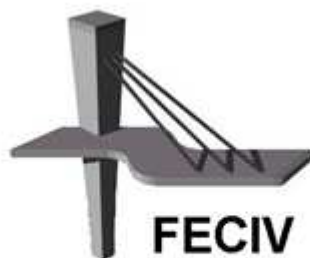


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**OBTENÇÃO DE TRAÇADO GEOMÉTRICO
PRELIMINAR DE ESTRADAS UTILIZANDO
SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**

ÁDILA BATISTA DE SOUZA

UBERLÂNDIA, 31 de julho de 2018.



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Ádila Batista de Souza

**OBTENÇÃO DE TRAÇADO GEOMÉTRICO
PRELIMINAR DE ESTRADAS UTILIZANDO SISTEMAS
DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Camilla Miguel Carrara Lazzarini

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

Uberlândia, 31 de julho de 2018.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S729o
2018 Souza, Ádila Batista de, 1991-
Obtenção de traçado geométrico preliminar de estradas utilizando sistemas de informação geográfica [recurso eletrônico] / Ádila Batista de Souza. - 2018.

Orientadora: Camilla Miguel Carrara Lazzarini.
Coorientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1206>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. 2. Rodovias - Projetos. 3. Estradas. 4. Sistemas de informação geográfica. I. Lazzarini, Camilla Miguel Carrara, 1980-, (Orient.). II. Schmidt, Marcio Augusto Reolon (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: 34 3239-4137 - www.feciv.ufu.br/ppgec - posgradcivil@ufu.br



ATA

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE C

ATA Nº: 219/2018

CANDIDATA: Ádila Batista de Souza N.º Matrícula: 11622ECV001

ORIENTADORA: Prof.ª Dr.ª Camilla Miguel Carrara Lazzarini

TÍTULO: "Obtenção de traçado geométrico preliminar de estradas utilizando Sistemas de Informação Geográfica".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Engenharia Urbana

PROJETO DE PESQUISA: Logística

DATA DA DEFESA: 31 de julho de 2018

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 09:05/10:42

Reuniu-se na Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGE C, assim composta pelos Professores Doutores: Jorge Luis Silva Brito - IG/UFU; Daniel Anijar de Matos - FAENG/UFMS e Prof.ª Dr.ª Camilla Miguel Carrara Lazzarini - FECIV/UFU orientadora da candidata. Ressalta-se que o Prof. Dr. Daniel Anijar de Matos participou da banca via webconferência da cidade de Campo Grande/MS e os demais membros da banca e a aluna participaram in loco.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa Prof.ª Dr.ª Camilla Miguel Carrara Lazzarini apresentou a Comissão Examinadora e concedeu à discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, a senhora presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata APROVADA. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Membros titulares:

Prof.ª Dr.ª Camilla Miguel Carrara Lazzarini - FECIV/UFU

Prof. Dr. Daniel Anijar de Matos - FAENG/UFMS

Prof. Dr. Jorge Luis Silva Brito – IG/UFU

Uberlândia, 31 de julho de 2018.



Documento assinado eletronicamente por Camilla Miguel Carrara Lazzarini, Presidente de Comissão, em 02/08/2018, às 11:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Daniel Anijar de Matos, Usuário Externo, em 07/08/2018, às 15:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Jorge Luis Silva Brito, Professor(a) do Magistério Superior, em 07/08/2018, às 20:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 0572704 e o código CRC FCC85033.

*Deus nos concede, a cada dia,
uma página de vida nova no livro do tempo.
Aquilo que colocarmos nela,
corre por nossa conta.*

Chico Xavier

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter guiado o desenvolvimento deste trabalho, uma vez que em vários momentos o cansaço e as dificuldades encontradas conduziram-me ao pensamento de desistência.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, em especial à Faculdade de Engenharia Civil e todos seus colaboradores, que tornaram este trabalho possível pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. À professora orientadora Dr. Camilla Miguel Carrara Lazzarini pelo apoio, compreensão e incentivo durante toda a realização desse trabalho, que mesmo em seus momentos pessoais de descanso, nunca deixou de atender minhas persistentes dúvidas. Ao professor coorientador Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt que contribuiu e participou incessante e pacientemente da evolução desta pesquisa, sem sua ajuda os resultados obtidos não seriam possíveis.

Agradeço à minha família, minha mãe Maria José, meu pai Wilson e minha irmã Tamires pelo suporte e por sempre acreditarem que eu seria capaz. Agradeço ao Raul, sem sua ajuda esse trabalho não aconteceria.

E por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento desse trabalho, em especial aos profissionais que participaram do questionário e que ajudaram no fornecimento de dados utilizados nesse estudo.

Souza, A. B. Obtenção de Traçado Geométrico Preliminar de Estradas Utilizando Sistemas de Informação Geográfica. 2018. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

RESUMO

Nas etapas iniciais de desenvolvimento de projeto de uma nova estrada, a seleção do melhor traçado preliminar reflete na redução de custos e consumo de tempo conforme o avanço do projeto ao estágio de detalhamento e finalmente à execução da obra. O processo tradicional de desenvolvimento e escolha deste traçado é conduzido por meio de análises simplistas e visuais baseadas, em geral, na topografia, hidrologia e geologia da região em estudo. Além disso, ele consiste em um método de tentativas sujeito ao senso e experiência do projetista, o que requer grande consumo de tempo, torna-o subjetivo e muito susceptível a erros. Assim, a automatização deste processo mostra-se bastante eficiente na obtenção de traçados geométricos preliminares e, devido à alta sensibilidade dos custos de construção e operação em relação a geografia da área, o SIG (Sistemas de Informação Geográfica) tornou-se um grande aliado neste contexto. Este estudo visou a obtenção de um traçado preliminar por meio de análises espaciais utilizando o SIG como ferramenta de apoio a tomada de decisão. Foram considerados quatro critérios no processo de obtenção do traçado preliminar, sendo eles, redução do comprimento total da estrada, restrições ambientais, custos de desapropriação e declividade. O modelo foi aplicado em um estudo real na região entre os municípios de Uberlândia e Araguari no estado de Minas Gerais, e visou-se a comparação do traçado final obtido com a rodovia já existente entre as duas cidades.

Palavras-chave: Traçado preliminar – Traçado otimizado – Otimização - SIG - AHP – Roteirização

Souza, A. B. Obtenção de Traçado Geométrico Preliminar de Estradas Utilizando Sistemas de Informação Geográfica. 2018. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

In the roadway planning and design initial stages, selecting the best preliminary alignment reflects in the costs reduction and time consumption as the project progresses to detail design and, lately, to the construction stage. The alignment development process is traditionally carried out through a simplistic way strongly based on visual analyzes and design personal experience of the engineer. Moreover, it is mainly a trial and error process due to the work being conducted by the sense and experience of the engineer, which becomes time consuming and very subjective. Thus, the automation of this process proved to be quite efficient in obtaining optimized preliminary roadway alignment and, since the construction and operation costs are sensitive to geography, GIS (Geographic Information Systems) has become a great ally in this context. This research aimed to obtain a preliminary roadway alignment through a GIS spatial analysis as a tool to support decision making. Four criteria were considered in the process: minimizing the overall roadway length, environmental constraints, right of way costs and land slope. The model was applied in a real case study in the region between Uberlândia and Araguari in the state of Minas Gerais, Brazil. The roadway alignment obtained was compared to the existing highway.

