ....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Custo adotado em diferentes declividades.....	18
Tabela 02 - Execução do algoritmo de Dijkstra .....	19
Tabela 03 - Valor de para o Índice de Consistência Randômico .....	24
Tabela 04 - Escala de comparação de Saaty .....	25
Tabela 05 - Pesos dos subcritérios adotados para a elaboração da Imagem de Custo.....	31
Tabela 06 - Pesos MACBETH para os critérios. ....	31
Tabela 07 - Proporção do uso do solo.....	38
Tabela 08 - Jazidas utilizadas para empréstimo de cada ponto de aterro. ....	40
Tabela 9 - Custo Unitário para transporte de material em vias pavimentadas e não-pavimentadas .....	41
Tabela 10 - Dados para os Caminhos de Serviço de Menor Distância.....	45
Tabela 11 – Custos de Transporte dos Caminhos de Serviço de menor distância. ....	45
Tabela 12 - Dados para os Caminhos de Serviço do algoritmo de Least-Cost Path.....	48
Tabela 13 – Custos de Transporte dos Caminhos de Serviço do algoritmo de Least-Cost Path .....	48
Tabela 12 – Custos totais para os dois métodos. ....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytical Hierarchic Ponderation</i>
APP	Área de Preservação Permanente
DMT	Distância Média de Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
LCP	<i>Least-Cost Path</i>
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SIG	Sistema de Informação Geográfica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1	Justificativa .....	12
1.2	Objetivos.....	13
1.2.1	<i>Objetivos gerais</i> .....	13
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1	Terraplenagem .....	14
2.2	Caminho de serviço.....	15
2.3	Custo dos critérios de escolha dos caminhos de serviço .....	16
2.3.1	<i>Presença de Estradas</i> .....	16
2.3.2	<i>Áreas de Preservação Permanente</i> .....	16
2.3.3	<i>Declividade</i> .....	18
2.4	Algoritmo de Least-Cost Path .....	18
2.4.1	<i>Algoritmos de Least-Cost na literatura</i> .....	20
2.4.2	<i>A utilização de algoritmos de Least-Cost no software QGis</i> .....	21
2.5	Análises Multicriteriais em SIG .....	24
2.6	SICRO.....	26
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
3.1	Estudo de Caso.....	28
3.2	Caminho de Serviço.....	29
3.3	Definição dos pesos .....	29
3.4	Classificação do Uso e Cobertura do Solo .....	30
3.5	Áreas de Preservação Permanente .....	30
3.6	Declividade .....	30
3.7	Imagem de Custo .....	31
3.8	Algoritmo de Least-Cost e estimativas de custo.....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
4.1	Resultados obtidos no questionário aplicado .....	33
4.2	Classificação do Uso e Cobertura do Solo .....	35
4.3	Imagem de Custo .....	38
4.4	Pontos de jazida e aterro .....	40
4.5	Custos SICRO .....	41

<b>4.6</b>	<b>Caminhos de Serviço de Menor Distância.....</b>	<b>43</b>
<b>4.7</b>	<b>Caminhos de Serviço do Algoritmo de Least-Cost Path .....</b>	<b>46</b>
<b>4.8</b>	<b>Comparação entre os métodos.....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>Principais Conclusões.....</b>	<b>53</b>
<b>5.2</b>	<b>Limitações da Pesquisa.....</b>	<b>54</b>
<b>5.3</b>	<b>Recomendações para trabalhos futuros.....</b>	<b>54</b>
	<b>APÊNDICE A – FORMULÁRIO UTILIZADO NA PESQUISA DE CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE CAMINHOS DE SERVIÇO .....</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE B – MAPA DE USO DO SOLO .....</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE C – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ATERRO E EMPRÉSTIMO ....</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE D – IMAGEM DE CUSTO .....</b>	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE E – CAMINHOS DE SERVIÇO DE MENOR DISTÂNCIA .....</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE F – CAMINHOS DE SERVIÇO GERADOS PELO ALGORITMO DE LEAST-COST PATH.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade está em constante desenvolvimento e crescimento fazendo com que, todos os dias, novos projetos de construção sejam iniciados. Obras de infraestrutura para atender a população de locais com altas taxas de natalidade, residências mais modernas para cumprir demandas de comunidades com padrão de vida mais elevado, sempre há diligência por novos empreendimentos.

Uma etapa importante em praticamente todos os tipos de obras é a terraplenagem. Ricardo e Catalani (2007) define terraplenagem ou movimento de terras como “as operações que têm por objetivo remover o excesso de terra de um local e levar para outro que esteja em falta”. O serviço de terraplenagem é composto pelas etapas de limpeza do terreno, escavações, aterro, valas e transporte de material (ABRAM e ROCHA, 2000). Locais onde há necessidade de retirada de solo são denominados de corte e os lugares onde há indispensabilidade de se aumentar a cota é alcunhado de aterro.

O serviço de terraplenagem não é composto apenas pelo aterro do terreno onde será efetuado a construção. É constituído, também, pela preparação do terreno sendo necessário em algumas situações o desmatamento e demolições de estruturas já existentes, pela escavação onde há necessidade de corte, pelo transporte de material proveniente de cortes e pelo transporte de material para áreas onde serão necessários aterros.

Em projetos onde não há necessidade de grandes modificações na cota do terreno, como residências, prédios com poucos pavimentos, praças, estacionamentos, *etc.* é comum que o serviço de terraplenagem seja feito de modo manual, com trabalhadores limpando e escavando o solo. Em obras de grande porte, como a construção de rodovias, é necessária uma grande movimentação de terra para atingir a cota de projeto estabelecida, assim é comum a utilização de maquinário pesado para garantir a execução do serviço em tempo hábil. A utilização desses equipamentos exige um grande investimento inicial, seja adquirindo ou alugando as máquinas, mas garante custos unitários menores.

Diversos países do mundo utilizam o transporte rodoviário como principal meio de transporte humano e de carga tornando o investimento nesse tipo de infraestrutura indispensável. Segundo Lima (2003), as despesas relacionadas a terraplenagem constituem a maior parte do custo total de obras rodoviárias.

O transporte de solo tem grande impacto no custo final do projeto. Por isso, é importante estabelecer estratégias eficientes para movimentar esse material, levando-se em

consideração a utilização do solo de corte em aterros e buscando menores rotas entre a rodovia que está sendo construída e os locais onde estão as jazidas e os bota-foras. O uso de *softwares* para simular diferentes rotas levando em consideração o uso do solo, a declividade do terreno, *etc.* é um poderoso aliado para diminuir os custos do projeto.

## 1.1 Justificativa

De acordo com a Confederação Nacional de Transportes, em 2009 61,1% de toda a carga transportada em solo brasileiro foi movimentada através do sistema rodoviário. As estradas brasileiras não são utilizadas apenas para transporte de cargas, é comum que pessoas utilizem as estradas todos os dias a caminho do trabalho, escola ou lazer.

O Brasil tem um crescente aumento populacional que eleva os deslocamentos de pessoas e cargas. Assim, é necessário ter uma rede viária que atenda a toda essa demanda, seja através da construção de novas vias ou duplicando e melhorando as rodovias já existentes. Atento a isso, procura-se meios de diminuir os custos com essas intervenções, através de aperfeiçoamentos construtivos na criação ou gerenciamento do projeto.

O planejamento de projetos de terraplenagem deve levar em consideração a distância que será necessária para realizar o transporte do solo em excesso, em áreas de corte, ou em aterros, onde há insuficiência de material. De acordo com El-Rayes e Moselhi (2001), planejar a distribuição do solo pode reduzir os custos e aumentar a produtividade, principalmente em projetos repetitivos, como as rodovias. Por isso, é imprescindível analisar os possíveis caminhos de serviço por onde será transportado o solo.

É possível simular diferentes cenários de transporte de material em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Nesse tipo de sistema pode-se estipular a distância percorrida entre diferentes pontos, podendo decidir o caminho utilizado pelos equipamentos reproduzindo estradas já existentes ou até mesmo criando vias. Comprava-se que a utilização desse tipo de programa pode auxiliar na redução do tempo e do custo no planejamento dos caminhos de serviço.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 *Objetivos gerais*

O objetivo geral deste trabalho é gerar caminhos de serviço de menor custo, utilizando-se do algoritmo *Least-Cost* em um ambiente de SIG, tendo por referência o projeto de terraplenagem de duplicação da rodovia CE-040.

### 1.2.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos são:

- a) Identificar e caracterizar a região em estudo;
- b) Estipular o menor caminho com base na distância;
- c) Definir o melhor caminho com base em um algoritmo de *Least-Cost Path*;
- d) Comparar os custos dos caminhos mais curtos com os caminhos gerados pelo algoritmo *Least-Cost Paths*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre terraplenagem, planejamento e critérios de escolha de caminhos de serviço, algoritmo de *least-coast path* e análises multicriteriais utilizando um Sistema de Informação Geográfica.

### 2.1 Terraplenagem

A terraplenagem, ou terraplanagem, é a etapa em que se cava, limpa, aterra e transporta a terra para nivelar o terreno para as futuras construções e instalações externas. Os trabalhos de terraplenagem e escavações são etapas realizadas antes do início da execução de uma obra e são necessários em praticamente todos os tipos de obras (GOMIDE *et al.*, 2018).

A estimativa detalhada do custo de um projeto não é executada desde o início, mas evolui conforme o projeto é elaborado. Entretanto, é essencial que, antes mesmo de se iniciar o projeto, seja realizado um orçamento preliminar estimativo com objetivo de indicar ao construtor se é lucrativo e se há disponibilidade de caixa para efetuar a obra (PRATA, JÚNIOR e BARROSO, 2005).

O custo de um projeto de terraplenagem está relacionado diretamente aos equipamentos utilizados e a escolha dos caminhos de serviço. Os equipamentos utilizados são considerados de grande porte e de custo elevado, logo é essencial verificar as características do terreno e o maquinário adequado para que seja possível atingir a máxima capacidade produtiva. Ainda no processo de planejamento, o responsável deve estar atento às características do solo como coesão, densidade, presença e profundidade de lençóis freáticos, além da disponibilidade de uma equipe para operar essas máquinas, se possível, experiente nesse tipo de serviço (ALBANI, 2006).

Uma avaliação dos custos do projeto permite comparar os custos estimados com os benefícios estimados, ou seja, a rentabilidade do projeto e assim julgar se o projeto merece ser executado. Além disso, permite verificar se possui o orçamento necessário para a execução do projeto e certificar-se de que, ao longo do projeto, há fundos suficientes (LIMMER, 2013). Em geral, conhecer os custos do projeto aumenta as chances do sucesso da obra. Nessa fase, é importante separar custos diretos e custos indiretos. A separação dos custos diretos e indiretos ajuda a calcular os lucros brutos e líquidos (PRATA, JÚNIOR e BARROSO, 2005). Os custos diretos de um projeto incluem:

- a) O custo de material, suprimentos e equipamentos específicos para o projeto;

- b) O salário dos membros da equipe;
- c) Contratos com subcontratados ou consultores, que intervêm no âmbito do projeto.

Os custos indiretos são aqueles que a organização teria que pagar mesmo se o projeto não existisse, mas que são necessários para o bom andamento do projeto. Isso inclui (ALBANI, 2006):

- a) O custo de material de escritório, materiais e equipamentos gerais;
- b) Aluguel de instalações;
- c) Custos operacionais, entre outros.

Inicialmente é preparado um orçamento preliminar estimativo que tem como objetivo estimar a possibilidade de lucro para o construtor. A estimativa detalhada do custo do projeto não será elaborada desde o início, mas irá evoluir com o projeto. No momento da ideia do projeto, a estimativa de custo será muito aproximada. Para obter a validação do projeto, será então necessário definir um orçamento de projeto muito mais detalhado, chamado de orçamento sintético. Durante o projeto, o orçamento também pode ser ajustado conforme necessário. As planilhas de controle de tempo permitirão estimar as despesas salariais para cada projeto (PRATA, JÚNIOR e BARROSO, 2005).

Um elemento de significativa importância nos custos de um projeto de terraplenagem é a escolha dos caminhos de serviço. Os caminhos de serviço são os locais onde os equipamentos utilizados para transporte do material proveniente da escavação deverão passar para realizar o movimento de solo entre o ponto onde está ocorrendo a terraplenagem e as jazidas, espaços onde será retirado o material para aterro, ou bota foras, espaços onde será depositado o solo excedente. Se esses caminhos não forem bem planejados ainda na fase de elaboração do projeto pode-se elevar o custo unitário final do serviço, pois fatores como estado da via, declividade e distância podem aumentar o consumo de combustível e tempo de transporte. (PILGER *et al.*, 2020)

## **2.2 Caminho de serviço**

Segundo Kang e Seo (2013), a maioria dos estudos sobre movimentação de material estão relacionados à escolha da frota que possibilite a maior produtividade com o menor tempo ocioso de maquinário, sendo que o caminho de serviço precisa ser definido anteriormente. Entretanto, o problema nesse tipo de estudo é que a escolha do caminho impacta diretamente na produtividade individual de cada equipamento.

A maior parte dos engenheiros que definem o caminho de serviço levam em consideração somente a menor distância de locomoção entre dois pontos. Gates e Scarpa (1978) sugerem ter em conta na escolha estradas que estejam em locais com topografia mais uniforme e apresentam soluções matemáticas para auxiliar na escolha.

Kang e Seo (2013) sugerem que a escolha desses caminhos deve levar em consideração ainda na fase de projeto a distância que será percorrida pelos caminhões, impactos ambientais, sociais e políticos. Utilizando o conceito de *Least-Cost*, Kang e Seo (2013) desenvolveram um algoritmo que, após a atribuição de pesos e utilização de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) que permita analisar e modificar a geografia local, determina a escolha do melhor caminho baseado no menor custo gerado.

É importante ressaltar que a escolha dos caminhos de serviço não impacta apenas economicamente, há, também, os impactos ambientais e sociais. Ao decidir pela criação de uma nova estrada, o engenheiro responsável pelo planejamento pode acabar causando desmatamento de uma área que, do contrário, permaneceria intacta. A escolha de caminhos próximos a áreas urbanas pode causar poluição sonora e atmosférica para as pessoas próximas.

## **2.3 Custo dos critérios de escolha dos caminhos de serviço**

É necessário estabelecer um custo para cada fator relevante na seleção dos caminhos de serviço. Esse valor pode ser definido através de lei ou pela literatura.

### **2.3.1 Presença de Estradas**

Em estradas pavimentadas espera-se que os equipamentos tenham o máximo de sua produtividade e levem o menor tempo possível para transportar a carga. Estradas não-pavimentadas podem diminuir a velocidade média fazendo com que o tempo de transporte aumente. Além disso, dependendo das condições da estrada, o custo com manutenção e combustível pode aumentar. Em locais onde não existem vias seria necessário a construção provisória de caminhos de serviço para permitir a passagem dos equipamentos elevando, assim, o custo final.

### **2.3.2 Áreas de Preservação Permanente**

Em 2012 foi criada a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 que ficou conhecida como Novo Código Florestal Brasileiro e estabelece as Áreas de Preservação Permanente (APP).

Segundo o Serviço Florestal Brasileiro (2019), as APPs são as áreas “cobertas ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas”.

Assim, áreas no entorno de cursos de água, reservatórios naturais e artificiais de água, encostas, restingas, manguezais, bordas de tabuleiro, chapadas, topo de morros, montes, serras e montanhas, áreas com altitude superior a 1.800 metros e em veredas são protegidas não sendo permitida a intervenção humana.

Entretanto, em casos em que a ação é de interesse social, utilidade pública ou baixo impacto ambiental é permitido a alteração desde que tenha autorização da CONAMA e que haja recomposição vegetal. O artigo 38º da Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 (Brasil, 1998), Lei de Crimes Ambientais, estabelece multa de R\$ 5.000,00 a R\$ 50.000,00 por hectare ou fração de área desmatada em âmbito administrativo.

Além disso, a Lei nº 9.9985, de 18 de julho de 2000, impõe ao responsável pela obra a implantação de unidades de conservação quando este é impossibilitado de não adentrar em áreas protegidas. O artigo 36 da Lei define que o empreendedor deve destinar, no mínimo, um valor equivalente a 0,5% do custo total previsto para implantação do empreendimento, podendo esse percentual ser maior em casos de elevado grau de impacto ambiental. Um estudo realizado por Pedrozo (2001) definiu o custo R\$ 393.737,27 para cada quilômetro de rodovia construída. Logo, para cada quilômetro de rodovia deve-se considerar um custo adicional R\$ 1.968,69 para a compensação ambiental.