Keywords: Preliminary alignment – Optimization - GIS - AHP - Routing

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SIGLAS

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

AHP - *Analytical Hierarchic Process*

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	- Cálculo do autovalor máximo.....	51
-----------	------------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arquitetura do SIG.....	24
Figura 2 - Etapas envolvidas no desenvolvimento de um SIG.....	25
Figura 3 - Representação dos dados geográficos de um SIG.....	26
Figura 4 - Camadas de informação sobrepostas.....	27
Figura 5 - Representação vetorial e matricial de um mapa esquemático.....	28
Figura 6 - Elementos geométricos de uma estrada.....	29
Figura 7 - Elementos geométricos axiais.....	30
Figura 8 - Principais etapas envolvidas em um projeto de engenharia de estrada.....	33
Figura 9- Representação da área de estudo em malha quadrangular inserida em um plano cartesiano.....	38
Figura 10- Representação do terreno e do perfil ótimo da rodovia em um sistema de coordenadas cartesianas.....	38
Figura 11 – Exemplo de horizontal ótimo.....	40
Figura 12 - Vista Tridimensional do Terreno.....	41
Figura 13 - Alinhamento Horizontal Ótimo obtido por Jong e Schonfeld (2003).....	42
Figura 14 - Espaço de pesquisa utilizado no estudo de caso com mapa real.....	44
Figura 15 - Alinhamento ótimo obtido na 101ª geração do estudo de caso com mapa real....	44
Figura 16 - Alinhamentos obtidos nas otimizações de Abdelrazig e Moses (2015).....	47
Figura 17- AHP utilizada em análises multicriteriais em ambiente SIG na área de recursos hídricos.....	48
Figura 18- Matriz de comparação pareada ou matriz dominante.....	50
Figura 19 - Escala de comparações do AHP.....	50
Figura 20- Caso genérico para a determinação dos pesos.....	51
Figura 21 – Valores de IR para matriz de ordem n.....	52
Figura 22- Mapas de situação de Uberlândia e Araguari, MG.....	53
Figura 23- Imagem da área de estudo.....	55
Figura 24- Seções transversais de pavimento em terreno plano e em corte.....	57
Figura 25- Fluxograma das etapas a serem executadas nesta pesquisa.....	58
Figura 26- Imagem Sentinel-2 da área de estudo.....	60
Figura 27- Janela do complemento SPC.....	61
Figura 28- Raster restrições ambientais classificado.....	63

Figura 29- Raster restrições ambientais reclassificado.....	65
Figura 30- Mapa geológico da área de estudo.....	66
Figura 31- Propriedades rurais certificadas pelo INCRA.....	67
Figura 32- Propriedades rurais da área de estudo.....	68
Figura 33- Propriedades rurais e áreas de benfeitorias da área de estudo.....	70
Figura 34- Faixas de regiões equivalentes de distribuição de pesos referentes ao valor imobiliário do terreno.....	70
Figura 35- Tabela de atributos da camada vetorial desapropriações.....	71
Figura 36- Raster desapropriação.....	72
Figura 37- MDE da área de estudo.....	73
Figura 38- Raster de declividade da área de estudo.....	74
Figura 39- Janela do comando ' <i>r.reclass</i> ' do GRASS.....	75
Figura 40- Raster declividade reclassificado.....	76
Figura 41- Questionário para aplicação do método AHP.....	77
Figura 42- Esquema de ponderação das camadas em ambiente SIG.....	78
Figura 43- Ferramenta 'calculadora raster' do QGis – Cenário 1.....	79
Figura 44- Janela do comando ' <i>r.cost,points</i> ' do GRASS.....	80
Figura 45- Janela do comando ' <i>Least Cost Paths</i> ' do SAGA.....	81
Figura 46- Mapa de potenciais áreas a receberem o traçado preliminar da estrada.....	84
Figura 47- Traçado geométrico preliminar obtido – Cenário 1.....	86
Figura 48- Traçado existente e traçado preliminar obtido no Cenário 1.....	87
Figura 49- Mapa de potenciais áreas a receberem o traçado preliminar da estrada com ponderação dos critérios pelo método AHP.....	89
Figura 50- Mapa de potenciais áreas para a locação do traçado preliminar – Cenários 1 e 2.....	89
Figura 51- Traçado geométrico preliminar obtido – Cenário 2.....	90
Figura 52- Traçados geométricos preliminares obtidos – Cenário 1 e Cenário 2.....	91
Figura 53- Traçados obtidos nos Cenários 1 e 2 e rodovia BR-050 existente.....	93
Figura 54- Traçados geométricos preliminares obtidos – Cenário 1 e Cenário 2.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tabela de características de projeto da área de estudo.....	54
Tabela 2- Coordenadas planas dos Pontos Inicial e Final.....	55
Tabela 3- Reclassificação do raster restrições ambientais.....	63
Tabela 4- Parametrização da camada desapropriações.....	71
Tabela 5- Parametrização do raster declividade.....	74
Tabela 6- Ponderação obtida pela AHP a partir dos especialistas.....	82
Tabela 7- Comparação dos comprimentos dos Cenários 1 e 2 e BR-050 existente.....	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Componentes de custos que contribuem para a locação de uma rodovia.....	37
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Objetivos.....	20
<i>1.1.1. Objetivo Geral.....</i>	<i>20</i>
<i>1.1.2. Objetivos Específicos.....</i>	<i>20</i>
1.2. Justificativa.....	21
1.3. Estrutura da Pesquisa.....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	23
2.2. Projetos Geométricos de Estradas.....	29
<i>2.2.1. Definições.....</i>	<i>30</i>
<i>2.2.2. Classificação Técnica de Rodovias.....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.3. Estudos preliminares de traçados.....</i>	<i>32</i>
2.3. Otimização de Projetos Geométricos de Estradas.....	34
<i>2.3.1. Otimização de projetos geométricos de estradas antes do SIG.....</i>	<i>34</i>
<i>2.3.2.. Otimização de projetos geométricos de estradas inserindo SIG.....</i>	<i>37</i>
2.4. Análises Multicriteriais em Ambiente SIG.....	48
3. METODOLOGIA.....	51
3.1. Área de Estudo.....	53
3.2. Métodos.....	53
<i>3.2.1. Elaboração do Raster Restrições Ambientais.....</i>	<i>60</i>
<i>3.2.2. Elaboração do Raster Desapropriações.....</i>	<i>66</i>
<i>3.2.3.Elaboração do Raster Declividade.....</i>	<i>72</i>
<i>3.2.4. Aplicação de AHP para Análise de Tomada de Decisão.....</i>	<i>76</i>
<i>3.2.5. Elaboração dos Mapas Finais de Áreas Aptas.....</i>	<i>78</i>
<i>3.2.6. Aplicação de Ferramenta de Roteirização.....</i>	<i>79</i>
4. RESULTADOS, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	82
4.1. Resultados.....	82
<i>4.1.1. Pesos Obtidos pelo Método AHP.....</i>	<i>82</i>
<i>4.1.2. Cenário 1.....</i>	<i>83</i>
<i>4.1.3. Cenário 2.....</i>	<i>88</i>

4.2. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	94
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O projeto final de engenharia de uma estrada é constituído por um conjunto de diversos outros projetos, que, unidos e compatibilizados, tornam a obra exequível conforme as condições reais do local e padrões estabelecidos por normas vigentes. Fazem parte deste conjunto de projetos, principalmente, o projeto geométrico, projeto de terraplenagem, projeto de drenagem e projeto de pavimentação. Destes, o projeto geométrico é o ponto inicial para o desenvolvimento dos demais.

O projeto geométrico de uma estrada consiste de fato no traçado geométrico desta dentro de uma área definida, onde o objetivo é a união entre dois pontos, inicial e final, que geralmente são as cidades. Além disso, entende-se por projeto geométrico o processo de correlacionar os seus elementos físicos com características de operação, frenagem, aceleração, segurança e conforto do usuário (FILHO, 1998).

Nos estágios iniciais de planejamento de uma rodovia é de extrema importância a tomada de decisões corretas, uma vez que a seleção do melhor traçado preliminar apresenta menor custo e consumo de tempo conforme o avanço do projeto ao estágio de detalhamento, em que há menor flexibilidade para alterações (JONG, 1998). Nos projetos de engenharia é possível optar-se, em geral, por uma alternativa dentre as diversas soluções apontadas, porém, nos projetos de estradas, a indeterminação é expressivamente maior. Isso se deve ao fato da infinidade de possibilidades de traçados interligando dois pontos distintos.

De acordo com Jong (1998), inicialmente, um conjunto de possíveis traçados preliminares (alinhamentos vertical e horizontal), são desenvolvidos manualmente ou com ajuda de programas computacionais. Porém, para a seleção e obtenção do traçado preliminar final de uma estrada, um processo repetitivo de tentativas e erros é conduzido, em que, para as melhores opções de traçados desenvolvidas checa-se a concordância entre seus alinhamentos verticais e horizontais até que estes se harmonizem obedecendo os parâmetros exigidos pelas

normas vigentes, que no Brasil, são prescritos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Após o refinamento de todos os traçados desenvolvidos, um traçado preliminar final é então conduzido a estimativa de custos. A decisão final para a seleção dos alinhamentos depende dos custos de desapropriações, custos de construção, custos de terraplenagem, impactos ambientais, custos de manutenção e custos de operação.

A etapa que envolve a geração de possíveis traçados, compatibilização dos alinhamentos horizontal e vertical, seleção do traçado preliminar final e então computação dos custos, gera um alto consumo tempo do projetista. Assim, a utilização de ferramentas computacionais tornou-se uma grande aliada nesse processo. Inicialmente, foram conduzidos os primeiros estudos introduzindo uma codificação em *softwares* que possibilitaram as análises separadas entre alinhamentos verticais e horizontais caracterizados como funções polinomiais cúbicas, caminhando posteriormente, para a transformação do espaço explorado em planos e superfícies, caracterizados como grids, até finalmente analisar-se os alinhamentos verticais e horizontais simultaneamente. Nesse mesmo tempo, os grandes desafios encontrados foram a inserção de parâmetros técnicos de projetos e a apuração de funções para determinação dos custos dentro das análises, possibilitando assim, a comparação das diversas possibilidades de traçado e identificação das que fornecem menores custos de construção, terraplenagem, manutenção e operação, obedecendo ao mesmo tempo as exigências normativas e respeitando restrições ambientais.

Desta forma, segundo Jha e Schonfeld (2000a), otimização de projeto de estrada é um processo computadorizado que minimiza uma função objetivo composta por todos os custos sensitivos e dominantes, sujeitos a um conjunto de restrições de projeto como, curvatura, inclinações e distância de visibilidade, fornecendo como produto traçados suaves. Uma vez que os custos de desapropriação e os custos relacionados às obras de terraplenagem e drenagem são altamente sensíveis à geografia da região, a aplicação de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) como técnica de apoio na otimização de projetos geométricos de estradas, fez-se bastante eficiente para soluções de alinhamentos preliminares na fase de planejamento de rodovias.

A partir do ano 2000 tiveram início os primeiros estudos incorporando SIG aos problemas de automatização da elaboração de projetos geométricos de estradas e esta ferramenta destacou-se por propiciar a análise de problemas em espaços geográficos altamente

irregulares. Com a utilização do SIG é possível a representação espacial de propriedades, áreas inundáveis, regiões de solo de baixa resistência, Áreas de Proteção Ambiental (APA) ou Áreas de Preservação Permanente (APP), corpos hídricos e outras características geográficas que possuem relação estreita com os modelos de custo de uma estrada (JHA e SCHONFELD, 2000b). Além disso, é possível inserir informações referentes ao relevo, as elevações da superfície, o que possibilita uma análise simultânea entre os alinhamentos horizontal e vertical.

O termo Sistemas de Informação Geográfica é frequentemente aplicado a tecnologias computacionais orientadas a manipulação de dados geográficos, caracterizando-se por propiciar a interação entre usuário, *software* e dados espaciais.

Segundo Maguire e Dangermond (1991), SIG são sistemas integradores que agrupam ideias desenvolvidas em várias áreas diferentes, incluindo agricultura, computação, matemática, engenharia, fotogrametria, economia, e é claro, geográfica, além de outras. Além disso, os SIG têm a capacidade de tratar e analisar as relações espaciais entre diversos dados geográficos por meio de diferentes algoritmos, demonstrando os resultados através de visualizações.

No Brasil, a bibliografia correspondente ao uso dos SIG na área de Engenharia de Transportes é escassa e não consolidada. Já existe sua utilização, especialmente em problemas de roteirização, porém, não há aplicação sólida com foco em projetos geométricos.

Assim, esta pesquisa parte da hipótese de que o uso de SIG como ferramenta de análise espacial e roteirização auxilia na determinação de áreas mais propícias a receberem novas rodovias baseados em critérios próprios, com a redução da subjetividade do processo ao aplicar a técnica *Analytical Hierarquic Process* (AHP). Para isso, foram modelados os critérios de distâncias, declividades e custos mínimos e especialistas ponderaram as importâncias relativas em comparação com a ponderação linear. Os resultados foram roteirizados por algoritmos de menor custo resultando em diferentes traçados ótimos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é a obtenção de um traçado geométrico preliminar em ambiente SIG considerando redução do comprimento total da estrada, restrições ambientais, custos de desapropriação e declividade do terreno como fatores de otimização de rota.

1.1.2. Objetivos Específicos

- 1) Modelagem e parametrização de restrições ambientais, custos de desapropriação e declividade do terreno, afim de se obter a variação da sensibilidade de áreas propícias a receberem a locação do traçado preliminar de uma estrada;
- 2) Ponderação e equacionamento das camadas modeladas pelo método *Analytical Hierarchic Process* (AHP) com auxílio de especialistas;
- 3) Obter traçado de menor comprimento entre os Pontos Inicial e Final sobre a camada ponderada;
- 4) Comparação do traçado geométrico preliminar obtido com o traçado da rodovia existente, em termos de comprimento e suavidade.

Ressalta-se que o traçado geométrico preliminar visado se refere a obtenção da possível melhor rota para a passagem de uma rodovia, e não aos alinhamentos vertical e horizontal já concordados. Por isso, o objetivo desta pesquisa é desenvolver uma metodologia que possa ser utilizada durante a fase de desenvolvimento de projetos preliminares de estradas. Além disso, o termo otimização de projetos geométricos que será abordado na Revisão Bibliográfica deste trabalho, refere-se à modelos automatizados com o desenvolvimento profundo de funções custos para o processamento de dados e geração de resultados, diferentemente desta pesquisa, que tem como objetivo uma análise meramente espacial.

1.2. Justificativa

As inúmeras vantagens que o avanço contínuo da tecnologia traz nos diversos setores de serviços, tem causado, em especial no campo das engenharias, um estímulo no investimento para a criação e aperfeiçoamento de programas computacionais capazes de reduzir o consumo de tempo e minimização de erros nas fases de planejamento, projeto e construção de qualquer tipo de obra.

Segundo Jha e Karry (2007), o método tradicional manual de desenvolvimento dos alinhamentos horizontal e vertical de projetos geométricos de uma nova estrada, pode causar a omissão de alguma informação crítica, pelo fato de que estes projetos geométricos são feitos separadamente um do outro, em planos de duas dimensões (2D). Por exemplo, o engenheiro projetista pode não ser capaz de identificar um efeito de ilusão causado quando uma curva horizontal aparece simultaneamente sobre uma curva vertical. Além disso, o processo inicial de seleção de traçados preliminares é um processo iterativo, repetitivo e sujeito a erros, o que o torna longo e exaustivo para o engenheiro projetista que o executa. Assim, o desenvolvimento de *softwares* computacionais capazes de conduzir os projetos nesta etapa inicial em modelos tridimensionais resulta em grande economia de tempo e maior confiabilidade no traçado preliminar final obtido.

Observa-se que em países desenvolvidos, especialmente nos Estados Unidos, vários estudos têm sido conduzidos neste campo. Desde meados da década de 70, pesquisadores iniciaram a codificação para o desenvolvimento de traçados preliminares em *softwares*, avançando então, após o ano 2000, para a utilização de uma ferramenta que se mostrou a melhor aliada, até então, na otimização de projetos geométricos, o SIG. Porém, no Brasil, poucos estudos são encontrados com respeito a este assunto, e observa-se na prática dos projetistas de estradas, a ausência de ferramentas computacionais ou metodologias nacionais capazes de aprimorar o processo de obtenção de traçados preliminares.

1.3. Estrutura da Pesquisa

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- O Capítulo 1 apresenta uma introdução e contextualização do assunto abordado, além de apontar os objetivos gerais e específicos e justificativa do trabalho;
- O Capítulo 2 traz um estudo bibliográfico abordando os conceitos e definições mais utilizados nesta pesquisa, e os principais estudos existentes sobre a otimização de projetos geométricos apresentados em ordem cronológica;
- O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada neste trabalho expondo o estudo de caso real no qual ela foi aplicada;
- No Capítulo 4 são detalhados os resultados e conclusões obtidas nesta pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Sistemas de Informação Geográfica, são sistemas de informação construídos para armazenar, analisar e manipular dados espaciais, ou seja, dados que se referem a objetos ou fenômenos cujo o posicionamento geográfico consiste em uma característica inerente e indispensável (CÂMARA *et. al*, 1996).