Para este trabalho foi desconsiderada autorização da CONAMA e considerado uma multa de RS 5.000,00 por hectare para o desmatamento da vegetação de áreas protegidas, sendo estas somente as áreas de vegetação no entorno de rios e lagos. Por ser uma região bem plana, não foram localizadas chapadas, encostas e morros. A vegetação local é caracterizada por vegetação Savana Estépica e Savana Estépica Arborizada, assim não há presença de áreas de proteção para restingas e manguezais.

Para se definir as áreas de APP da região foram estabelecidos “*buffers*” ou faixas marginais de 30 metros no entorno de rios de para cursos d’água de menos de 10 metros de largura e *buffers* de 50 metros para cursos d’água com largura entre 10 e 50 metros. Além disso, foi definido um *buffer* de 50 metros para áreas ao redor de lagoas com até 20 hectares e para lagoas com área superior a 20 hectares, um *buffer* de 100 metros. O peso adotado nessas áreas foi de 10.000, com objetivo de evitar a passagem de caminhos de serviço nestas áreas e um peso de 0 para locais fora das áreas protegidas.

### 2.3.3 Declividade

A declividade do terreno pode alterar a produtividade dos caminhões basculantes e aumentar, assim, o custo com combustível além de elevar o tempo de serviço. Kang e Seo (2013) estabeleceram custos para diferentes declividades (Tabela 01). Para esse trabalho foi considerado custo 0 para todas as vias, pois a região possui pouca declividade (inferior a 3%).

Tabela 01 - Custo adotado em diferentes declividades.

Declividade (%)	Valor Linguístico	Custo
Menor que -20	Extremamente Resistente	1,00
-10	Muito Resistente	0,50
-5	Pouco Resistente	0,25
-3 a 3	Normal	0,00
5	Pouco Resistente	0,25
10	Muito Resistente	0,50
Maior que 20	Extremamente Resistente	1,00

Fonte: Adaptado de Kang e Seo (2013).

## 2.4 Algoritmo de Least-Cost Path

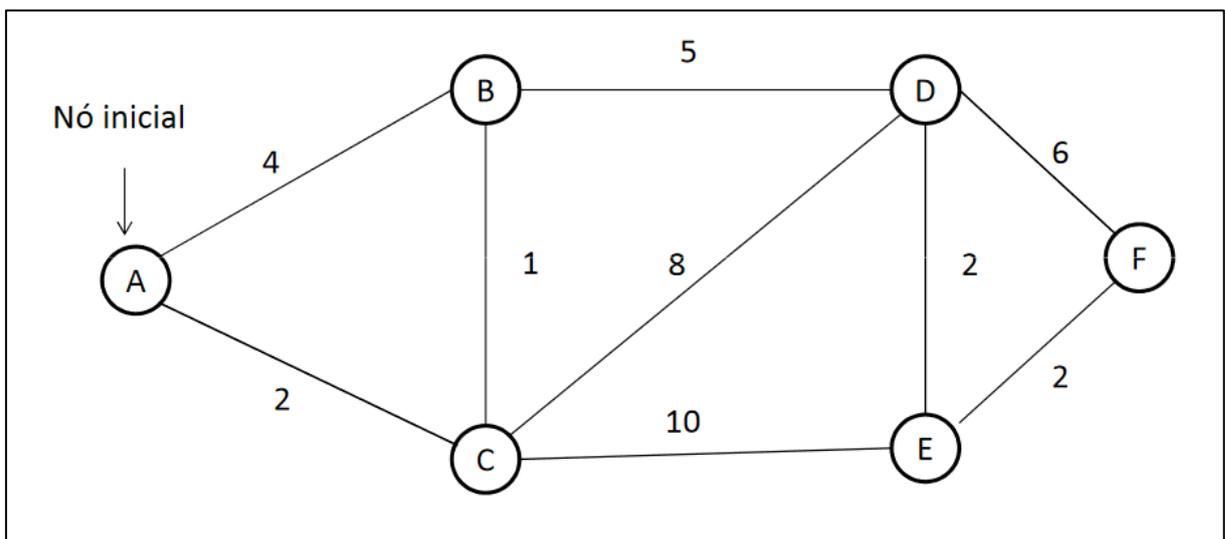
O pioneiro Algoritmo de Dijkstra, desenvolvido em 1959 pelo cientista da computação Edsger Dijkstra, foi utilizado em diversas ocasiões e aprimorado ao longo dos anos. O algoritmo de Dijkstra, segundo Rabuske (1992) tem a seguinte definição:

Seja um grafo  $G(V, E)$  e uma função distância  $L$  que associe cada aresta  $(v, w)$  a um número real negativo  $L(v, w)$  e também um vértice fixo  $v_0$  em  $V$ , chamado fonte. O problema consiste em se determinar os caminhos de  $v_0$  para cada vértice  $v$  de  $G$ , de tal forma que a somatória das distâncias das arestas envolvidas em cada caminho seja mínima. Isto é equivalente a determinar um caminho  $v_0, v_1, \dots, v_k$  tal que a somatória das distâncias das arestas envolvidas em cada caminho seja mínimo.

Nesse algoritmo de *Least-Cost*, os pontos de origem e destino são chamados de nós,

podendo existir infinitos nós entre a origem e o último destino, sendo que o menor custo pode ser menor a distância, o menor tempo ou, ainda, o menor custo de construção. Para decidir a distância com menor custo, o algoritmo analisa os nós vizinhos para decidir qual terá menor valor, tendo cuidado de descartar os nós já visitados. Após isso, o nó com menor custo será o nó atual, no qual o algoritmo irá analisar os nós vizinhos. O processo é repetido até percorrer todo o caminho e, em casos em que o nó objetivo não é alcançado, o processo é reiniciado sendo descartado o caminho “sem saída”.

Figura 01 - Exemplo de execução de um grafo do algoritmo de Dijkstra



Fonte: Universidade Federal do Maranhão (2016)

Tabela 02 - Execução do algoritmo de Dijkstra

Vértice	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4	Passo 5	Passo 6
A	0, A	*	*	*	*	*
B	4, A	3, C	3, C	*	*	*
C	2, A	2, A	*	*	*	*
D	∞	10, C	8, B	8, B	*	*
E	∞	12, C	12, C	10, D	10, D	*
F	∞	∞	∞	14, D	12, E	12, E

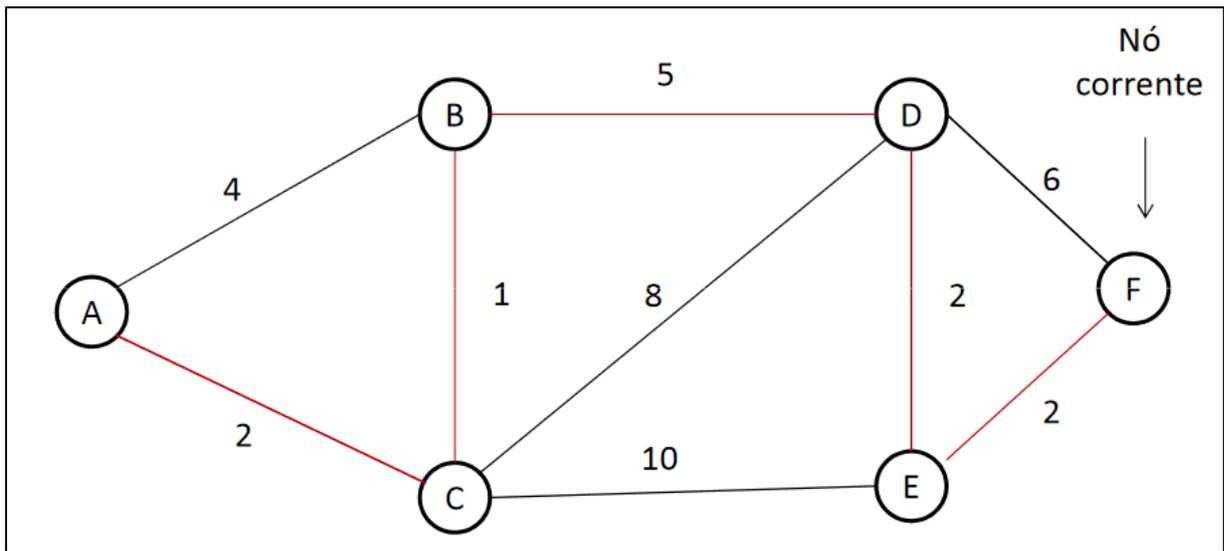
Fonte: Universidade Federal do Maranhão (2016)

Na Tabela 02 é possível observar, no passo 1, o valor da distância inicial entre o vértice A e os vértices vizinhos B e C (4 e 2, respectivamente), enquanto as distância pros outros nós

seria infinita. Nos passos seguintes, o nó A não será mais considerado, pois ele já foi visitado. No passo 2, é analisada a distância entre o vértice C em relação aos nós C, D e E. A distância (A,B) passando por C é 3, A e D passando por C é 10 e A e E passando por C é 12.

No passo seguinte, é analisada a distância entre A e D e entre A e E. O caminho de menor custo é A e D, passando por C e B e vale 8. O processo é repetido até chegar ao vértice F, tendo sido seguido o caminho  $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$  (Figura 02).

Figura 02 - Solução do algoritmo de Dijkstra



Fonte: Universidade Federal do Maranhão (2016)

#### 2.4.1 Algoritmos de Least-Cost na literatura

Kang e Lee (2017) utilizaram um algoritmo de *Least-Cost Path* (LCP) para simular a escolha do melhor caminho para a passagem de oleodutos. Muitos fatores são levados em consideração na escolha de uma rota para oleodutos como meio ambiente, espaço físico, questões políticas, técnicas, econômicas e a presença de obstáculos. O resultado obtido minimizou os erros humanos e foi atingido de maneira muito mais rápida do que o modo manual.

Chen *et al.* (2013) utilizaram o algoritmo de Dijkstra para determinar as melhores rotas para veículos de emergência. Muitos acidentes são imprevisíveis e, em algumas situações, é necessária a mobilização de veículos de resgate ou evacuação em casos como terremotos e tsunamis. Nesses cenários o ideal é que esses veículos se desloquem o mais rápido possível visando diminuir o número de vítimas. O estudo foi realizado com três casos de estudo onde foi necessária a evacuação de um grande volume de pessoas, tendo foco na malha viária disponível para utilização e a velocidade que pode ser atingida pelos veículos de emergência

em horários de pico no trânsito. O resultado foi um método onde é possível prever o caminho ideal a ser utilizado em uma emergência.

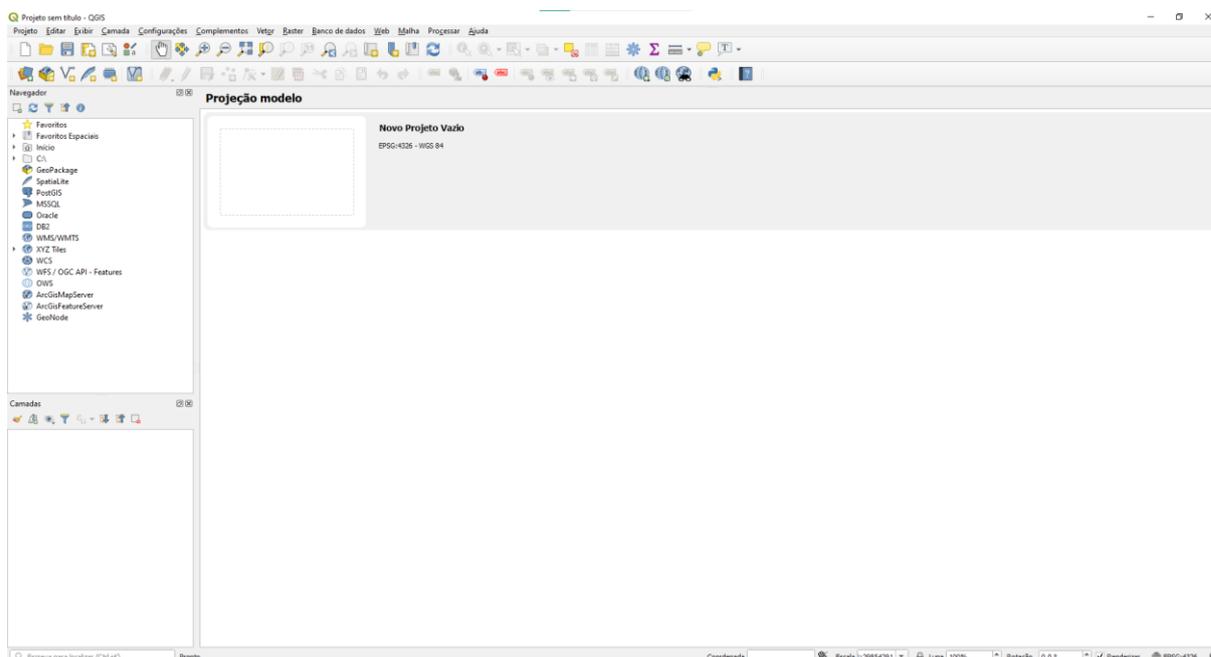
Algoritmos de menor custo não são utilizados apenas para estudos acadêmicos e profissionais. Alguns jogos de simulação como *Cities: Skylines* utilizam o algoritmo para simular o tráfego gerado pelos veículos. Martinez (2020) cita a utilização do LCP em jogos de exploração estilo *Real Time Strategy* visando a diminuição do custo gerado ao jogador na escolha de caminho que será utilizado.

#### **2.4.2 A utilização de algoritmos de Least-Cost no software QGIS**

O *software* Quantum Geographic Information System (QGIS), inicialmente chamado de *Quantum GIS*, foi desenvolvido no início do ano de 2002. Originalmente concebido por Gary Sherman, mais tarde se tornou o projeto. As principais funções do *software* incluem: interpolação de dados, desenhar mapas de elevação, gerar curvas de nível e criar contornos de terreno que pode ser visto na tela (WING e BETTINGER, 2003).

Até a década de 1970, a árdua tarefa de analisar dados representados por gráficos desenhados à mão era comum no dia a dia de milhares de pesquisadores. O interesse era agregar e armazenar várias informações e relatórios relacionados ao posicionamento geográfico para alcançar uma melhor integração e melhor acompanhamento do desenvolvimento de projetos de engenharia (PEJOVIĆ et al., 2014).

Devido à atualização contínua de dados e desenhos, o processamento de dados se transformou em algo complicado, o que torna esse trabalho difícil e, em última análise, dispendioso. Na segunda metade do século XX, houve grandes avanços no campo da computação e dos sistemas de informação, que promoveram a expressão de elementos geográficos no ambiente computacional, criando assim a expressão de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ou Geografia de Sistema de Informação (GIS) (LEE e BEDNARZ, 2009).

Figura 03 - Ambiente de trabalho do *software* QGIS

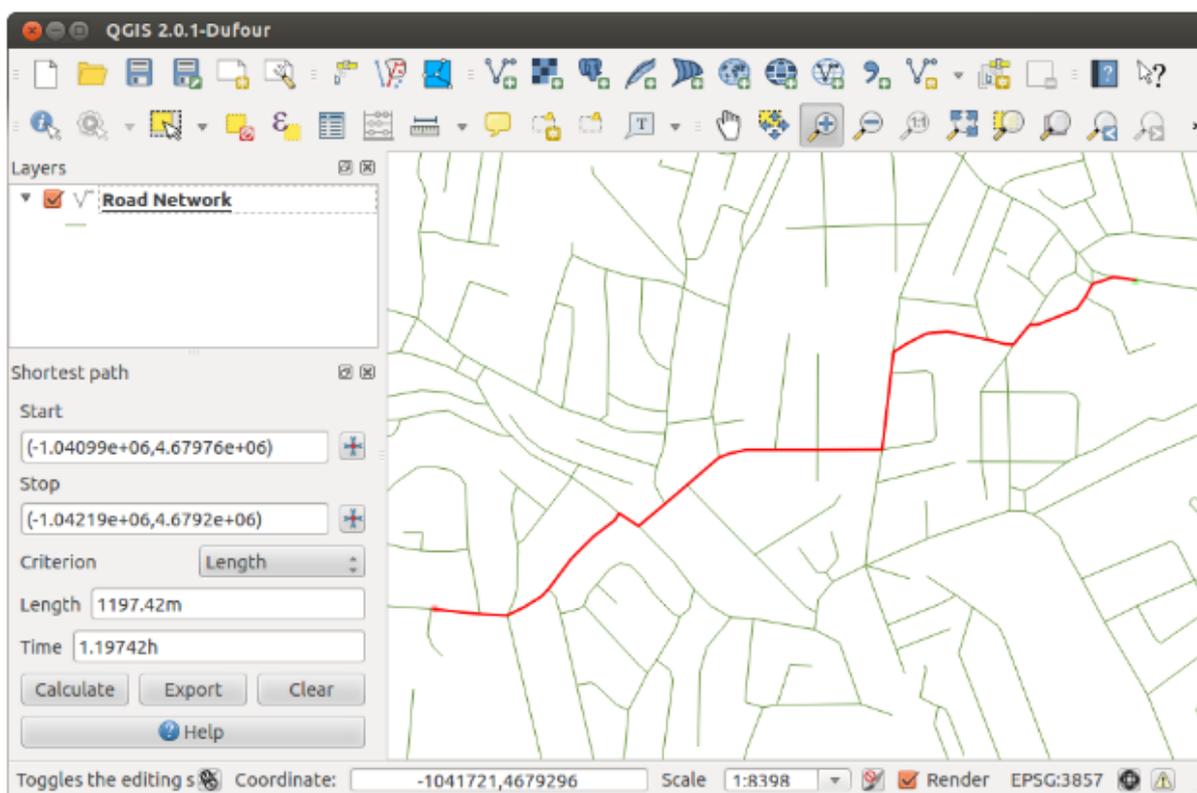
Fonte: A autora.

Não há custo de instalação desse *software* no computador. Além disso, QGIS é um *software* distribuído sob a chamada licença de "código aberto". Isso significa que o código-fonte está aberto, portanto disponível para melhorias e criação de extensões ou aplicativos. (TOMLINSON, 2013).

O termo "*software* GIS" se tornou comum para se referir a *softwares* como o QGIS. Também é possível gerenciar os dados através dele, incluindo, tudo o que é espacial, geográfico, georreferenciado e o que não possui coordenadas geográficas. O QGIS então permite que se visualize os dados na forma de "mapas" interativos e / ou planilhas de dados para dados sem coordenadas e para atributos anexados a entidades geográficas (FRIEDRICH, 2014).

Graças ao QGIS, também é possível modificar os dados, pode-se alterar as geometrias, modificar os sistemas de projeção dos dados ou salvá-los em outro formato. Originalmente, o QGIS visava ler dados contidos em bancos de dados PostgreSQL / PostGIS. Ao longo dos vários desenvolvimentos e melhorias de *software*, QGIS tornou-se capaz de ler e editar dados vetoriais e raster de diferentes formatos ou dados de planilhas (WING e BETTINGER, 2003).

Figura 04 - Complemento Road Graph



Fonte: Documentação do QGis (2021)

Em um sistema SIG os vértices do algoritmo de Dijkstra são as coordenadas que são conectadas pelas polilinhas que, por sua vez, representam as vias ou linhas de transporte tendo seus comprimentos associados a pesos que representam a velocidade atingida por veículos. (BONETT *et al*, 2017) Em redes que possuem muitos vértices, as arestas entre os nós podem assumir diversas possibilidades, como tempo e distância, sendo imprescindível ter valores razoáveis para todos os cenários. Para que isso ocorra, o caminho escolhido, deve ser o mais curto entre os alternativos.

Um exemplo de complemento que calcula a menor distância no QGis é o *Road Graph*. Programado em C++, esse *plugin* permite determinar o caminho de menor custo levando em consideração o tempo ou comprimento do percurso. É possível utilizar os atributos de velocidade dos veículos e a direção que é permitido transitar nas vias tornando as informações na simulação próximas à realidade.

## 2.5 Análises Multicriteriais em SIG

Em um processo de decisão é importante analisar os fatores ambientais, políticos, técnicos e econômicos envolvidos, ponderando sempre quais irão causar maior e menor impacto. O *Analytical Hierarchic Ponderation* (AHP) é uma das técnicas que permite analisar uma decisão distribuindo peso para cada dado envolvido.

Desenvolvido por Saaty em 1980, o AHP compara dois critérios entre si, buscando criar uma hierarquia. Por envolver julgamento humano, essa técnica pode apresentar inconsistências apesar do ser humano buscar que as relações entre os fatores sejam coerentes. Por isso, Saaty estabeleceu a Razão da Consistência dos julgamentos (RC), Índice de Consistência Randômico (IR) e o Índice de Consistência (IC) (TREVIZANO e FREITAS, 2005).

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

Onde  $\lambda_{\text{máx}}$  é maior autovalor da matriz de julgamentos e  $n$  no tamanho da matriz. Saaty (1980) estabeleceu uma escala de comparação para analisar a relação entre pares com sua técnica AHP.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

Onde IR equivale ao valor gerado aleatoriamente e que depende da ordem da matriz.

Tabela 03 - Valor de para o Índice de Consistência Randômico

Ordem da matriz	IR
1	0,00
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51
12	1,48

13	1,56
14	1,57
15	1,59

Fonte: Adaptado de Kang e Seo (2013).

Tabela 04 - Escala de comparação de Saaty

Nível de Comparação	Definição
1	Igual importância
3	Pouca importância de um sobre outro
5	Importância essencial
7	Importância muito essencial
9	Importância absoluta
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes

Fonte: Adaptado de Kang e Seo (2013)

Para que a comparação seja considerada coerente, a Razão da Consistência deve ser inferior ou igual a 10%, caso contrário, a informação obtida para realizar a comparação deve ser revista.

Considerando que a maior parte destes dados é intrinsecamente de natureza espacial, os Sistemas de Informação Geográfica se apresentam como ferramentas para fornecer um quadro que integre a informação de forma consistente e permita a comunicação de cenários de vulnerabilidade para apoiar o pesquisador ou analista na determinação da vulnerabilidade a ocupações antrópicas. (SCHMIDT E BARBOSA, 2016)

Schmidt e Barbora (2016) dizem que a combinação de técnicas de ponderação, isto é, a atribuição de pesos para diferentes dados com Sistemas de Informação Geográfico permite que o pesquisador envolvido no estudo tenha uma visão mais ampla do problema, observando quais pontos terão maior influência na escolha do caminho de menor custo.

Outro método de apoio à decisão é o MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique*). O MACBETH difere dos outros métodos de análise

multicriterial por avaliar qualitativamente os dados. Por exemplo, entre duas opções em análise, essa técnica irá definir o nível de diferença entre as duas como muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte ou extrema. (COSTA *et al.*, 2013)

Figura 05 - Escalas e diferenças de pontuações MACBETH de base

	op 1	op 2	op 3	op 4	op 5	MACBETH de base
op 1	nula 0	fraca 3	moderada 5	forte 9	mt. forte 10	10
op 2		nula 0	mt. fraca 2	forte 6	forte 7	7
op 3			nula 0	moderada 4	moderada 5	5
op 4				nula 0	mt. fraca 1	1
op 5					nula 0	0

0 nula	0 0
1 mt. fraca	1.00 2.00
2 fraca	3.00 3.00
3 moderada	4.00 5.00
4 forte	6.00 9.00
5 mt. forte	10.00 10.00

Fonte: Costa *et al.*(2013)

## 2.6 SICRO

É importante para os órgãos governamentais a existência de um banco de dados para orientar quanto ao custo de um projeto em processos licitatórios. Tem-se como exemplos o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) produzido pelo IBGE e pela Caixa Econômica Federal e a Tabela de Custos desenvolvida pela Secretaria de Infraestrutura do Ceará. Para atividades relacionadas a serviços de infraestrutura de transporte, o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte) disponibiliza o SICRO (Sistema de Custos Referencias de Obras). Participam da criação do SICRO diversas entidades como órgãos de controles, representantes de classe, universidades *etc.* (DNIT, 2017).

Hoje o DNIT disponibiliza através do SICRO as composições referências de cada serviço contendo informações como o índice de utilização e quantidade de equipamentos utilizados, mão de obra e material indispensáveis para atingir a produção estabelecida. Além disso, dispõe dos custos dos diferentes insumos, custo dos serviços e fatores de influência por chuva e transporte para cada estado brasileiro.

Figura 06 - Modelo de composição disponibilizada pelo SICRO

CGCIT		DNIT					
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO							
Custo Unitário de Referência		Ceará					
0308310 Aparelho de apoio metálico elastomérico fixo com capacidade de 4.000 kN - fornecimento e instalação		Julho/2020					
		Produção da equipe 1,60000 un					
		Valores em reais (R\$)					
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total	
E9050	Guindaste sobre rodas com capacidade de 370 kN.m - 75 kW	1,00000	Operativa 0,39	Improdutiva 0,61	153,5181	79,8957	108,6084
					Custo horário total de equipamentos		108,6084
<b>B - MÃO DE OBRA</b>	Quantidade	Unidade			Custo Horário	Custo Horário Total	
P9801	Ajudante	4,00000	h		17,2092	68,8368	
P9830	Montador	1,00000	h		25,3033	25,3033	
					Custo horário total de mão de obra		94,1401
					Custo horário total de execução		202,7485
					Custo unitário de execução		126,7178
					Custo do FIT		-
					Custo do FIT		-
<b>C - MATERIAL</b>	Quantidade	Unidade			Preço Unitário	Custo Unitário	
M2760	Aparelho de apoio metálico elastomérico fixo com 4 chumbadores e capacidade de 4.000 kN	1,00000	un		39.390,8567	39.390,8567	
					Custo unitário total de material		39.390,8567
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>	Quantidade	Unidade			Custo Unitário	Custo Unitário	
T108050	Microconcreto para reparos e grauteamento – confecção em misturador e lançamento manual	0,03152	m²		2.611,5000	82,3145	
					Custo total de atividades auxiliares		82,3145
					Subtotal		39.569,8890
<b>E - TEMPO FIXO</b>	Código	Quantidade	Unidade			Custo Unitário	Custo Unitário
M2760	Aparelho de apoio metálico elastomérico fixo com 4 chumbadores e capacidade de 4.000 kN - Guindauto 20 Tm	5015373	0,09200	t		11,4600	1,0543
					Custo unitário total de tempo fixo		1,0543
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>	Quantidade	Unidade			DMT		Custo Unitário
M2760	Aparelho de apoio metálico elastomérico fixo com 4 chumbadores e capacidade de 4.000 kN - Guindauto 20 Tm	0,09200	tkm		LN 5914564	RP 5914569	P 5914614
					Custo unitário total de transporte		39.570,94
					Custo unitário direto total		39.570,94

Obs:

Fonte: DNIT (2017)

"As composições de custos consistem na modelagem da execução de determinado serviço objetivando identificar as principais informações do processo para sua precificação." (DNIT VOLUME 01) A concepção de uma composição de custo precisa ser executada com domínio técnico do serviço executado pois é fundamental entender a execução, material utilizado, consumo desse material, mão de obra envolvida, equipamentos utilizados, ciclo dos equipamentos, tempo produtivo e improdutivo, capacidade de produção de cada insumo envolvido no processo e se há necessidade de serviços preliminares.

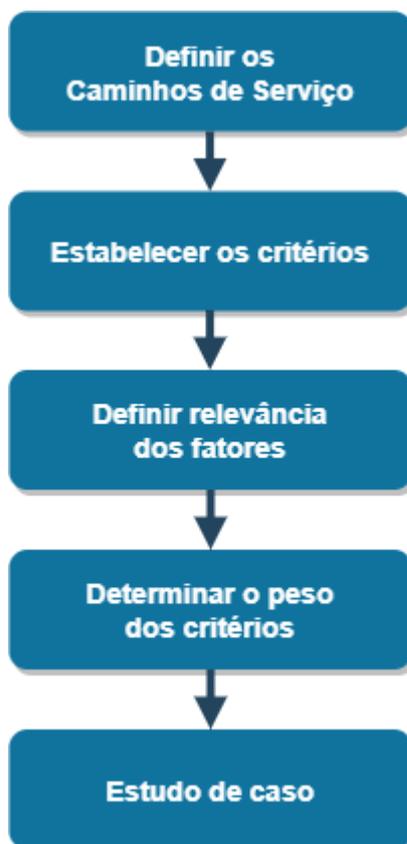
Há dois tipos de composição: principal e auxiliar. De acordo com o DNIT (VOLUME 01), as composições principais são aquelas que contemplam os serviços fundamentais e estão aptos a serem medidos e pagos como, por exemplo, a construção de alvenaria de elevação. As composições auxiliares abrangem os serviços para produção de insumos ou partes da atividade, como, por exemplo, a produção de argamassa para assentamento. A taxa de BDI (Bonificação e Despesas Indiretas) só deve ser aplicada na composição principal.

Uma composição pode ser horária, unitária ou ambas. No SICRO as composições são, em sua maioria, em formato misto pois é possível compreender corretamente a utilização de cada insumo no serviço. Para determinar a produção do serviço o SICRO adota a produção do equipamento líder, ou seja, o equipamento que não para de funcionar ou que possui o maior valor.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A etapa da pesquisa envolve enumerar as fases necessárias e relevantes para atingir os objetivos propostos neste trabalho. A Figura 07 detalha as etapas necessárias para se realizar essa pesquisa.

Figura 07 - Etapas da pesquisa.



Fonte: A Autora

#### 3.1 Estudo de Caso

Para este trabalho foi avaliada, tendo como base um pré-projeto, a duplicação do lado direito de um trecho da rodovia CE-040 de quase 22 quilômetros de uma rodovia localizada na cidade de Caucaia, região metropolitana de Fortaleza, capital do Ceará.

Figura 08 - Trecho da rodovia do Estudo de Caso



Fonte: A Autora

### 3.2 Caminho de Serviço

Primeiramente, é necessário definir quais serão os locais utilizados para empréstimo e bota-fora de material. A partir disso, são traçados diversos caminhos entre esses locais e a rodovia, determinando diferentes pontos de acesso com distância de 100 metros entre eles. A partir disso, é possível definir o início e o fim de cada caminho de serviço.

É necessário utilizar o algoritmo de *Least-Cost* no QGIS com objetivo de descobrir o caminho de menor custo. Entretanto, nesse trabalho, o custo não dependerá apenas da menor distância ou do menor tempo, mas também de outros fatores como presença de estradas, existência de Áreas de Preservação Permanente e declividade.

### 3.3 Definição dos pesos

Para definir os pesos para cada fator, foi realizada uma pesquisa com profissionais da área de infraestrutura de pavimentos para constatar quais critérios estes julgam mais relevantes na etapa de planejamento dos caminhos de serviço. Os critérios que foram avaliados

são: vias já existentes, declividade do terreno, proximidade de corpos d'água, ruído e desmatamento e limpeza de camada vegetal. O questionário aplicado pode ser encontrado no Apêndice A. Após compilação das respostas obtidas, deve-se utilizar o MACBETH para determinar o peso e a consistência dos resultados.

### **3.4 Classificação do Uso e Cobertura do Solo**

O *software* QGis é importante nessa etapa para definir qual o uso do solo em torno da rodovia. Após estipulada uma faixa de 500 metros em cada lado da rodovia e, de modo manual utilizando imagens extraídas de imagens de satélite disponibilizadas pelo Google, o terreno foi classificado em Área Residencial, Áreas Urbanas, Solo Exposto, Vegetação, Corpo d'Água, Áreas Agrícolas e Áreas de Pastagem. As classes de uso e cobertura do solo foram utilizadas para definição das áreas de APP, presença e tipo de estrada e as áreas de vegetação natural.

### **3.5 Áreas de Preservação Permanente**

Para este trabalho foi desconsiderada autorização da CONAMA e considerado uma multa de RS 5.000,00 por hectare para o desmatamento da vegetação de áreas protegidas, sendo estas somente as áreas de vegetação no entorno de rios e lagos. Por ser uma região bem plana, não foram localizadas chapadas, encostas e morros. A vegetação local é caracterizada por vegetação Savana Estépica e Savana Estépica Arborizada, assim não há presença de áreas de proteção para restingas e manguezais.

### **3.6 Declividade**

Para esse trabalho foi considerado custo 0 em todas as vias para o critério de rampas, pois a região possui pouca declividade (inferior a 3%).