SIG desenvolveram-se rapidamente desde a década de 1970, e hoje, eles são amplamente utilizados em todas as partes do mundo e possuem diversas aplicações diferentes, podendo citar entre elas, segundo Burrough e Mcdonnel (2009):

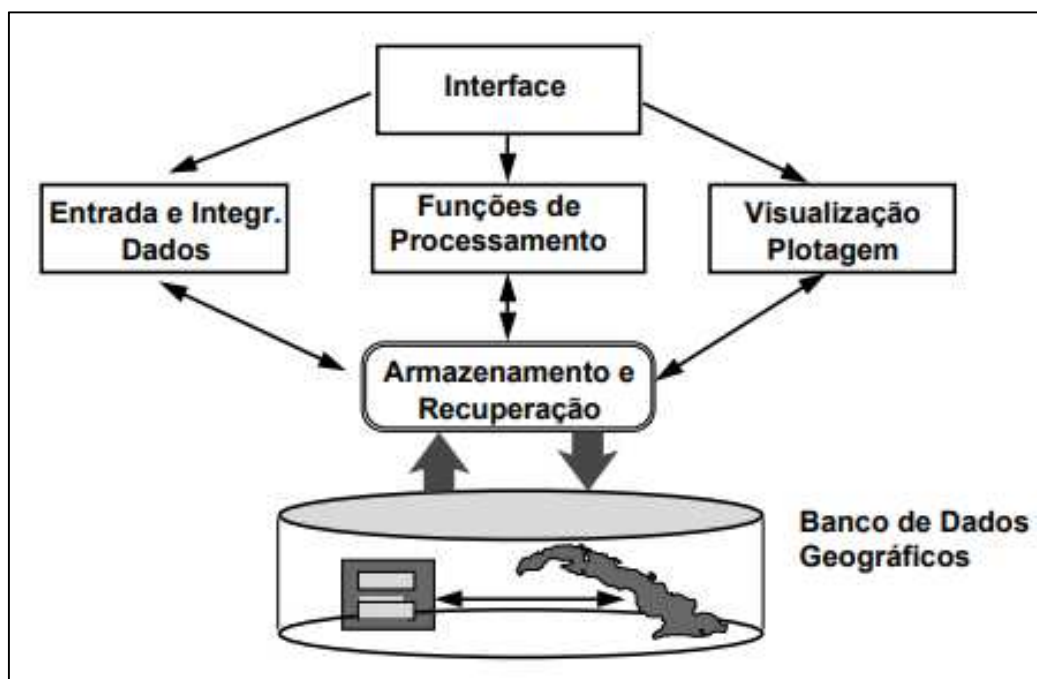
- Planejamento urbano: para investigação de crescimento populacional urbano, especificamente em áreas de subúrbio, e na compreensão das razões que motivam tal crescimento;
- Biologia: investigação de impactos causados sobre a população de determinadas espécies devido ao corte e queima de vegetação nativa, e como estes impactos ameaçam essas populações a longo prazo;
- Geologia: identificação de melhores locações para a construção de edifícios em áreas sujeitas a terremotos;
- Recursos hídricos: estudo dos parâmetros de qualidade da água em diferentes pontos dentro de um lago, para a averiguação da distribuição de algas e como essa distribuição tem se modificado ao longo dos anos.

Segundo Burrough e Mcdonnel (2009), em todas as aplicações citadas, os dados manipulados para as análises constituem dados geográficos, ou seja, as questões estão relacionadas à onde estão os objetos, ou onde eles estavam ou estarão em situações futuras

com relação à pontos localizados sobre a superfície terrestre. Neste contexto, um SIG busca a coleta, o armazenamento e a análise de objetos e fenômenos, em que sua localização geográfica constitui uma característica significativa ou até mesmo crítica para a análise (ARONOFF, 1989).

Uma definição que distingue um sistema mais automatizado é apresentada por Cowen (1988), em que SIG é definido como, um sistema composto por *hardware*, *software* e procedimentos desenvolvido para sustentar a captura, gestão, manipulação, análise, modelação e visualização de informação referenciada no espaço geográfico, objetivando pela realização de operações espaciais, a resolução de problemas complexos de planejamento e gestão. Desta forma, a arquitetura de um SIG é resumida como a promoção de interface entre usuários e um determinado tipo de problema por meio da manipulação e processamento de diversas funções que utilizam como base um banco de dados geográficos, conforme é demonstrado na Figura 1.

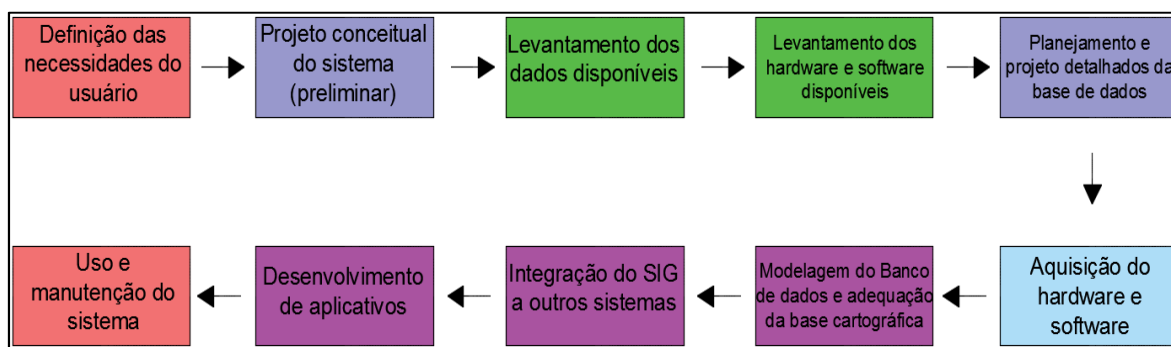
Figura 1 – Arquitetura do SIG.



Fonte: Câmara *et al.* (2009).

O fluxograma apresentado na Figura 2 resume as diversas etapas envolvidas no processo de desenvolvimento de um SIG e o seu entendimento é fundamental para o alcance do sucesso em qualquer das áreas que ele seja aplicado.

Figura 2 – Etapas envolvidas no desenvolvimento de um SIG.



Fonte: Autora (2018), modificado de Berry (2007).

Como se observa na Figura 2, o primeiro passo para a elaboração e desenvolvimento de um SIG é a definição e entendimento das reais necessidades do usuário, afinal, em geral, o uso final do sistema retornará às mãos dele, que é quem o manuseará depois de pronto. Sendo assim, atualmente a preocupação dominante durante o desenvolvimento de um SIG centra-se nos usuários. E isto é estimulado pela grande oferta de dados privados e públicos, pagos e gratuitos, com acessos restritos e livremente distribuídos por diferentes agências governamentais e entes privados.

Com foco nos dados, conforme Câmara *et al.* (1996), o termo ‘dato espacial’ descreve fenômenos aos quais alguma dimensão espacial esteja associada. No contexto de SIG, os dados espaciais são os dados georreferenciados ou dados geográficos, ou seja, aqueles que possuem uma coordenada estabelecida sobre a superfície da Terra.

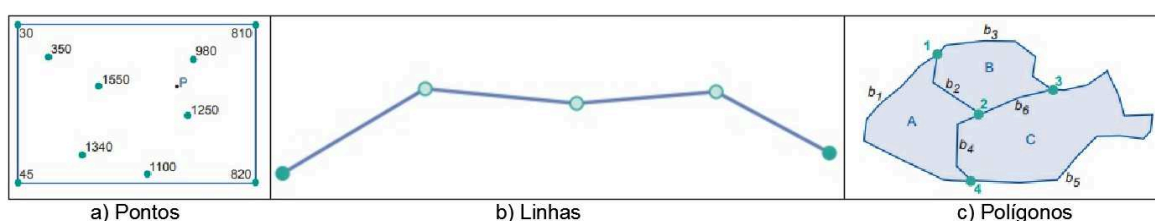
Segundo Aronoff (1989), os dados geográficos são caracterizados por três componentes fundamentais:

- 1 – Características não espaciais: que pode descrever o fenômeno, como o nome e o tipo de variável, por exemplo;
- 2 – Características espaciais: sua localização no espaço georreferenciado;
- 3 – Características temporais: identificação do tempo ao qual os dados foram coletados e a validade de sua manipulação.

A distribuição espacial dos dados geográficos pode ser apresentada em uma, duas ou três dimensões. Aronoff (1989) afirma que os dados geográficos são representados como:

- Pontos: utilizados para a representação da localização geográfica de feições muito pequenas, por exemplo, a sede de uma fazenda;
- Linhas: consiste em uma cadeia de pontos ordenados e conectados empregados para representar feições muito estreitas para se mostrar como uma área, como, por exemplo, rios ou estradas;
- Polígonos: que são regiões limitadas por linhas, podendo ser, fazendas, florestas, represas e lagos, conforme apresenta Figura 3.

Figura 3 – Representação dos dados geográficos de um SIG.