No caso da declividade, utilizou-se os pontos de altitude obtidos do projeto geométrico da rodovia, sendo inseridos os pontos no QGIS para a realização da interpolação e uma resolução espacial das imagens de 1 metro (tamanho do pixel no terreno  $1 \text{ m}^2$ ). Posteriormente, atribui-se os pesos dos subcritérios, conforme a Tabela 05. Todos os critérios foram convertidos em dados matriciais com resolução espacial de  $1 \text{ m}^2$ . Posteriormente, utilizando a calculadora raster do QGis e os pesos dos critérios obtidos do questionário Macbeth (Tabela 06), calculou-se a média ponderada entre os fatores, determinando, assim, a Imagem

de Custo.

### 3.7 Imagem de Custo

Para os critérios de proximidade de cursos d'água (APP), vias pré-existentes, desmatamento e declividade, foram definidos os pesos para cada critério, conforme a Tabela 04. Todos os critérios foram convertidos em dados matriciais com resolução espacial de 1 m<sup>2</sup>. Posteriormente, utilizando a calculadora raster do QGis e os pesos dos critérios obtidos do questionário Macbeth (Tabela 06), calculou-se a média ponderada entre os fatores, determinando, assim, a Imagem de Custo.

Tabela 05 - Pesos dos subcritérios adotados para a elaboração da Imagem de Custo.

Critério	Subcritérios	Pesos
Declividade ou rampa	< 3%	0
Vias pré-existentes	Pavimentada	0
	Não-Pavimentada	0,5
	Sem estradas	1
Proximidade de cursos d'água	APP	10.000
	Sem APP	0
Desmatamento	Vegetação Nativa	1
	Demais Áreas	0

Fonte: A Autora

Tabela 06 - Pesos MACBETH para os critérios.

Critério	Pesos MACBETH
Declividade ou rampa	0,3333
Vias pré-existentes	0,375
Proximidade de cursos d'água	0,25
Desmatamento	0,0417

Fonte: A Autora

### 3.8 Algoritmo de Least-Cost e estimativas de custo

Após gerar a Imagem de Custo, foram definidos os pontos de origem (empréstimos e jazidas) e pontos de destino (localização dos aterros na rodovia), conforme o projeto de terraplenagem da rodovia CE-040. Logo em seguida foram definidos os trechos de aterro e corte, segundo as informações presentes no mesmo projeto. Utilizando os pontos de origem e destino e a imagem de custo rodou-se o algoritmo *Least-Cost*, obtendo um caminho de serviço para cada ponto de empréstimo e jazida.

Após definir os trechos de aterro e a quantidade de solo movimentado, foi definida a jazida por onde seria transportado o material. Além disso, para definir os caminhos de serviço foram estabelecidos pontos médios em cada um desses trechos. Foi considerada a construção de 1 faixa de 6 metros de largura, 3 metros para cada sentido da via, para os caminhos de serviço.

Para determinar o custo da execução do caminho de serviço de menor distância foi considerada a distância entre a jazida e a rodovia como caminho de serviço não pavimentado e a distância entre o esse ponto da rodovia e o ponto de aterro como pavimentado. Foi também considerada uma velocidade média de 50 km/h para os caminhões basculantes.

É importante ressaltar que os custos de adentrar as Áreas de Preservação Permanente foram considerados apenas de maneira acadêmica para que seja possível comparar o método de escolha de caminhos baseado na menor distância e método dos caminhos gerados pelo algoritmo de *Least-Cost*. Na prática, é comum a rejeição por utilizar essas áreas como possíveis caminhos, pois o impacto ambiental e o custo decorrente dessa ação são elevados.

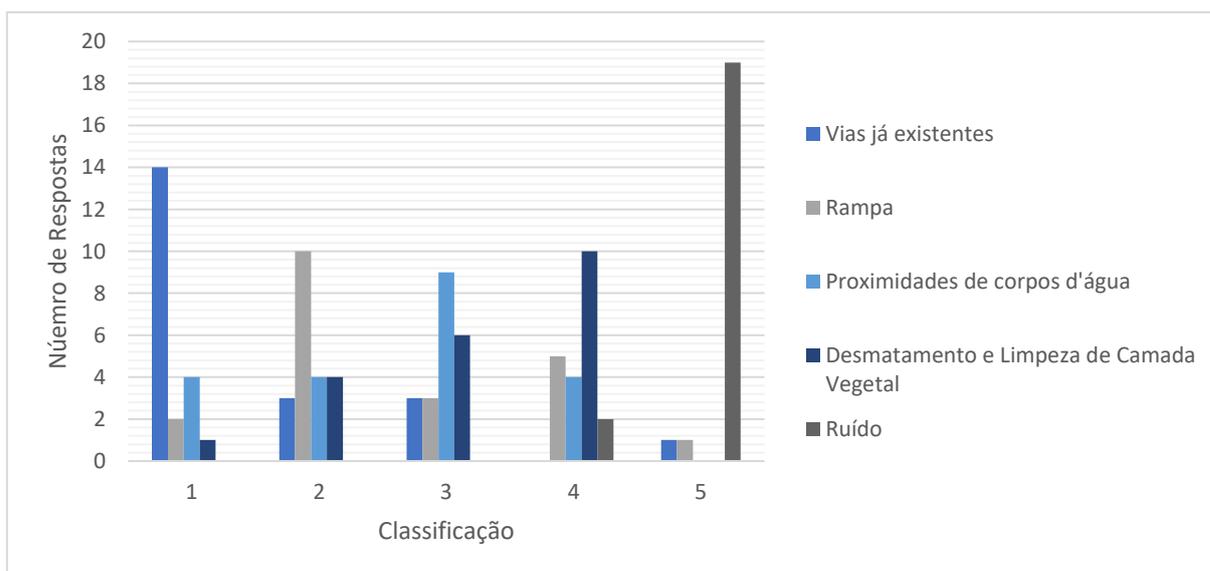
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos no questionário aplicado e do estudo de caso realizado. Todos os mapas presentes nesse capítulo podem ser encontrados com maiores detalhes nos Apêndices.

### 4.1 Resultados obtidos no questionário aplicado

Foram obtidas 21 respostas, categorizadas de 1 a 5, com 1 sendo o mais relevante e 5 menos relevante. Os seguintes critérios foram contemplados: vias já existentes, rampa, proximidade de corpos d'água, desmatamento ou limpeza de camada vegetal e ruído. A moda das respostas foi considerada, com objetivo de diminuir a influência dos *outliers*.

Gráfico 01 - Categorização dos critérios para escolha do caminho de serviço



Fonte: A Autora

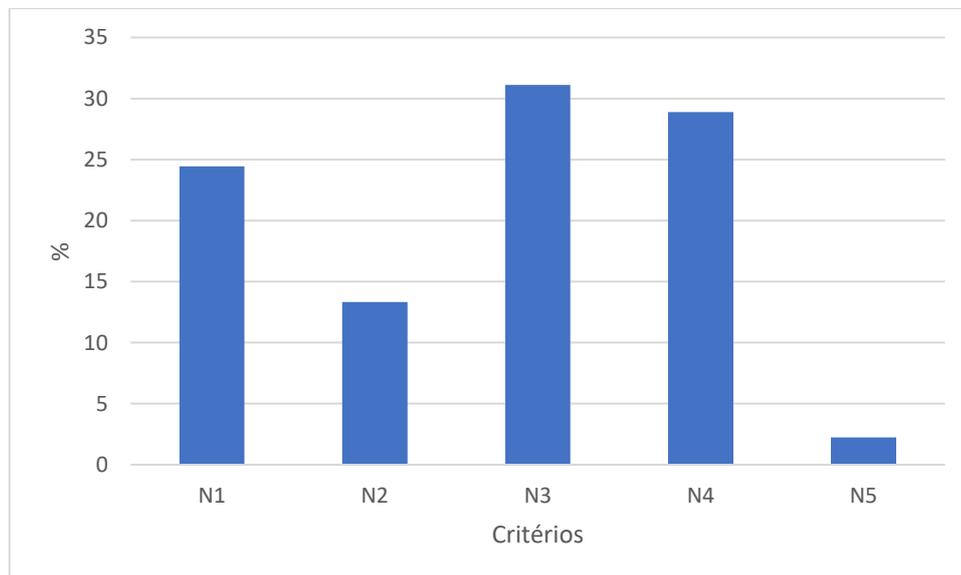
Utilizou-se o MACBETH para analisar a consistência das respostas e qualificar o nível de comparação entre dois fatores em extremo, muito forte, forte, moderado, fraco e muito fraco. Além disso, o MACBETH foi utilizado para definir o peso entre cada critério. A Figura 09 e o Gráfico 02 mostram os resultados obtidos no *software* em que é possível verificar que o fator Vias Já Existente o critério que mais influencia na escolha dos caminhos de serviço segundo os questionários aplicados.

Figura 09 - Comparação entre fatores utilizando o MACBETH. N1: Proximidade a corpos d'água, N2: Desmatamento e Limpeza da Camada Vegetal, N3: Vias Já Existentes, N4: Rampa e N5: Ruído.

	[ N3 ]	[ N4 ]	[ N1 ]	[ N2 ]	[ N5 ]	[ all lower ]	
[ N3 ]	no	very weak	weak	strong	extreme	positive	extreme
[ N4 ]		no	weak	strong	v. strong	positive	v. strong
[ N1 ]			no	strong	v. strong	positive	strong
[ N2 ]				no	strong	positive	moderate
[ N5 ]					no	positive	weak
[ all lower ]						no	very weak
Consistent judgements							no

Fonte: A Autora

Gráfico 02 - Peso definido pelo MACBETH para cada critério. N1: Proximidade a corpos d'água, N2: Desmatamento e Limpeza da Camada Vegetal, N3: Vias Já Existentes, N4: Rampa e N5: Ruído.



Fonte: A Autora

Verificou-se que o critério ruído tinha impacto de 2,33% na decisão de escolha de um caminho de serviço, sendo irrelevante para esta análise. Por isso, foi realizada uma nova análise com auxílio do MACBETH, mas dessa vez desconsiderando o fator ruído, sendo possível constatar a influência de cada fator na Figura 10 e no Gráfico 03.

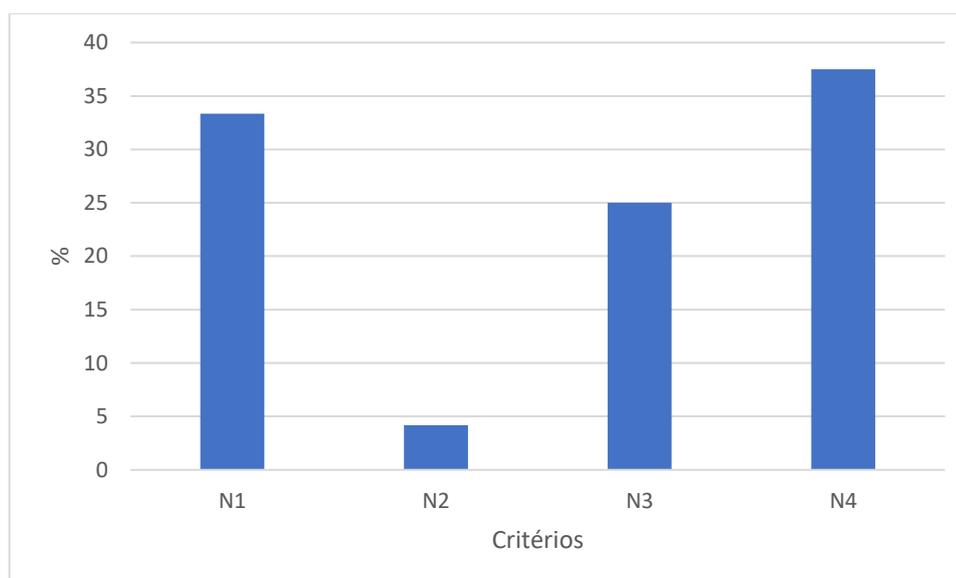
Figura 10 - Comparação entre fatores utilizando o MACBETH. N1: Rampa, N2: Desmatamento e Limpeza de Camada Vegetal, N3: Proximidade de Corpos d'água e N4: Vias Já Existentes.

	[ N4 ]	[ N1 ]	[ N3 ]	[ N2 ]	[ all lower ]	Current scale	
[ N4 ]	no	very weak	weak	strong	positive	37.50	extreme
[ N1 ]		no	weak	strong	positive	33.33	v. strong
[ N3 ]			no	strong	positive	25.00	strong
[ N2 ]				no	positive	4.17	moderate
[ all lower ]					no	0.00	weak
							very weak
							no

Consistent judgements

Fonte: A Autora

Gráfico 03 - Peso definido pelo MACBETH para cada critério. N1: Rampa, N2: Desmatamento e Limpeza de Camada Vegetal, N3: Proximidade de Corpos d'água e N4: Vias Já Existentes.



Fonte: A Autora

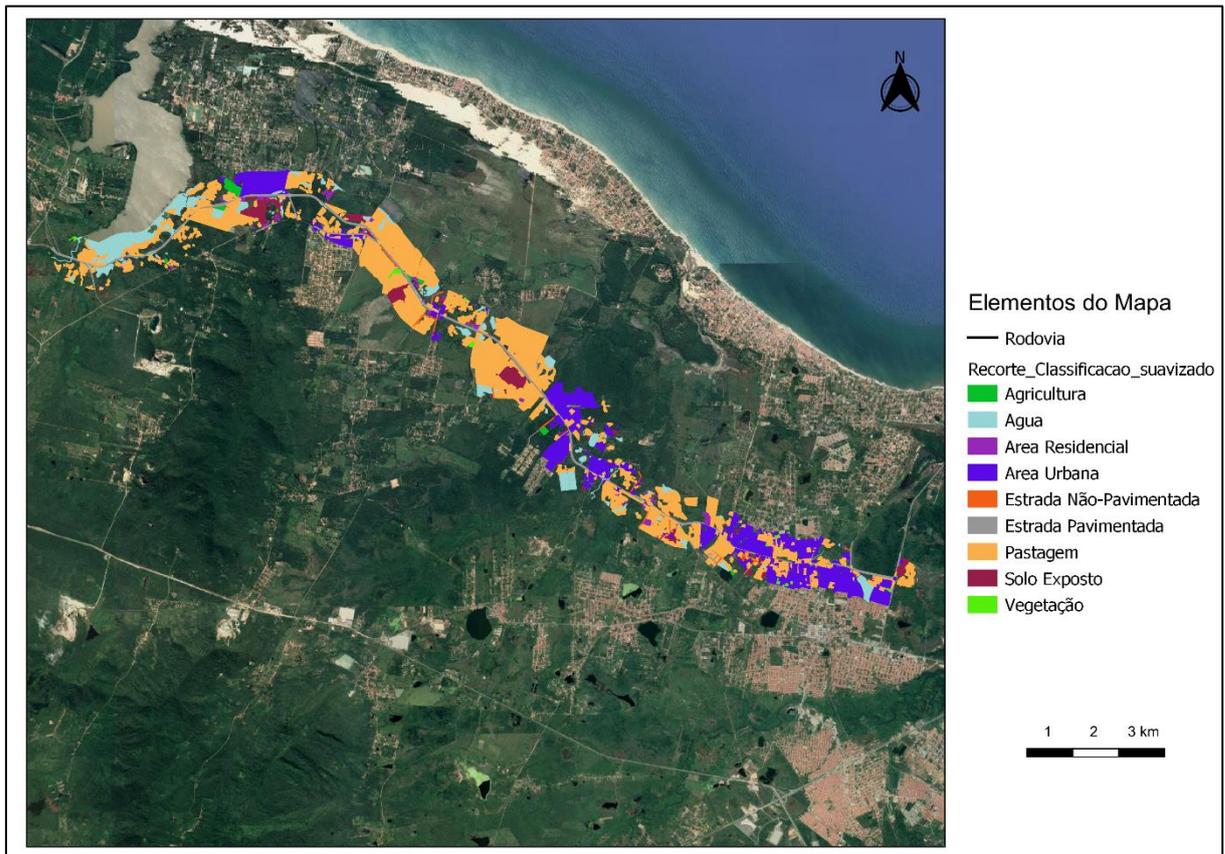
Assim, os pesos definidos foram de 37,50% para existência de vias, 33,33% para rampas, 25,00% em casos de proximidade de corpos d'água e 4,17% para desmatamento e limpeza da camada vegetal.