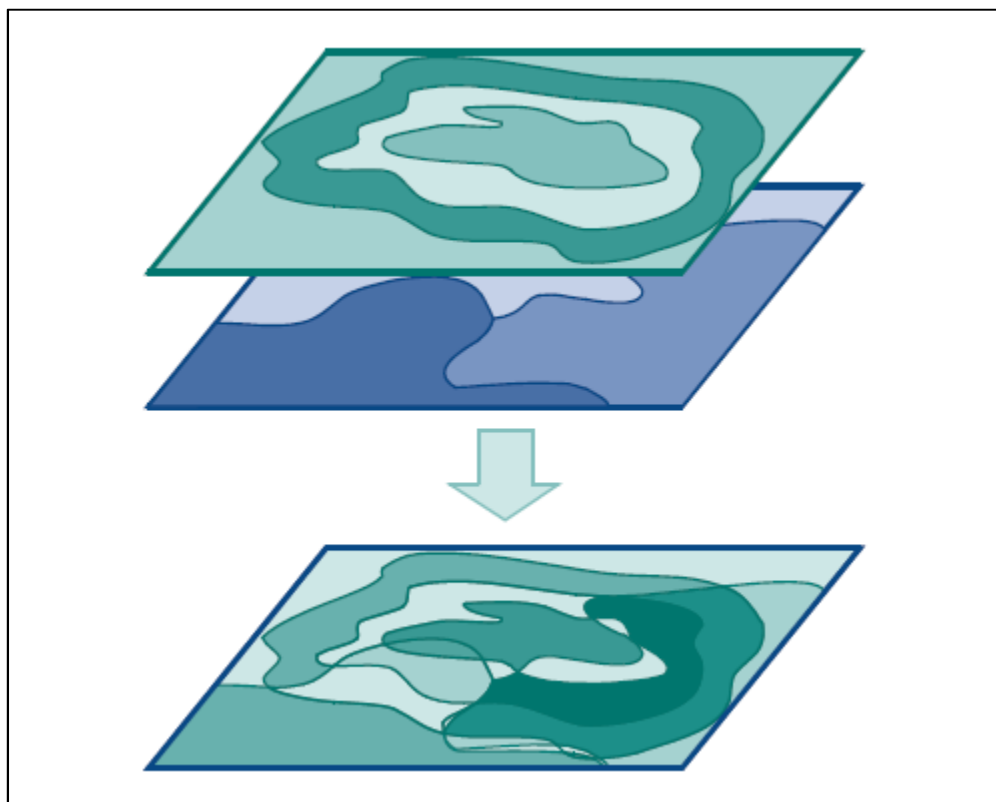
Fonte: Autora, adaptado de Burrough e McDonnell (2009).

Além destes elementos separadamente, os dados geográficos podem ser representados por mapas, que são constituídos por pontos, linhas e polígonos agrupados como um único elemento.

Ainda de acordo com Aronoff (1989), os dados geográficos possuem quatro componentes principais com relação à sua natureza, sendo eles, posição geográfica: o dado deve ter uma localização especificada de acordo com um sistema de coordenadas; atributos: informações qualitativas do dado geográfico – pode, na maioria das vezes, não representar informação sobre localização; relações espaciais entre os dados geográficos: são inúmeros, muitas vezes imprecisos, e dependem do contexto, por exemplo, “perto”, “a direita de”; e tempo: a informação geográfica está associada a um tempo ou determinado período de tempo.

Tornou-se comum a associação de dados geográficos de um SIG a um conjunto de mapas sobrepostos e georreferenciados em uma projeção cartográfica comum a todos eles. Cada um destes mapas contém um tipo de dados ou temática que representa uma camada, cobertura ou nível de informação. As camadas são sobrepostas afim de, após sua manipulação, serem comparadas para a geração de resultados analíticos e visuais, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Camadas de informação sobrepostas.

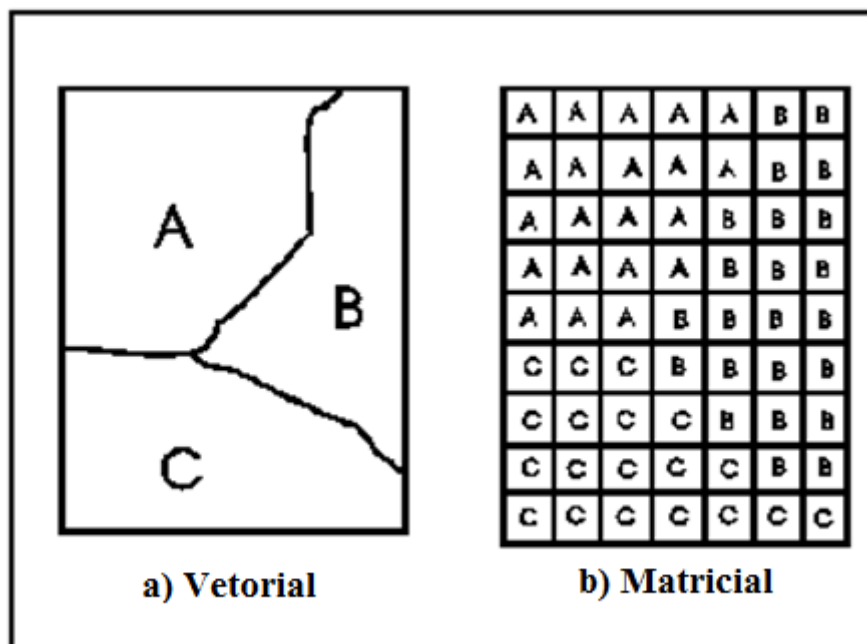


Fonte: Burrough e McDonnel (2009)

Além da estrutura funcional dos dados geográficos, é importante entender sua estrutura computacional, pois sua escolha influenciará na técnica de análise, uma vez que os algoritmos do SIG foram desenvolvidos especificamente para os diferentes tipos de estruturas computacionais existentes. Os dois principais formatos são dados em estrutura vetorial e em estrutura matricial (Figura 5), mais conhecidos frequentemente nos *softwares* de SIG como *rasters*.

No formato matricial, o espaço é dividido em diversas células regulares homogêneas quadradas ou retangulares, também chamadas de *pixels*, em que, para cada uma, é associado alguma característica que representa aquela parte do espaço e sua área representa a resolução espacial disponível (BURROUGH e MCDONNEL, 2009). Em cada célula do arquivo matricial está assinalado apenas um valor que representa uma única característica, por isso são necessárias diversas camadas quando se necessita da análise de diversas características, e em cada uma, é armazenado um atributo diferente. Operações envolvendo essas diversas camadas (matrizes), necessitam ser devidamente processadas para a obtenção de uma correta análise das células de posições correspondentes nos diversos arquivos.

Figura 5 – Representação vetorial e matricial de um mapa esquemático.



Fonte: INPE (2006).

Neste trabalho foi utilizada a estrutura de dados geográficos em forma de matriz (*rasters*), que surgem de fontes de imagem, como imagens de satélite, onde o espaço geográfico pode ser tratado como uma superfície plano-cartesiano. Os dados que precisaram ser vetorizados, ou seja, digitalizados, foram trabalhados inicialmente em formato vetorial e depois convertidos para arquivos em formato matricial.

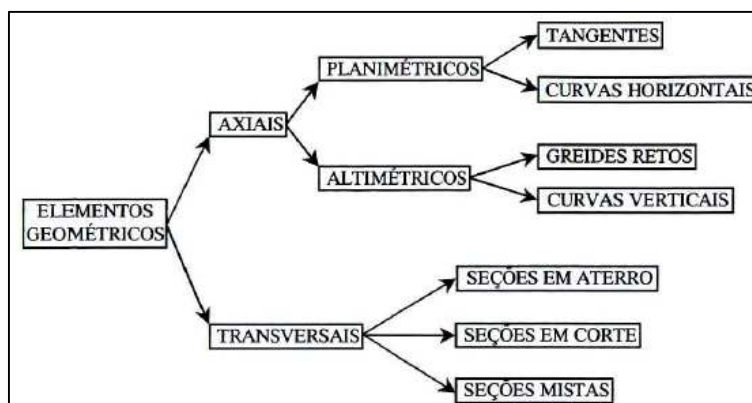
2.2. Projetos Geométricos de Estradas

Conforme Filho (1998), o projeto geométrico de uma estrada é definido como o processo de correlacionar seus elementos físicos com suas características de operação, frenagem, condições de segurança, aceleração, conforto, etc.

Assim, o projeto geométrico de uma estrada consiste na elaboração dos elementos construtivos de uma estrada, que se caracterizam como elementos geométricos, sendo eles, retas e curvas, aliando-os ao conforto e segurança do usuário.

A geometria de uma estrada é definida pelo traçado do seu eixo em planta (alinhamento horizontal) e pelos perfis longitudinal (alinhamento vertical) e transversal. Na Figura 6 estão resumidos os principais elementos geométricos de uma estrada.

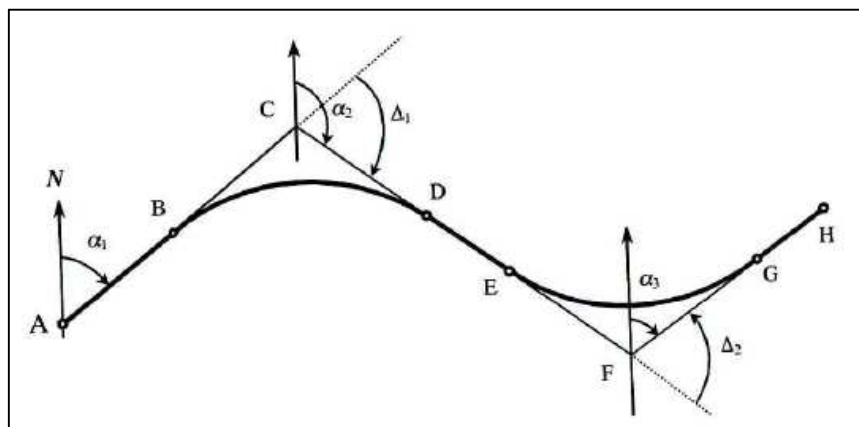
Figura 6 – Elementos geométricos de uma estrada.



Fonte: Filho (1998).

Segundo Filho (1998), o eixo de uma estrada é o alinhamento longitudinal da mesma e se localiza na região central da pista. A apresentação de um projeto em planta consiste na disposição de uma série de alinhamentos retos concordados por curvas de concordância horizontal e sua apresentação em perfil longitudinal consiste também na disposição de uma série de alinhamentos retos, porém concordados por curvas de concordância vertical. Considerando a Figura 7, tem-se os principais elementos geométricos de estradas.

Figura 7 – Elementos geométricos axiais.



Fonte: Filho (1998).

- Os trechos retilíneos AB, DE e GH são definidos como tangentes, em alinhamento horizontal, e rampas, em alinhamento vertical;
- Os trechos retilíneos BC, CD, EF e FG são definidos como tangentes externas;
- Os arcos BD e EG são os desenvolvimentos das curvas;
- Δ_1 e Δ_2 são os ângulos de deflexão das curvas;
- α_1 , α_2 e α_3 são os azimutes dos alinhamentos.

2.2.1. Definições

É importante a definição de alguns termos que serão utilizados no decorrer deste estudo.

Área de Proteção Ambiental (APA): são unidades de conservação, destinadas a proteger e conservar sua qualidade ambiental e seus sistemas naturais visando a melhoria da qualidade de vida da população local e também objetivando a proteção dos ecossistemas regionais (CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO, 2012).

O objetivo principal de uma APA é a conservação de processos naturais e da biodiversidade (fauna e flora), por meio da orientação, desenvolvimento e adequação das várias atividades humanas às características ambientais da área.

Área de Preservação Permanente (APP): consiste em uma área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade ecológica, a diversidade biológica, corredores de flora e fauna, e proteger o solo (CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO, 2012).

O uso de APPs não é permitido, somente é possível sua utilização sob autorização especial do Ibama ou órgão ambiental estadual mediante demonstração da utilidade pública e o interesse social do projeto, caso não haja outras alternativas.

Desapropriação: processo administrativo utilizado pelo poder público para restringir o direito de propriedade de imóveis ou parte destes, porém compensando e evitando perdas patrimoniais dos proprietários, para implantação de um empreendimento cuja necessidade geradora pode ser de utilidade pública ou de interesse social (DNER, 2005).

Recursos hídricos: recurso natural de água em uma região ou bacia hidrográfica, podendo ser superficial ou subterrâneo (DNER, 2005).

Reserva Legal: área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural, com a função de assegurar o uso econômico de modo sustentável dos recursos naturais do imóvel rural, auxiliar a conservação e a reabilitação dos processos ecológicos e promover a conservação da biodiversidade, bem como o abrigo e a proteção de fauna silvestre e da flora nativa (CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO, 2012).

2.2.2. Classificação Técnica de Rodovias

De acordo com o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999), cada trecho de rodovia deveria ter suas características técnicas definidas para atender: volume e composição do tráfego, velocidade, natureza e frequência dos acessos a propriedades lindeiras, jurisdição, situação hierárquica dentro da rede viária, relevo do terreno, etc. Porém, seria impraticável esta definição na realidade, uma vez que o usuário deve encontrar uniformidade na utilização das vias, evitando assim o fator surpresa.

Por isso, os trechos integrantes da malha nacional rodoviária são agrupados em cinco classes de projeto numeradas de 0 a IV, correspondendo os menores números a categorias com maior exigência técnica.

Conforme o manual, os principais critérios usados para definir a Classe de um trecho de rodovia são, a posição hierárquica dentro da classificação funcional, que é caracterizada pelas diversas funções das rodovias rurais, como por exemplo, sistema coletor, sistema arterial e sistema local, o volume médio diário de tráfego, que é a quantidade de veículos mistos que trafega nas rodovias em condições usuais, e o nível de serviço, que está

relacionado à capacidade da rodovia, ou seja, a quantidade de veículos que consegue passar em uma determinada rodovia por unidade de tempo.

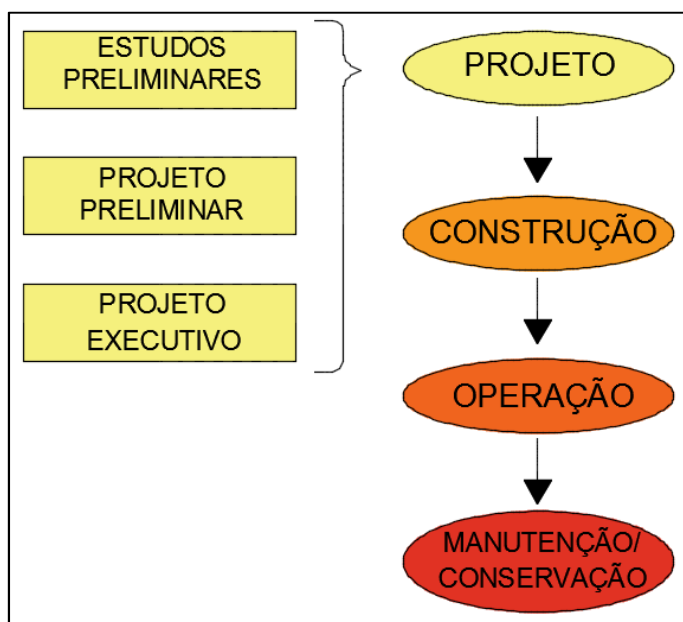
Assim, a Classe 0 engloba rodovias de via expressa do mais elevado padrão técnico, de pista dupla e controle total dos acessos. A Classe I, dividida em I-A e I-B, incorpora rodovias de elevado padrão técnico e controle parcial de acessos, sendo a primeira classe constituída por rodovias de duas pistas e a segunda, por rodovias de pista simples. Na classe II, o volume de tráfego suportado é inferior, sendo esta Classe também, composta por rodovias de pista simples. A Classe III comporta ainda um limite inferior de tráfego, e a Classe IV, possui características técnicas suficientes para atendimento apenas a custo mínimo do tráfego previsto no seu ano de abertura, sendo geralmente não pavimentadas, ambas sendo rodovias de pista simples. A Classe IV também é dividida em duas Classes, sendo elas, Classe IV-A e IV-B, e a diferença entre elas é volume médio diário de tráfego atendido (DNER, 1999).

Outro fator importante quanto à classificação das rodovias, é a caracterização do relevo da região, que tradicionalmente é classificado em três categorias, plano, ondulado e montanhoso. Região de relevo plano é aquela que permite a implantação de rodovias com grandes distâncias de visibilidade, sem dificuldades de construção e sem custos elevados. Regiões onduladas são aquelas que oferecem alguma restrição quanto à implantação dos greides, exigindo frequentes cortes e aterros para sua acomodação. Já em regiões de relevo montanhoso, existem abruptas variações longitudinais e transversais da elevação do terreno em relação à rodovia, onde são frequentemente necessários aterros e cortes laterais das encostas para a implantação de alinhamentos verticais e horizontais aceitáveis.

2.2.3. Estudos preliminares de traçados

As principais etapas envolvidas em qualquer projeto de engenharia são o desenvolvimento de estudos preliminares e projetos, construção, operação e manutenção, que pode ser preventiva ou corretiva, como é demonstrado na Figura 8. Na área de transportes, estas etapas não são diferentes e a elaboração do traçado preliminar de uma estrada é realizada na etapa do desenvolvimento do projeto preliminar.

Figura 8 – Principais etapas envolvidas em um projeto de engenharia de estrada.



Fonte: Autora (2018).