#### 4.2 Classificação do Uso e Cobertura do Solo

A Figura 11 e a Figura 12 representam a classificação do solo da região estudada. Como é possível verificar na Tabela 07, a maior parte do terreno em estudo é composto por

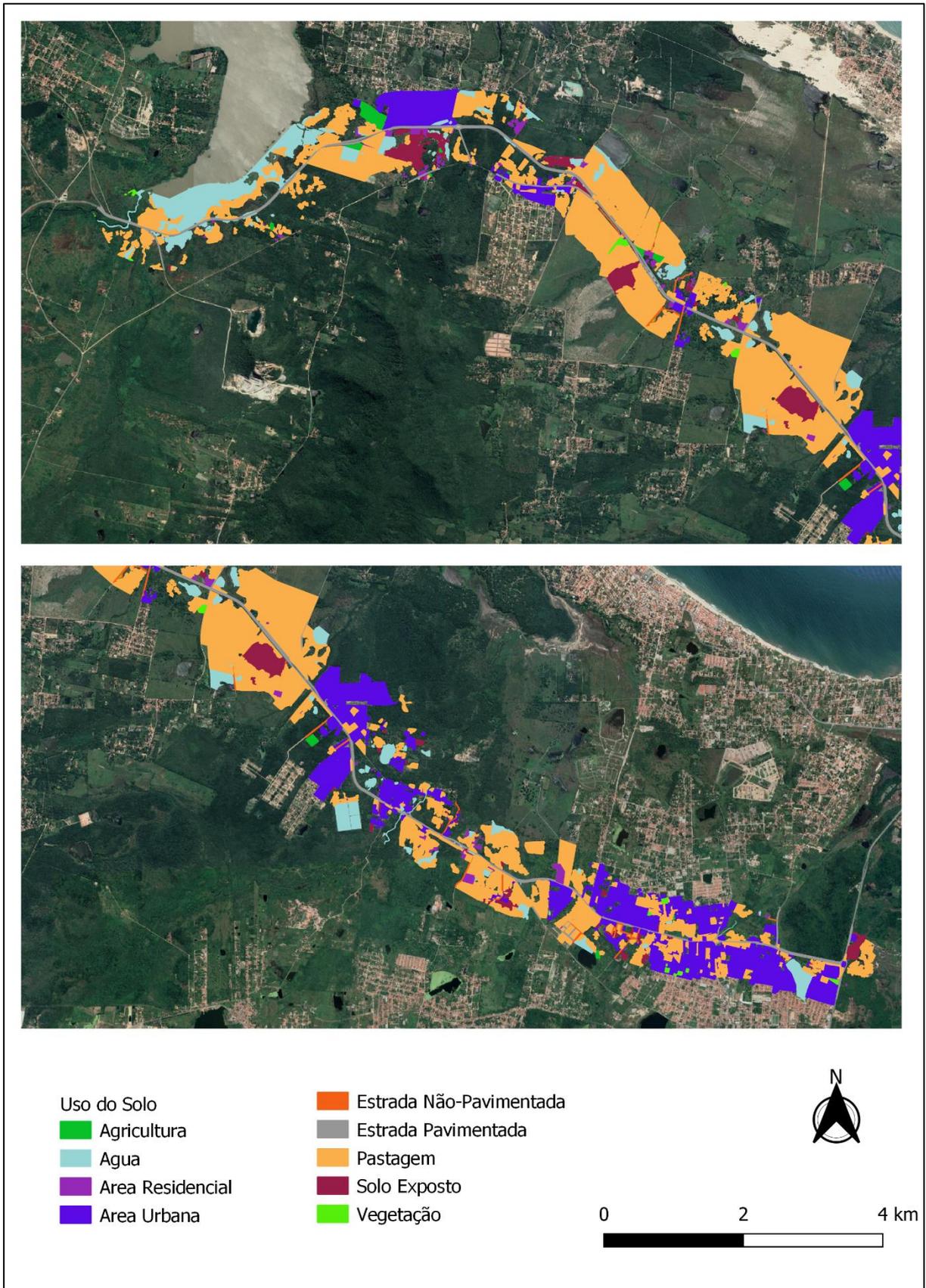
áreas com características de pastagem, ou seja, terra com presença de vegetação rasteira. Há, também, forte presença de áreas urbanas e residenciais, o que pode aumentar o custo de determinados caminhos de serviço pois seriam necessárias desapropriações.

Figura 11 – Classificação do uso do solo



Fonte: A Autora

Figura 12 - Classificação e uso do solo.



Fonte: A Autora

Tabela 07 - Proporção do uso do solo.

Classificação	Área (m <sup>2</sup> )	Porcentagem
Pastagem	7779218,35	51,49%
Área Urbana	3461588,35	22,91%
Água	2035343,08	13,47%
Solo Exposto	739593,72	4,90%
Estrada Pavimentada	568465,26	3,76%
Área Residencial	245739,11	1,63%
Agricultura	147736,92	0,98%
Vegetação	66067,1	0,44%
Estrada Não-Pavimentada	64149,85	0,42%
TOTAL	15107901,74	-

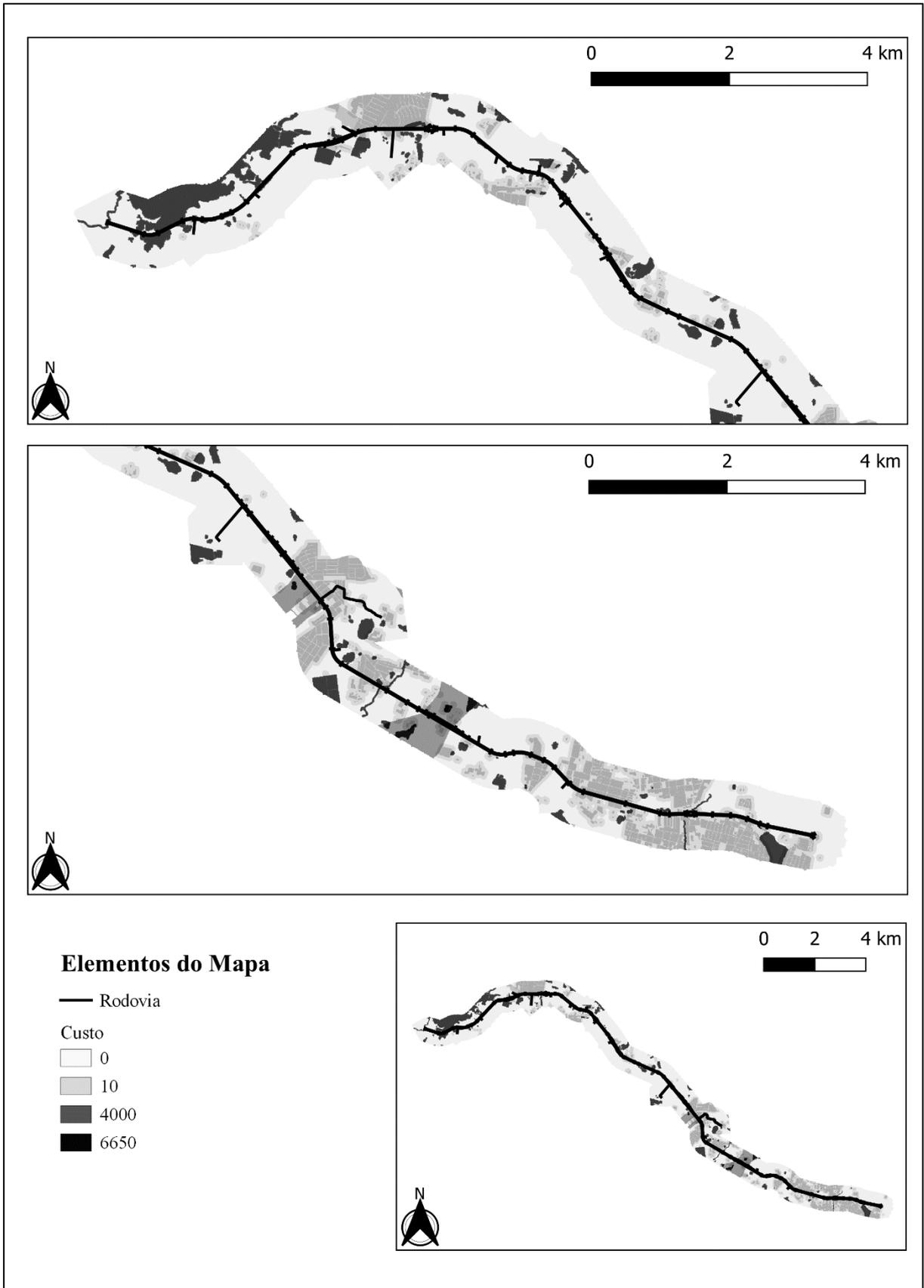
Fonte: A Autora

Através da classificação do uso do solo foi possível definir a existência de estradas pavimentadas ou não-pavimentadas, demarcar as Áreas de Preservação Permanente e as áreas cobertas por vegetação. Como se pode observar na Tabela 07, a maior parte das estradas identificadas na área em estudo são do tipo pavimentada, com 3,76% da região ter áreas com presença de estradas pavimentadas contra 0,42% de estradas não-pavimentadas. As áreas de APP são as regiões com presença de corpos d'água que, na área em estudo, representa 13,47% do total.

### 4.3 Imagem de Custo

Na Figura 13 é possível visualizar a Imagem de Custo gerada pelo *software* QGIS. Como é possível perceber, locais com custo baixo estão representando em tons mais claros de cinza e locais que possuem custo mais elevado são representados em tons mais escuros de cinza. Os locais de maior custo são as Áreas de Preservação Permanente, seguidos pelas zonas residenciais e urbanas. Nos locais mais claros e, conseqüentemente, de menor custo estão as áreas de pastagem.

Figura 13 - Imagem de Custo gerada no QGIS



Fonte: A Autora

#### 4.4 Pontos de jazida e aterro

Na Figura 14 é possível constatar os 9 pontos de empréstimo e os 9 pontos de aterro onde será necessário utilizar material proveniente de jazidas. para realizar o serviço de terraplenagem.

Figura 14 - Localização dos pontos de Aterro e de Empréstimo



Fonte: A Autora

Na Tabela 08 é possível averiguar os pontos de empréstimo para os pontos de aterro em estudo, bem como a distância, em metros, entre os pontos.

Tabela 08 - Jazidas utilizadas para empréstimo de cada ponto de aterro.

Empréstimo	Aterro	Distância (m)	Caminho
E-01	A5	1160	Caminho 01
E-02	A10	1160	Caminho 02
E-03	A17	460	Caminho 03
E-04	A18	2300	Caminho 04

E-05	A19	480	Caminho 05
E-06	A22	520	Caminho 06
E-08	A24	320	Caminho 08
E-10	A27	1500	Caminho 10
E-11	A28	500	Caminho 11

Fonte: A Autora

#### 4.5 Custos SICRO

Para obter o custo de transporte de material em diferentes tipos de via, foram realizadas algumas adaptações das composições do SICRO. As composições fornecidas levam em consideração a escavação do material que será transportado, por isso foram excluídos os custos referentes aos insumos necessários à escavação. Além disso, o custo unitário é dado em R\$/m<sup>3</sup>. Sabendo que, em cada composição, a produção da equipe é de 45,53 m<sup>3</sup>/h, o custo unitário de cada composição foi multiplicado por 45,53 e dividido pela velocidade média dos caminhões basculantes (50 km/h). Na Tabela 9 é possível observar o custo final para as faixas da distância média de transporte (DMT).

Tabela 9 - Custo Unitário para transporte de material em vias pavimentadas e não-pavimentadas

DMT (m)	Revestimento	Composição de Referência	Custo Unitário (R\$/km)
50 a 200	Pavimentado	5502951	2,96
50 a 200	Primário	5502925	3,01
200 a 400	Pavimentado	5502952	3,03
200 a 400	Primário	5502926	3,08
400 a 600	Pavimentado	5502953	3,10
400 a 600	Primário	5502927	3,14
600 a 800	Pavimentado	5502954	3,14
600 a 800	Primário	5502928	3,21
800 a 1000	Pavimentado	5502955	3,19
800 a 1000	Primário	5502929	3,26
1000 a 1200	Pavimentado	5502956	6,15
1000 a 1200	Primário	5502930	6,34
1200 a 1400	Pavimentado	5502957	6,24
1200 a 1400	Primário	5502931	6,43
1400 a 1600	Pavimentado	5502958	6,34
1400 a 1600	Primário	5502932	6,52

1600 a 1800	Pavimentado	5502959	6,43
1600 a 1800	Primário	5502933	6,66
1800 a 2000	Pavimentado	5502960	3,40
1800 a 2000	Primário	5502934	3,54
2000 a 2500	Pavimentado	5502961	3,49
2000 a 2500	Primário	5502935	3,63
2500 a 3000	Pavimentado	5502962	3,61
2500 a 3000	Primário	5502936	2,96
3000	Pavimentado	5502997	2,89
3000	Primário	5502996	3,01

Fonte: Adaptado do SICRO (2020)

Com exceção da faixa de 2500 a 3000m que apresentou uma redução do custo unitário de 18% do custo entre revestimento primário e pavimentado, todas as outras faixas apresentaram um aumento de, em média, 3% no custo de revestimento primário em relação ao pavimentado. O custo médio para transportar material em estradas pavimentadas é de R\$ 4,15 por quilômetro, enquanto o custo médio por quilômetro para transporte em vias não-pavimentadas é de R\$ 4,21. Em situações em que serão realizadas poucas viagens pelos caminhões basculantes é importante observar que a redução do custo dos caminhões não compensaria o valor gasto para adicionar um revestimento asfáltico ao caminho de serviço.

Para o desmatamento o SICRO estabelece um custo de R\$ 0,28 por metro quadrado desmatado. A Figura 15 apresenta a composição de custo para esse serviço.

Figura 15 - Relatório Analítico de Composição de Custo para desmatamento, deslocamento, limpeza de área e estocagem do material de limpeza com árvores de diâmetro até 0,15m.

<b>CGCIT</b>		<b>DNIT</b>						
<b>SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO</b>		Ceará		FIC 0,00226				
Custo Unitário de Referência		Julho/2020		Produção da equipe			1.532,91000 m <sup>2</sup>	
5501700 Desmatamento, destocamento, limpeza de área e estocagem do material de limpeza com árvores de diâmetro até 0,15 m				Valores em reais (R\$)				
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total	
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo		
E9541	Trator de esteiras com lâmina - 259 kW	1,00000	1,00	0,00	402,1845	138,3237	402,1845	
					<b>Custo horário total de equipamentos</b>		402,1845	
<b>B - MÃO DE OBRA</b>		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total		
P9824	Servente	2,00000	h	15,8656		31,7312		
					<b>Custo horário total de mão de obra</b>		31,7312	
					<b>Custo horário total de execução</b>		<b>433,9157</b>	
					Custo unitário de execução		0,2831	
					Custo do FIC		0,0006	
					Custo do FIT		-	
<b>C - MATERIAL</b>		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário		
					<b>Custo unitário total de material</b>			
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário		
					<b>Custo total de atividades auxiliares</b>			
					Subtotal		0,2837	
<b>E - TEMPO FIXO</b>		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
					<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>			
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>		Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário	
				LN	RP	P		
					<b>Custo unitário total de transporte</b>			
					<b>Custo unitário direto total</b>		<b>0,28</b>	

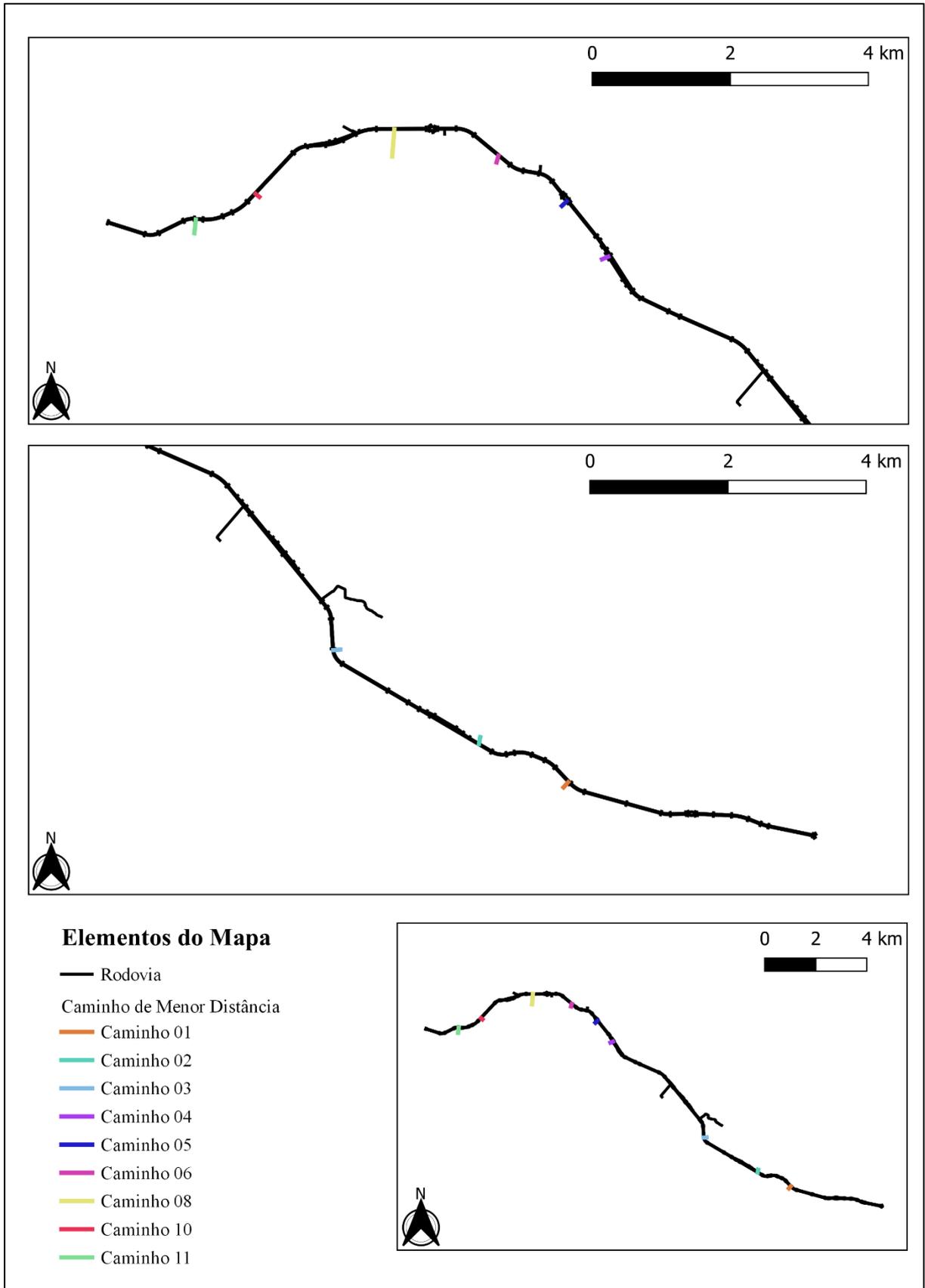
Obs:

Fonte: SICRO (2020)

#### 4.6 Caminhos de Serviço de Menor Distância

Na Figura 16 é possível observar os caminhos de serviço com menor distância gerados no QGIS. O custo do caminho de menor distância é dado pelo custo de transporte do material em vias pavimentadas e em vias com revestimento primário, somado ao custo de desmatamento da área onde será construída uma nova via e somado ao custo de construção em Áreas de Preservação Permanente. Na Tabela 10 é possível observar a distância dos trechos pavimentados e não pavimentados, as áreas de APP e as áreas de desmatamento. A Tabela 11 apresenta os custos para os trechos pavimentados, não pavimentados, custos de APP, para o desmatamento e o custo final.

Figura 16 - Caminhos de serviço com menor distância.



Fonte: A Autora.

Tabela 10 - Dados para os Caminhos de Serviço de Menor Distância

Caminho	Distância Não Pavimentada (m)	Distância Pavimentada (m)	Área de APP (m <sup>2</sup> )	Área de Desmatamento (m <sup>2</sup> )
Caminho 01	100,18	1550,00	-	-
Caminho 02	100,19	760,00	-	111,23
Caminho 03	100,25	40,00	150,53	591,38
Caminho 04	100,20	3650,00	-	61,43
Caminho 05	99,98	1420,00	-	3,15
Caminho 06	100,46	90,00	-	357,27
Caminho 08	400,10	280,00	-	419,32
Caminho 10	70,00	1100,00	178,36	398,52
Caminho 11	200,49	100,00	352,93	392,23

Fonte: A Autora

Tabela 11 – Custos de Transporte dos Caminhos de Serviço de menor distância.

Caminho	Custo Trecho Não Pavimentado (R\$)	Custo Trecho Pavimentado (R\$)	Custo de APP (R\$)	Custo de Desmatamento (R\$)	Custo Total (R\$)
Caminho 01	0,30	9,83	-	-	10,13
Caminho 02	0,30	2,39	-	31,14	33,83
Caminho 03	0,30	-	43.461,70	249,88	43.711,88
Caminho 04	0,30	10,55	-	17,19	28,04
Caminho 05	0,30	9,00	-	0,88	10,18
Caminho 06	0,30	0,27	-	100,03	100,60
Caminho 08	1,26	0,85	-	117,41	119,51
Caminho 10	0,21	6,77	21.833,95	211,46	22.052,39
Caminho 11	0,62	0,30	22.008,52	307,46	22.316,89

Fonte: A Autora

O custo total para cada caminho é dado pelo somatório dos custos de transporte, custo de APPs e o custo de desmatamento. O custo de APPs é dado pelo somatório entre a multa

aplicada e o custo de compensação ambiental. O caminho 10 e 11 estão na mesma Área de Preservação Permanente, por isso o custo de compensação ambiental foi dividido igualmente entre os dois.

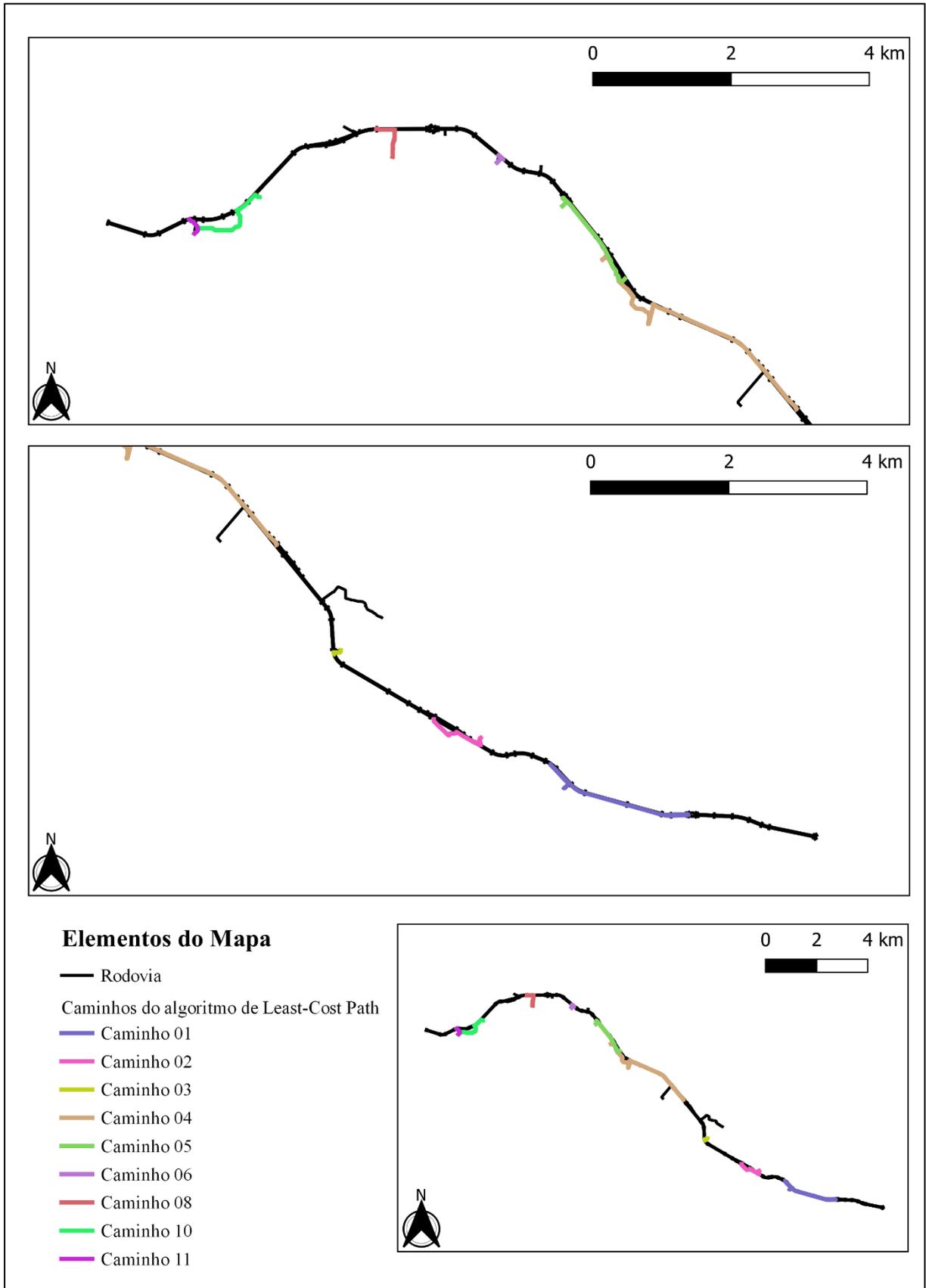
É possível notar o impacto dos custos ambientais no custo dos diferentes caminhos. O caminho 04 tem uma extensão pavimentada um pouco maior que 3,6 km que o caminho 02, entretanto apresenta um custo 1292 vezes menor, decorrente da necessidade de menor desmatamento e por não passar em uma área de preservação permanente. O caminho 01 tem um comprimento que equivale ao dobro de extensão do caminho 02, entretanto tem um custo 3,34 vezes menor por não ser necessário que haja desmatamento para sua execução.

O custo médio para transporte de materiais em vias não pavimentadas foi de R\$ 3,06/km e em vias pavimentadas foi de R\$ 4,44/km. A distância média percorrida em estradas pavimentadas foi de 998,89 metros e de 141,32 metros em vias não pavimentadas, valores esses que explicam os custos unitários por quilômetro, pois o SICRO define valores unitários maiores para a faixa de 800 a 1000 metros em relação a faixa de 50 a 200 metros.

#### **4.7 Caminhos de Serviço do Algoritmo de Least-Cost Path**

O custo para os caminhos de serviço determinados pelo algoritmo de *Least-Cost* é dado pelo custo de transporte na via não pavimentada, somado ao custo de transporte na via pavimentada e somado ao custo de desmatamento. A Figura 17 apresenta os caminhos de serviço definidos pelo algoritmo, como mencionado anteriormente, as Áreas de Preservação Permanente receberam um peso 10.000 e peso 0 em locais onde não há áreas de APP, com o objetivo de evitar que o algoritmo de LCP escolhesse trajetos que evitassem entrar em áreas de APP. Os valores de distância de cada trecho, bem como a área desmatada podem ser verificados na Tabela 12, enquanto o custo para cada caminho pode ser observado na Tabela 13.

Figura 17 - Caminhos determinados pelo algoritmo de *Least-Cost Path*



Fonte: A Autora

Tabela 12 - Dados para os Caminhos de Serviço do algoritmo de Least-Cost Path.

Caminho	Distância Não Pavimentada (m)	Distância Pavimentada (m)	Área de Desmatamento (m <sup>2</sup> )
Caminho 01	845,81	2.281,87	4.524,88
Caminho 02	590,69	498,70	1.157,18
Caminho 03	122,04	51,33	809,53
Caminho 04	1.724,64	2.945,21	7.795,30
Caminho 05	1.795,02	91,07	2.928,90
Caminho 06	146,10	101,94	637,32
Caminho 08	394,83	305,41	725,60
Caminho 10	1.022,98	507,45	6.193,13
Caminho 11	282,43	13,61	456,13

Fonte: A Autora

Tabela 13 – Custos de Transporte dos Caminhos de Serviço do algoritmo de Least-Cost Path

Caminho	Custo Trecho Não Pavimentado (R\$)	Custo Trecho Pavimentado (R\$)	Custo de Desmatamento (R\$)	Custo Total (R\$)
Caminho 01	2,76	7,96	1.266,96	1.277,68
Caminho 02	1,90	1,55	324,00	327,44
Caminho 03	0,37	0,15	226,66	227,18
Caminho 04	6,11	10,28	2.182,68	2.199,06
Caminho 05	5,40	0,27	820,09	825,76
Caminho 06	0,44	0,30	178,45	179,19
Caminho 08	1,24	0,93	203,16	205,33
Caminho 10	6,49	1,57	1.734,07	1.742,13
Caminho 11	0,87	7,96	127,71	128,58

Fonte: A Autora

O custo para os caminhos de serviço determinados pelo algoritmo de *Least-Cost* é dado pelo custo de transporte na via não pavimentada, somado ao custo de transporte na via

pavimentada e somado ao custo de desmatamento. A Figura 17 apresenta os caminhos de serviço definidos pelo algoritmo, como mencionado anteriormente, as Áreas de Preservação Permanente receberam um peso 10.000 e peso 0 em locais onde não há áreas de APP, com o objetivo de evitar que o algoritmo de LCP escolhesse trajetos que evitassem entrar em áreas de APP. O custo para cada caminho pode ser observado na Tabela 13.

Os caminhos gerados pelo algoritmo de *Least-Cost Path* apresentaram valores para transporte para os trechos pequenos em comparação ao custo de desmatamento, valor esse de, em média, R\$ 784,86 por caminho de serviço. O custo médio para trecho não pavimentado foi de R\$ 3,69/km e R\$ 3,39/km para trechos pavimentados. Os trechos pavimentados possuem, em média, 755,18 metros, enquanto os trechos não pavimentados apresentam tamanho médio de 769,39 metros.

#### **4.8 Comparação entre os métodos**

Na Figura 18 é possível observar os 9 caminhos gerados pelo algoritmo de *least-Cost Path* e os 9 caminhos de serviço de menor distância.

Figura 18 - Caminhos gerados pelos dois métodos.

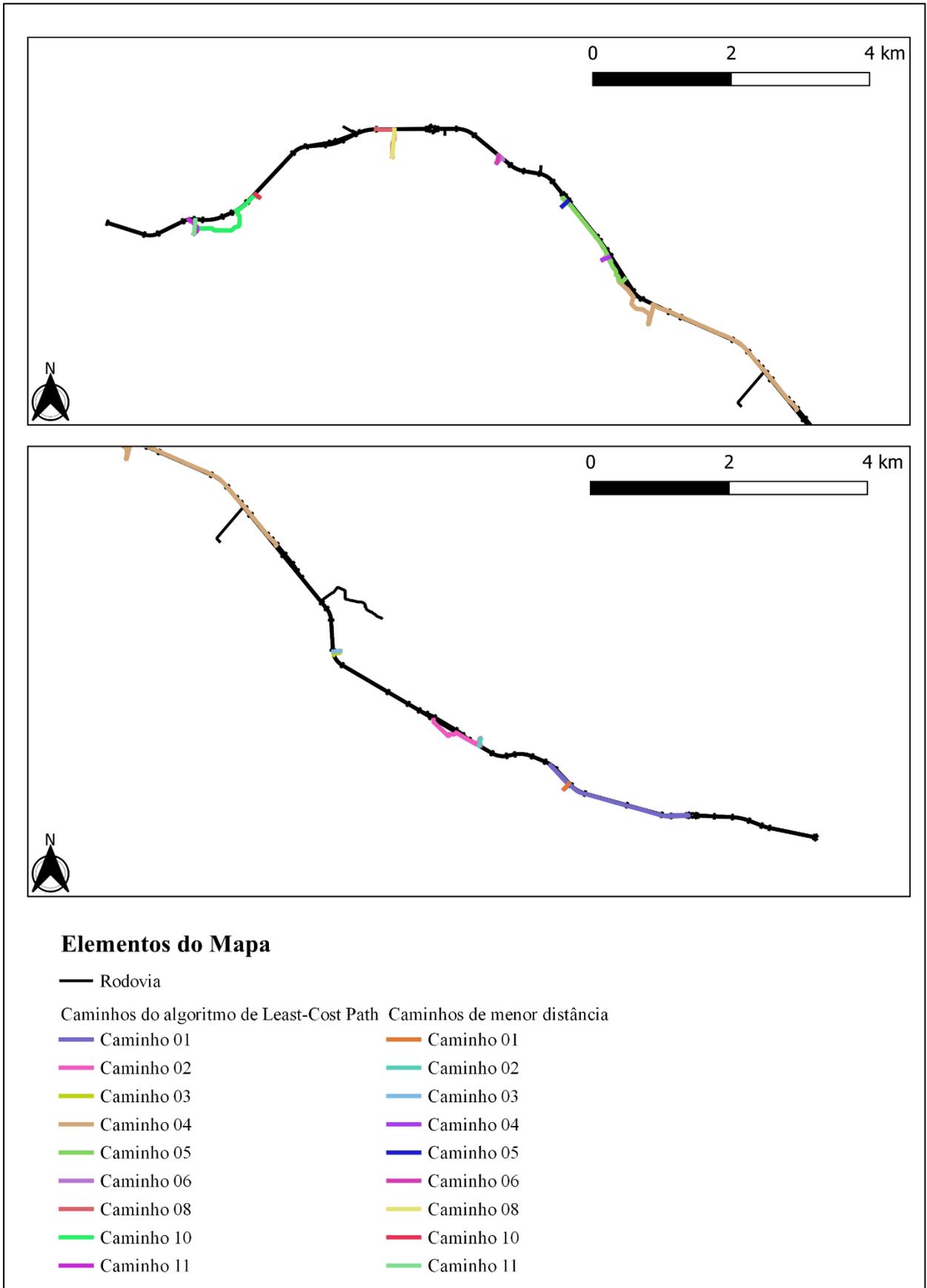


Tabela 14 – Custos totais para os dois métodos.