Conforme Filho (1998), diversos fatores influenciam na escolha do traçado preliminar de uma estrada, destacando-se entre eles:

- Topografia da área: pode elevar substancialmente os custos de construção, uma vez que áreas topograficamente acidentadas requerem grandes movimentações de terra na execução de terraplenagem;
- Condições geológicas e geotécnicas do terreno: condições geológicas e geotécnicas desfavoráveis podem inviabilizar a diretriz de uma estrada, já que os custos para estabilização de cortes e aterros em presença de solos moles, rochosos, ou instáveis, são significativamente altos;
- Hidrologia e hidrografia da região: os custos de execução de obras de arte e dispositivos de drenagem são bastante elevados, e em locais que estes dispositivos se mostram indispensáveis devido às condições hidrológicas da região, eles devem ser projetados em locais onde haja sua máxima eficácia, minimizando assim seus custos de construção e manutenção;
- Presença da benfeitoria ao longo da faixa de domínio: pode também inviabilizar o traçado de uma estrada, uma vez que pode elevar substancialmente os custos de desapropriação.

2.3 Otimização de Projetos Geométricos de Estradas

Toda etapa que vai do planejamento e desenvolvimento de projetos de uma estrada até sua construção é constituída por um processo complexo que envolve cinco fases principais: planejamento, projetos preliminares, projetos de detalhamento, aquisição de terrenos para a implantação da faixa de domínio e construção (ABDELRAZIG, 2015). O estudo de locação da estrada, ou seja, o desenvolvimento e escolha das melhores opções de traçado preliminar, é desenvolvido durante a fase de planejamento preliminar. Esta fase de planejamento é uma fase crítica e que pode afetar significativamente todas as outras fases. Por isso, uma boa otimização de projeto de estrada deve considerar todos os custos sensitivos e dominantes, buscar um traçado suave, ou seja, um traçado que respeite todos as restrições técnicas em relação a curvatura das curvas, e trabalhar com as características locais e ambientais em toda a área de pesquisa.

2.3.1. Otimização de projetos geométricos de estradas antes do SIG

Tradicionalmente, os estudos de locação confiam fortemente em julgamentos humanos. Várias alternativas de traçado devem ser exploradas de acordo com aspectos relacionados a restrições de projeto, fatores ambientais, minimização de custos, conforto e segurança do usuário. Uma ferramenta computacional para comparar e compatibilizar as alternativas de alinhamento vertical e horizontal reduziria significativamente o consumo de tempo e de recursos para obtenção do traçado de menor custo, ou de maior benefício, considerando tais restrições.

Neste contexto, as primeiras tentativas de utilização de ferramentas computacionais para a geração de traçados preliminares ocorreram na década de 60 com programação dinâmica. O'Brien e Bennetti (1969) desenvolveram um algoritmo de programação dinâmica modificado que utiliza uma malha retangular para a geração de alinhamentos verticais ótimos com respeito aos custos de construção, manutenção, e operação além de obedecer a restrições relacionadas ao greide, raios de curvatura e locação. A melhor locação de traçado é selecionada com respeito ao menor caminho percorrido dentro da malha. O modelo de programação dinâmica em uma malha retangular não foi capaz de produzir alinhamentos suaves, além de demonstrar claramente a impossibilidade da obtenção de curvas orientadas para trás (conhecidas na literatura como '*backtracking alignments*'), o que pode ser requerido para o alinhamento ótimo em determinadas situações, como, por exemplo, em

regiões de relevo montanhoso ou bastante acidentado. Além disso, devido a limitação da capacidade dos computadores da época, a programação dinâmica na resolução de problemas de alinhamentos verticais e horizontais simultaneamente era um problema até então não resolvido.

Nicholson, Elms e Willian (1976) trouxeram uma melhoria com a sugestão de um modelo em dois estágios. Primeiramente, é utilizado o modelo de programação dinâmica para a seleção de faixa de interesse dentro de uma região viável, e depois, é feito um refinamento com um segundo modelo baseado em cálculo variacional para obtenção do traçado ótimo. A utilização do cálculo variacional permite a obtenção de traçados mais suaves, porém requer continuamente funções custos diferenciáveis, o que pode não existir sobre determinados tipos de uso de solo e condições geográficas, como existência de rios e lagos.

Parker (1977) empregou um modelo em dois estágios para a seleção do melhor caminho. A área é dividida em uma malha quadrangular onde o centro de cada célula recebe um valor de elevação correspondente a média das elevações contidas em toda a célula. No primeiro estágio, o modelo encontra, por meio de um modelo de programação em regressão linear, uma superfície cobrindo toda a área onde os custos de terraplenagem são minimizados. Apenas restrições de alinhamento vertical são analisadas neste estágio. No segundo estágio, o traçado com menor custo é locado dentro desta superfície.

Estes modelos citados empregam dois estágios de otimização e a utilização do espaço de pesquisa em malhas, porém, o problema de otimização tridimensional, continuou não resolvido, e os resultados, quanto aos alinhamentos obtidos, continuaram não suaves. Nos melhores modelos o resultado máximo obtido foi um alinhamento subótimo.

Goh, Chew e Fwa (1988) apresentaram um estudo fornecendo as primeiras bases para a computação de modelos tridimensionais, capazes de solucionar alinhamentos horizontais e verticais simultaneamente. Foram utilizados programação dinâmica e abordagens de parametrização para a determinação de um alinhamento vertical a partir de um alinhamento horizontal pré-determinado. Os resultados obtidos com a programação dinâmica serviram de parâmetros para os resultados obtidos com a parametrização, uma vez que programação dinâmica já tinha sido altamente utilizada em literaturas anteriores. Neste estudo, os custos considerados foram: custos de terraplenagem, custos de construção, custos de desapropriação e custos operacionais; e o modelo obedecia às seguintes restrições: rampas

máximas, raio de curvatura mínimo e pontos de controle com níveis fixos. Concluiu-se, neste estudo, que para a solução de problemas bidimensionais, a programação dinâmica é superior em termos de consumo de tempo e maior facilidade em sua formulação, porém, a parametrização tem maior flexibilidade e potencial para a solução de problemas tridimensionais.

Assim, em um estudo posterior, Goh, Chew e Fwa (1989) apontaram uma solução para alinhamentos horizontal e vertical, simultaneamente. Ao invés da utilização de uma malha para a representação da área do projeto, como em estudos anteriores, realizou-se uma parametrização das coordenadas de uma rodovia, representada por uma função contínua aproximada por uma série de *spline* cúbicas tridimensionais, utilizando uma interpolação polinomial. Foram considerados os custos apresentados no Quadro 1 para a formulação do modelo, conforme Stott (1972) e as restrições de projeto englobadas foram rampas verticais máximas, raio de curvatura de curvas verticais e horizontais e regiões inacessíveis, que podem ser corpos hídricos, zonas militares protegidas e áreas de solo fraco, essa consideração não havia sido inserida em nenhum estudo anterior.

O modelo proposto foi capaz de determinar os alinhamentos horizontal e vertical ao mesmo tempo. Além disso, é possível a inserção de qualquer parâmetro ou restrição adicional que não tenha sido considerada. Porém, a escolha das variáveis iniciais afeta a taxa de convergência dos resultados, assim, para grandes projetos, é necessário ainda a intuição do projetista como ponto de partida, uma vez que não há meios diretos e analíticos de inserção destes valores iniciais. Ainda, o tempo de computação dos resultados mostrou-se bastante elevado.

Observa-se que os primeiros estudos para a criação de ferramentas e programas computacionais voltados à otimização de traçados de estradas voltaram-se principalmente para a elaboração de codificações e funções matemáticas capazes de solucionar o problema de roteirização baseado em redução de custos considerando restrições de projeto. Evoluiu-se gradativamente da análise bidimensional até finalmente obter-se uma análise tridimensional do traçado, o que inclui o lançamento dos alinhamentos vertical e horizontal, simultaneamente. A área de estudo é dividida em malhas quadrangulares ou retangulares representadas em um plano cartesiano, ou diretamente dentro deste plano, como mostrado nas Figuras 9 e 10 respectivamente, e o alinhamento em estudo corresponde a uma função.

Quadro 1 – Componentes de custos que contribuem para a locação de uma rodovia.