Caminho	Menor Distância (R\$)	Algoritmo LCP (R\$)
Caminho 01	10,13	1.277,68
Caminho 02	33,83	327,44
Caminho 03	43.711,88	227,18
Caminho 04	28,04	2.199,06
Caminho 05	10,18	825,76
Caminho 06	100,60	179,19
Caminho 08	5,76	205,33
Caminho 10	22.052,39	1.742,13
Caminho 11	22.316,89	128,58

Fonte: A Autora

Como é possível constatar na Tabela 14, o algoritmo estabeleceu rotas com um custo maior em 6 dos 9 caminhos em estudo, tencionando não passar por locais com presença de obstáculos físicos, áreas de preservação permanente e corpos d'água. Como se pode perceber o algoritmo de *Least-Cost* gerou caminhos muito maiores que os caminhos de menor distância, em que o custo médio por quilômetro dos caminhos gerados pelo algoritmo de LCP foi de R\$ 518,351 e o custo médio para os caminhos de menor distância foi de R\$8.508,165/km. Entretanto, é possível notar que o maior fator de impacto no custo foi decorrente do aumento das áreas de desmatamento. Ao somar as áreas que precisam ser desmatadas ao considerar os caminhos de menor distância obtêm-se o valor de 336,20 m<sup>2</sup> incluindo o desmatamento nas Áreas de Preservação Permanente, enquanto os caminhos do LCP totalizam 2803,11 m<sup>2</sup>, valor este 10,81 vezes maior.

O caminho 03 gerado pelo algoritmo apresentou custo de R\$ 227,18, enquanto o caminho 03 de menor distância apresentou R\$ 43.711,88. Essa diferença vem do impacto causado pelo custo gerado por adentrar em uma Área de Preservação Permanente, valor este de R\$ 43.461,70, cerca de 99,43% do custo final para o caminho de serviço de menor distância.

O caminho 10 passa por uma Área de Preservação Permanente no caminho de menor distância e, por isso, apresentou um valor superior ao do caminho gerado pelo algoritmo LCP. O custo total para a menor distância foi 12,66 vezes maior que o custo do método do algoritmo *Least-Cost Path*.

O custo do caminho 11 de menor distância foi 173,56 vezes maior que o custo do caminho estabelecido pelo algoritmo. Essa distinção decorre do custo maior de desmatamento (R\$ 307,46 do custo de menor distância contra R\$ 127,71 do LCP), mas principalmente do custo gerado da Área de Preservação Permanente.

É adequado acreditar que, se houvesse a indispensabilidade de atravessar corpos d'água e, conseqüentemente, a construção de pontes, o caminho de menor distância apresentaria custo superior. De modo semelhante, o caminho de serviço de menor distância teria um custo mais elevado se existisse a imposição de desapropriação de estruturas ou terrenos.

É notável que nessa comparação o custo de desmatamento tenha grande impacto, mas ao mesmo tempo tenha sido classificado por profissionais da área como o critério de menor peso. Presume-se que seja primordial uma calibração no peso desse fator, pois fica claro que a baixa relevância apresentada ao algoritmo, o tornou decisivo na determinação do caminho de menor custo pelo LCP.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo principal apresentar os caminhos de menor custo para a duplicação fictícia de uma rodovia localizada na cidade de Caucaia, Ceará. Essa sessão apresenta as principais conclusões, evidenciar as limitações desta pesquisa e de deixar recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1 Principais Conclusões

Conclui-se que o uso do algoritmo de *Least-Cost Path* e de *softwares* como o QGIS pode auxiliar na redução do custo de caminhos de serviço, contribuindo com o processo de planejamento através da simulação de diferentes cenários. Em distâncias pequenas, como as estudadas nesse trabalho, o ganho em produtividade e custo é pequeno, mas em obras onde é necessário percorrer longas distâncias para transportar o material ou obras com diversas possibilidades de jazidas, o QGIS pode facilitar o planejamento do melhor caminho de serviço.

O custo médio para caminhos de serviço de menor distância foi 16,42 vezes maior em comparação ao custo médio para os caminhos do algoritmo de *Least-Cost Path*. Essa diferença foi causada, principalmente, pelo custo necessário para se realizar a compensação ambiental por adentrar Áreas de Preservação Permanente.

O critério desmatamento teve impacto importante nos custos totais dos caminhos gerados pelo algoritmo LCP, apesar de sua baixa relevância adotada pelos profissionais da área de infraestrutura de transporte. Por isso, é interessante considerar aumentar o peso desse critério no algoritmo para que sejam gerados caminhos que evitem passar por zonas desmatadas.

Os fatores de maior relevância nesse estudo são critérios em que o custo é fixo e só realizado uma única vez durante a execução do projeto. Ao considerar que serão realizadas centenas de viagens para transportar o material necessário para aterro esses custos fixos seriam diluídos ao longo do projeto, tornando seu custo praticamente irrisório em comparação ao restante.

Apesar do caminho de menor distância ter apresentado menor custo na maioria das situações, o LCP torna possível a representação de diferentes contextos mais rapidamente. Fica claro que, em situações em que o percurso pode atravessar diversos obstáculos, o algoritmo aprimora o processo de escolha.

## 5.2 Limitações da Pesquisa

O fator que mais impactou no custo mais elevado nos caminhos gerados pelo algoritmo de *Least-Cost Path* foi o aumento da área de desmatamento. Entretanto, não foi levado em consideração que o custo de desmatamento é diluído ao longo da obra. Quanto mais tempo for necessário para realizar o transporte de material, menor será o impacto do custo de desmatamento no valor final do projeto.

Além disso, não foi levado em avaliação o impacto ambiental causado pelo desmatamento. Tendo em consideração a importância das árvores para o meio ambiente, como a purificação do ar e impedimento da erosão do solo, o desmatamento sem planejamento e sem replantio pode resultar em danos permanentes a todo o ecossistema. É imprescindível que os engenheiros responsáveis por esse tipo de serviço tenham em observação o custo indireto desse tipo de escolha.

## 5.3 Recomendações para trabalhos futuros

Levando em atenção os pontos admitidos, os resultados discutidos e as limitações apresentadas, recomenda-se para futuros trabalhos:

- a) Calibrar a relevância dada ao critério de desmatamento;
- b) Considerar o tempo de obra como um critério;
- c) Apresentar o impacto ambiental como um fator;
- d) Comparar os custos de caminhos de serviço gerados pelo algoritmo com valores reais de um projeto executado.

## REFERÊNCIAS

ABRAM, Isaac, ROCHA, Aroldo. **Manual Prático de Terraplenagem**, 1ªed., Salvador/BA, 2000.

ALBANI, João Fortini; MATTOS, João Rodrigo G. Ensino de projeto rodoviário na Escola de Engenharia da UFRGS. **Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana**, Florianópolis, nov. 2006.

ÁREAS de Preservação Permanente. **Serviço Florestal Brasileiro**, 2019. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/conservacao-das-florestas/183-areas-de-preservacao-permanente>>. Acesso em 02 de fev. de 2021.

BONETT, João. A teoria dos grafos e o algoritmo Dijkstra aplicados à análise de redes de transporte e à construção de matrizes de deslocamento em rede. **21º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito**, São Paulo, jun. 2017.

BRASIL. **Lei nº 6.001, de 19 de dezembro de 1973**. Dispõe sobre o Estatuto do Índio. Brasília, DF: Casa Civil, 1973. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6001.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6001.htm). Acesso em 03 de fev. de 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 1998. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm) . Acesso em 03 de fev. de 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 2000. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm). Acesso em 13 de abr. de 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e

7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em 03 de fev. de 2021.

CHEN, Yi-zhou; SHEN, Shi-fei; YANG, Rui; CHEN, Tao. Path Optimization Study for Vehicles Evacuation based on Dijkstra Algorithm. **Procedia Engineering**, v. 71, p. 159-165, 2014.

COSTA, Carlos A. Bana e; ANGULO-MEZA; Lidia; OLIVEIRA, Mónica D.; O Método MACBETH e Aplicação no Brasil. **Engevista**, v. 15, p. 3-27, abr. 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT**. Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes. Volume 01: Metodologia e Conceitos 1ª Edição. Brasília, 2017.

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

DOCUMENTAÇÃO DO QGIS. **Guia do Usuário QGIS**. Disponível em: [https://docs.qgis.org/2.8/pt\\_BR/docs/user\\_manual/plugins/plugins\\_road\\_graph.html](https://docs.qgis.org/2.8/pt_BR/docs/user_manual/plugins/plugins_road_graph.html). Acesso em 15 de março de 2021.

EL-RAYES, Khaled; MOSELHI, Osama. Optimizing Resource Utilization for Repetitive Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 127, p. 18–27, fev. 2001.

FRIEDRICH, C. **Comparison of ArcGIS and QGIS for Applications in Sustainable Spatial Planning**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Viena. 2014.

GATES, M.; SCARPA, A. Optimum location of construction haul roads. **Journal of the Construction Division**, v. 104, p. 395–407, dez. 1978.

GOMES, Emerson Souza. Quando é permitido suprimir vegetação de Área de Preservação Permanente. **Cena Jurídica**, 2019. Disponível em: <<https://www.cenajuridica.com.br/2019/01/25/quando-e-permitido-suprimir-vegetacao-em-area-de-preservacao-permanente/>>. Acesso em 02 de fev. de 2021.

GOMIDE, Alexandre de Ávila; PEREIRA, Ana Karine. **Governança da política de infraestrutura: condicionantes institucionais ao investimento**. Rio de Janeiro: Ipea, 2018. Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=33721](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=33721). Acesso em: 12 jan. 2021

IBGE mapeia a infraestrutura dos transportes no Brasil. **Agência de notícias IBGE**, 2014. Disponível em: < <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/14707-asi-ibge-mapeia-a-infraestrutura-dos-transportes-no-brasil> >. Acesso em 10 de fev. de 2021.

KANG, Ju Young; LEE, Byung Suk. Optimisation of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and laplacian smoothing. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 9, p. 492-498, set. 2017.

KANG, Sanghyeok; SEO, Jongwon. GIS Method for Haul Road Layout Planning in Large Earthmoving Projects: Framework and Analysis. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, p. 236–246, mar. 2012.

LEE, Jongwon; BEDNARZ, Robert. Effect of GIS learning on spatial thinking. **Journal of Geography in Higher Education**, v. 33, p. 183-198, 2009.

LIMA, Roberto Xavier de; NOBRE JÚNIOR, Ernesto Ferreira; PRATA, Bruno de Athayde; WEISSMANN, José. Distribution of materials in road earthmoving and paving: a mathematical programming approach. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, p. 1046-1054, ago. 2013.

LIMMER, Carl Vicente. **Planejamento, orçamentação e controle de projetos e obras**. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

MARTINEZ, Jose Raimundo. Game AI techniques applied to city simulations. **Conference Sheffield Hallam University**, Sheffield, jul. 2020.

PEDROZO, Lúcia Gonçalves. **CUSTOS DA INFRA-ESTRUTURA RODOVIÁRIA: análise e sistematização**. 2001. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PEJOVIĆ, Milutin; GOSPAVIĆ, Zagorka; MILOVANOVIĆ, Branko; ARSIĆ, Igor. Solving a surveying problem by using R and QGIS - Setting out of a land expropriation zone. **Geonauka**, v. 2, p. 12-18, jun. 2014.

PILGER, Jackson Dullius; MACHADO, Ênio Leandro; LAWISCH-RODRIGUES, Adriane de Assis; ZAPPE, Ana Letícia; RODRIGUEZ-LOPEZ, Antonio. Environmental impacts and cost overrun derived from adjustments of a road construction project setting. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, fev. 2012.

PRATA, Bruno de Athayde; NOBRE JÚNIOR, Ernesto Ferreira; BARROSO, Giovanni Cordeiro. Modelagem de sistemas de terraplenagem: uma aplicação das redes de Petri. **Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, v. 26, Vitória, 2005.

RABUSKE, Márcia A. **Introdução a teoria dos grafos**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1992.

RICARDO, Hélio de Souza, CATALANI, Guilherme, **Manual prático de escavação: terraplenagem e escavação de rocha**, 3ª. ed. São Paulo: Pini, 2007

SAATY, T.L. **Decision making for leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World**. Pittsburg: WS. Publications, 2000

SCHMIDT, Marcio Augusto Reolon; BARBOSA, Gustavo Rodrigues. Uso de Redes Neurais Artificiais na Ponderação Inicial da Técnica AHP em Análises de Vulnerabilidade de Bacias Hidrográficas. **Boletim de Ciências Geodésicas**. On-line version, v. 22, p. 511-525, jul.-set. 2016

TOMLINSON, Roger. **Thinking about GIS: Geographic Information System Planning for Managers**. Esri Press, 2013.

TREVIZANO, Waldir Andrade; FREITAS, André Luíz Policani. Emprego do Método da Análise Hierárquica (A.H.P.) na seleção de Processadores. **XXV Encontro Nac. de Engenharia de Produção**, Porto Alegre, out.-nov. 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO. Disponível em:  
[http://www.deinf.ufma.br/~portela/ed211\\_Dijkstra.pdf](http://www.deinf.ufma.br/~portela/ed211_Dijkstra.pdf). Acesso em 05 de março de 2021.

WING, M.G.; BETTINGER, P. GIS: An updated primer on a powerful management tool, **Journal of forestry**, v. 101, p. 4-8, 2003.

## APÊNDICE A – FORMULÁRIO UTILIZADO NA PESQUISA DE CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE CAMINHOS DE SERVIÇO

### Construção de Caminhos de Serviço

Este questionário foi feito com o objetivo de realizar uma análise multicritério dos fatores que influenciam no custo de execução de um caminho de serviço em obras de terraplenagem, sendo considerados custos ambientais e de construção. Com base no método MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique), a avaliação é feita por meio de comparações paritárias. Com isso, peço um pouco de paciência e atenção ao responder as perguntas. Qualquer dúvida ou sugestão, basta enviar um email para: [pedrofermandes@det.ufc.br](mailto:pedrofermandes@det.ufc.br).

Agradeço pela valorosa avaliação! Sua opinião é bastante importante para o desenvolvimento desta pesquisa.

#### \*Obrigatório

1. Por favor, informe seu nome completo \*

---

2. Onde trabalha/estuda? \*

---

3. Qual é seu cargo atual? \*

*Marcar apenas uma oval.*

- Estudante (Graduação)
- Técnico/Tecnólogo
- Engenheiro Júnior (Até 5 anos de experiência)
- Engenheiro Pleno (Entre 5 e 10 anos de experiência)
- Engenheiro Sênior (Mais de 10 anos de experiência)
- Professor Universitário
- Professor e Pesquisador
- Pesquisador (Mestrado)
- Pesquisador (Doutorado)
- Pesquisador (Pós-doutorado)
- Outro

4. Se a resposta da pergunta anterior foi "outro", por favor especifique

---

5. Quais fatores são mais importantes na construção de um caminho de serviço em obras de terraplenagem? Classifique os itens abaixo em ordem de importância, lembrando que a resposta assinalada não pode ser a mesma para diferentes itens \*

*Marcar apenas uma oval por linha.*

	0 mais importante (Item 1)	2º mais importante (Item 2)	3º mais importante (Item 3)	4º mais importante (Item 4)	Menos importante (Item 5)
Rampa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ruído (Poluição Sonora)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Proximidade de corpos d'água (Restrições ambientais)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vias já existentes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Desmatamento e limpeza de camada vegetal	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

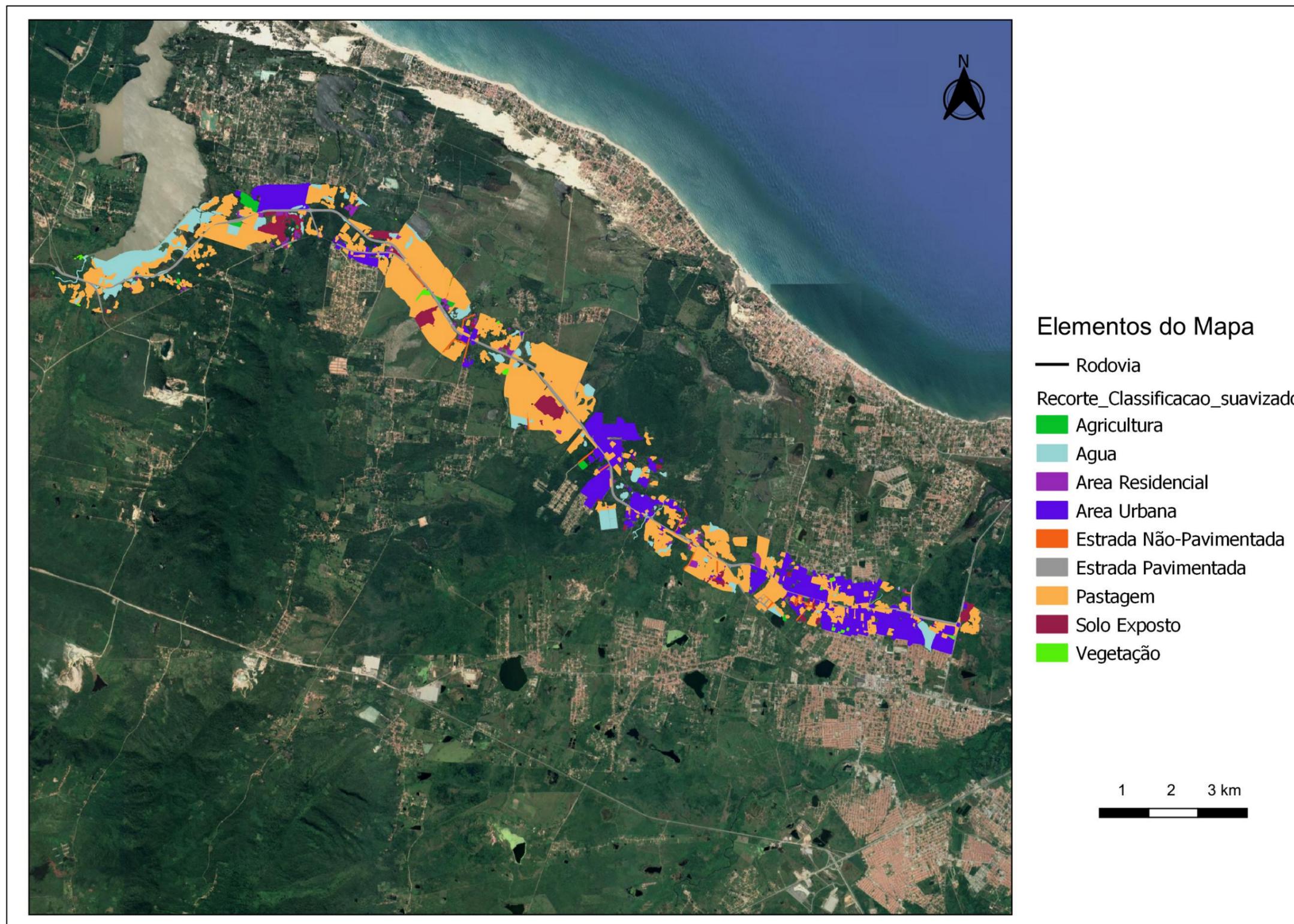
6. Na sua opinião, existem outros itens que influenciam no custo ambiental e de construção dos caminhos de serviço? Se sim, quais seriam?

---





## APÊNDICE B – MAPA DE USO DO SOLO



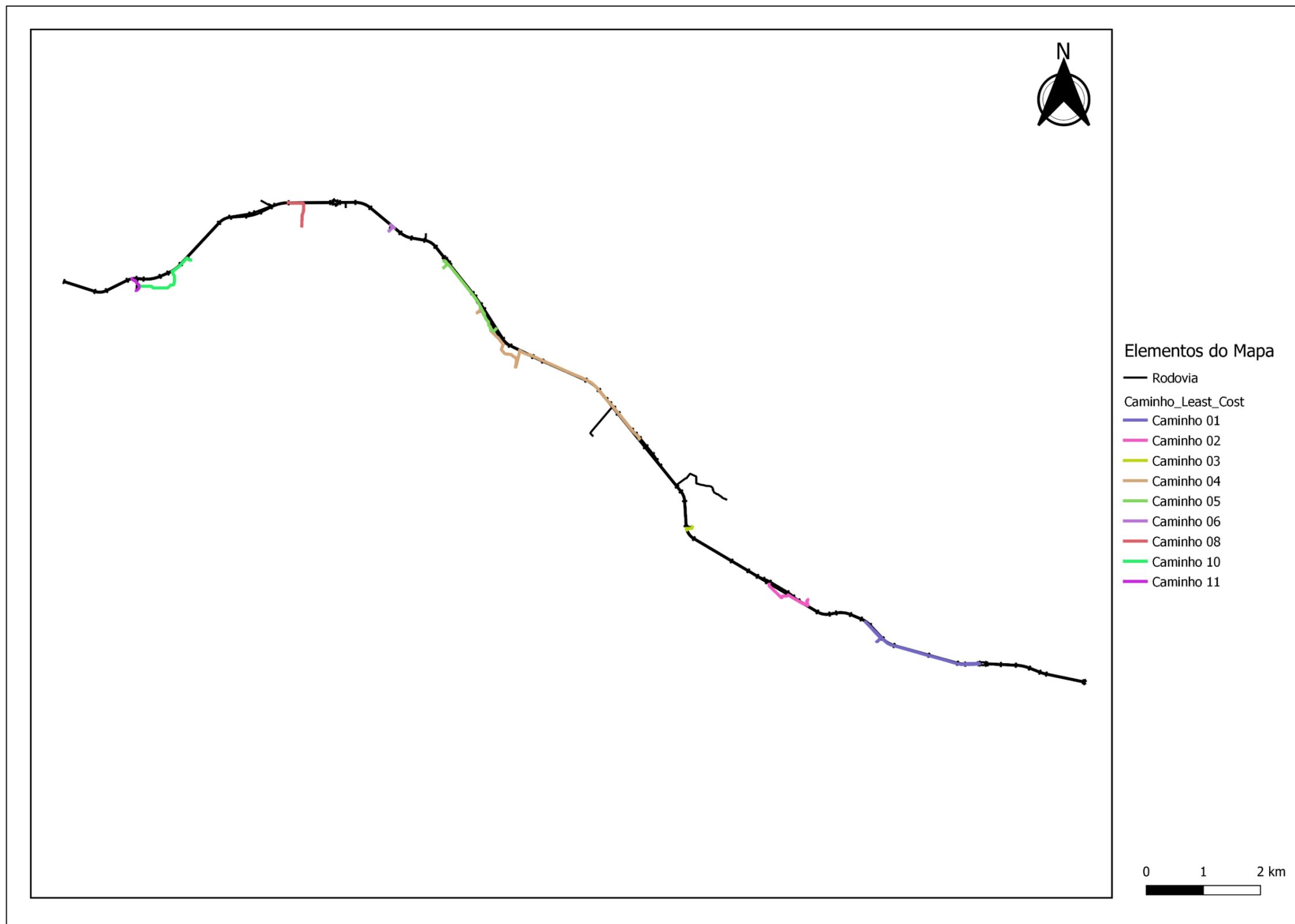
Fonte: A Autora.

## APÊNDICE C – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ATERRO E EMPRÉSTIMO



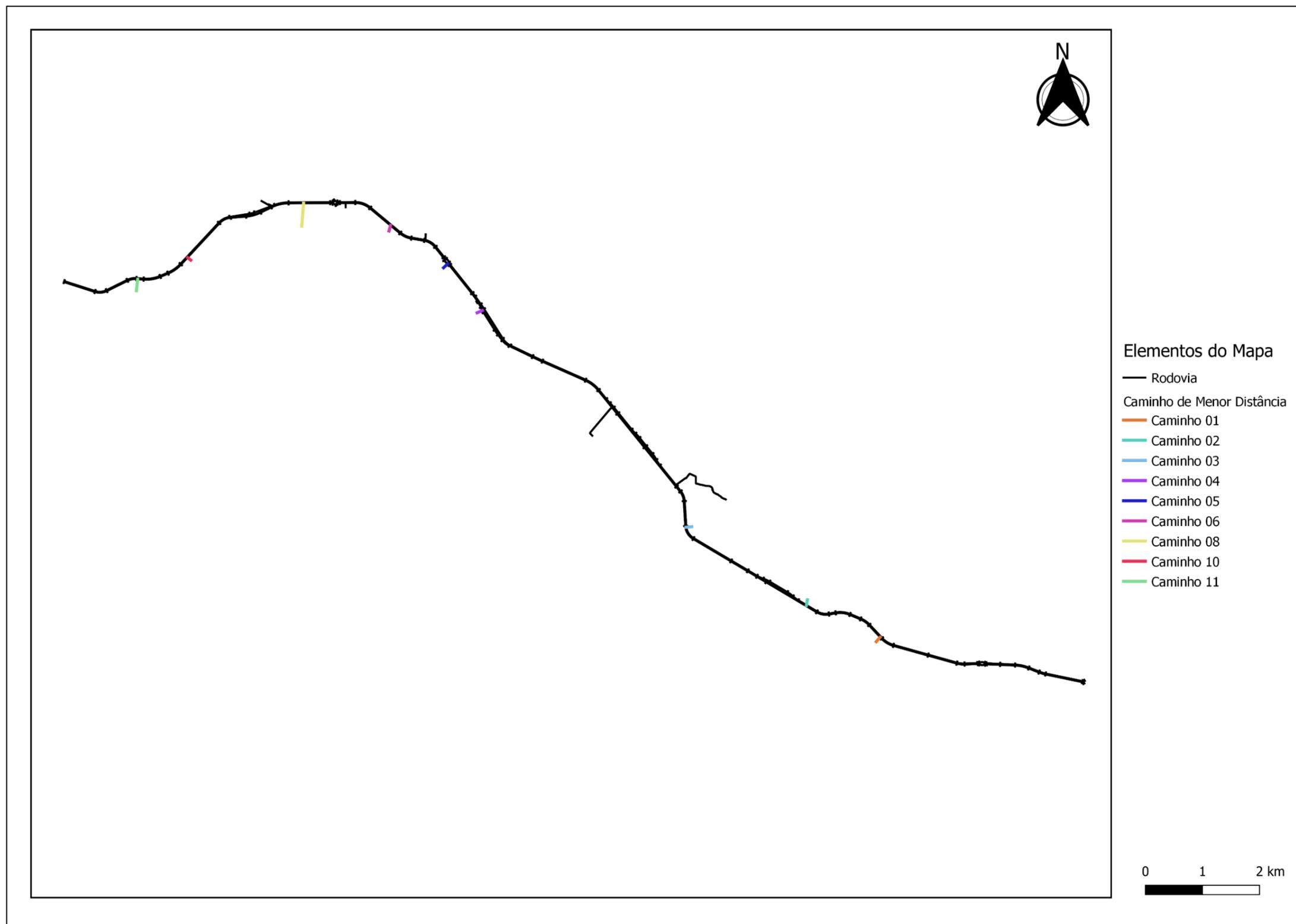
Fonte: A Autora.

## APÊNDICE D – IMAGEM DE CUSTO



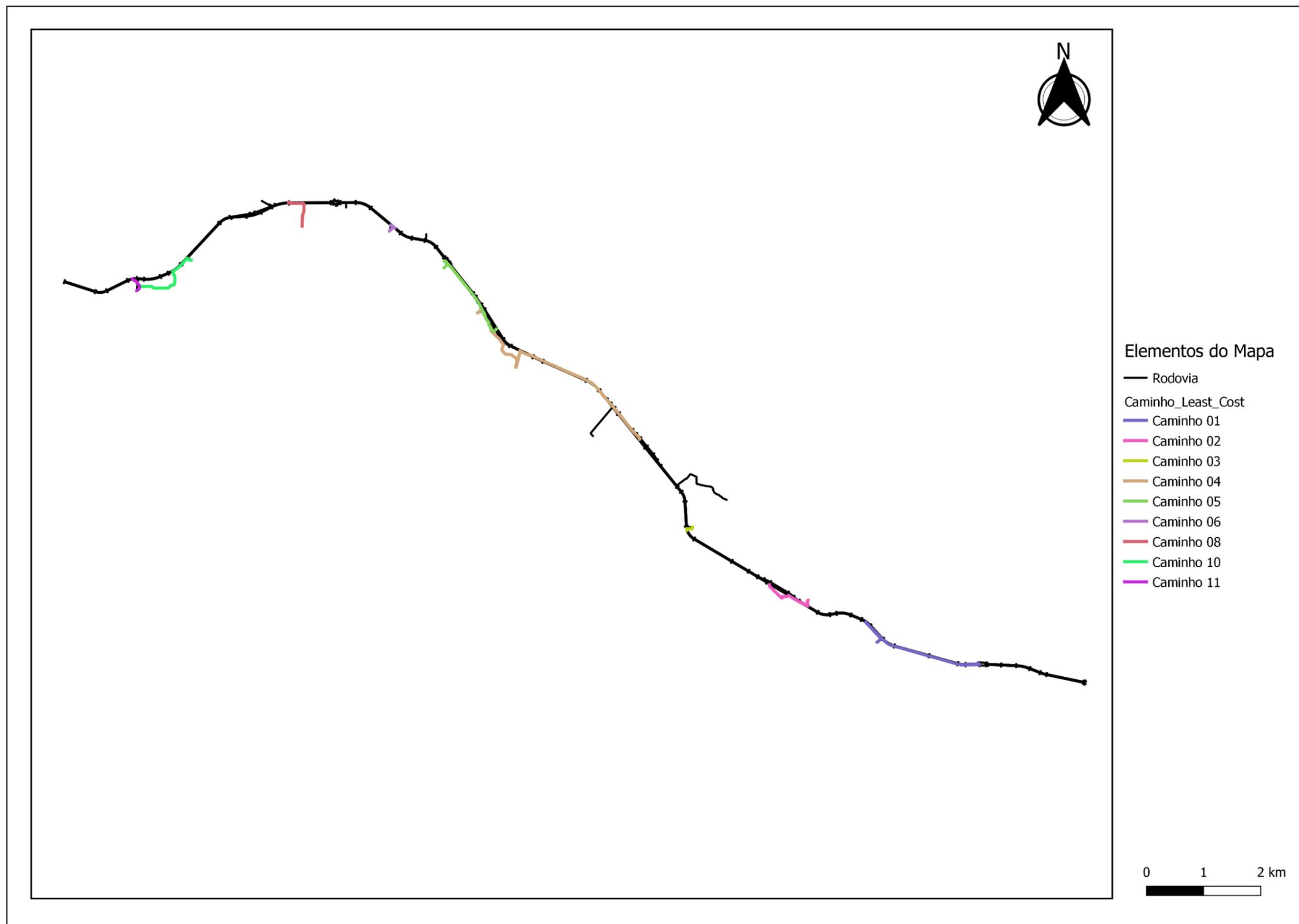
Fonte: A Autora.

## APÊNDICE E – CAMINHOS DE SERVIÇO DE MENOR DISTÂNCIA



Fonte: A Autora.

## APÊNDICE F – CAMINHOS DE SERVIÇO GERADOS PELO ALGORITMO DE LEAST-COST PATH



Fonte: A Autora.