ITEM	DESCRIÇÃO	CUSTOS
1	Custos de construção	
	Drenagem	10%
	Terraplenagem	25%
	Pavimentação	30%
	Aquisição de terreno	5% (a 10%)
	Outros	30%
2	Custos de operação dos veículos	
		30% a 1000% dos custos de construção
3	Custos de administração e de projeto	
		Em torno de 5% dos custos de construção
4	Custos de manutenção	
		Em torno de 5% dos custos de construção

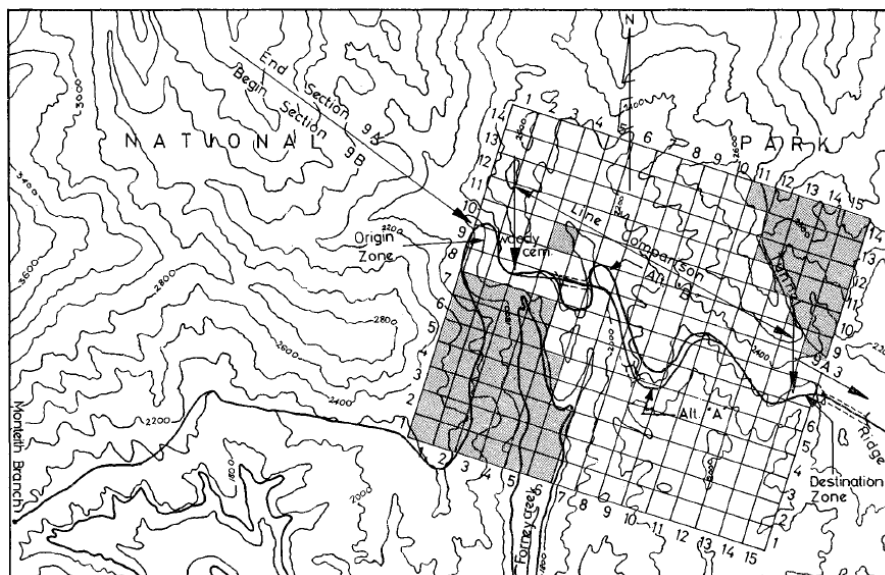
Fonte: Stott (1972), adaptado pela autora.

Apesar do avanço dos estudos ter possibilitado a obtenção de resultados satisfatórios, a aplicação destes programas ainda estaria longe da prática para grandes projetos, devido a incapacidade ou alto consumo de tempo dos computadores existentes para análises e também pela grande necessidade de intuição dos projetistas na determinação das variáveis iniciais. Observa-se ainda a necessidade de aperfeiçoamento das funções custo, inserindo todos as variáveis relevantes, pois, conforme Jong, Jha e Schonfeld (2000), modelos que negligenciam determinados custos, principalmente custos de operação, podem conduzir a alinhamentos muito pobres.

Jong (1998) introduziu um estudo com uma significativa contribuição para a automatização da otimização de projetos geométricos preliminares, o desenvolvimento de algoritmos genéticos como função objetivo. Apesar da relevância de seu estudo para o processo de automatização, foram utilizadas representações do espaço geográfico de forma muito simplificada, o que comprometeu os resultados. Jong (1998) representou seu espaço de pesquisa em um formato de matriz, que era preenchida manualmente com as informações referentes a custos e elevação, isso tornou o modelo ineficiente devido ao alto consumo de tempo para preenchimento dessas matrizes requeridas no processamento do programa. Além disso, no método de Jong (1998), a pesquisa pelo alinhamento ótimo começa com um conjunto de variáveis aleatórias para a geração de alinhamentos e, então, os algoritmos genéticos buscam uma solução de alinhamento melhor para cada uma dessas gerações. Isso mantém o processo ainda muito subjetivo, em que não se depende da intuição do projetista

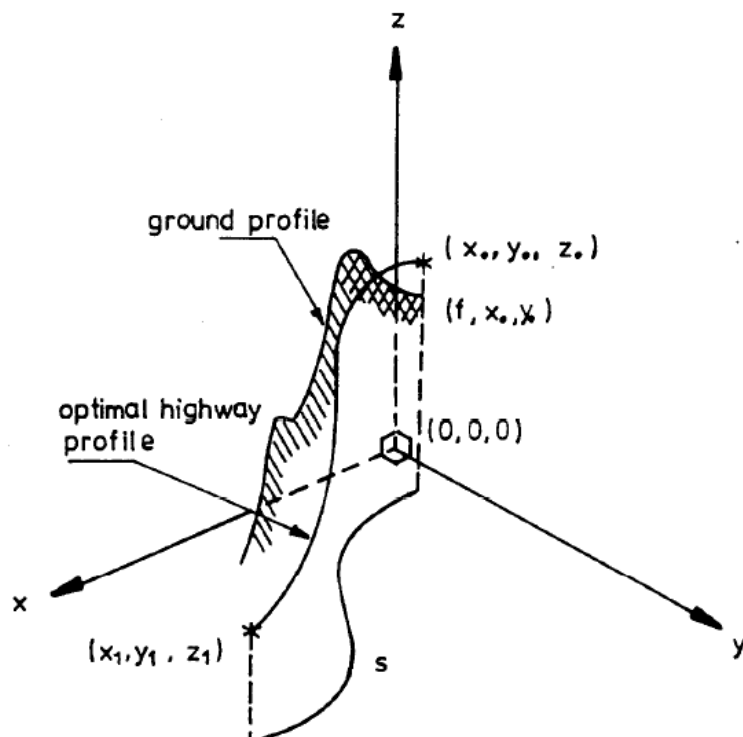
como ponto de partida, uma vez que não existe uma base fundamentada no espaço geográfico para a geração das variáveis iniciais.

Figura 9 – Representação da área de estudo em malha quadrangular inserida em um plano cartesiano.



Fonte: Parker (1977).

Figura 10 – Representação do terreno e do perfil ótimo da rodovia em um sistema de coordenadas cartesianas.



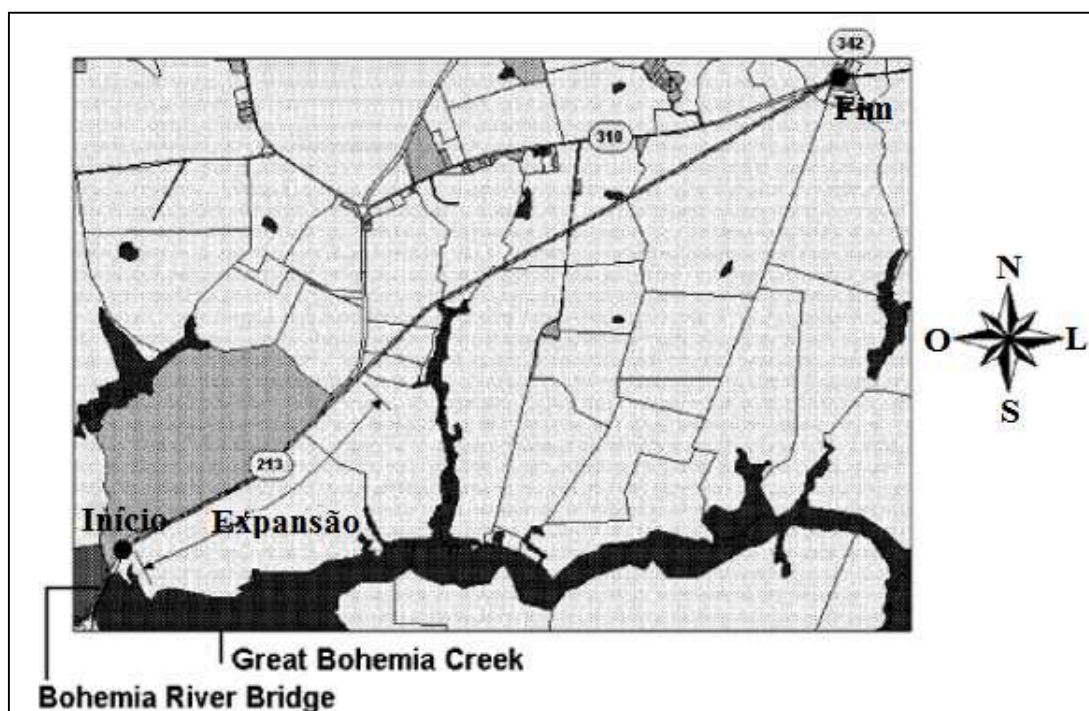
Fonte: Goh *et al.* (1989).

2.3.2. Otimização de projetos geométricos de estradas inserindo SIG

A otimização dos projetos de rodovia recebeu atenção especial nos Estados Unidos nas décadas de 1960 e 1970 devido à construção da maioria das rodovias interestaduais neste período (JONG, JHA e SCHONFELD, 2000). Com o avanço da tecnologia SIG tornou-se possível resolver precisamente e eficientemente dificuldades antes enfrentadas nos problemas de otimização destes projetos, uma vez que o SIG permite a representação espacial de propriedades de terra, áreas inundáveis, rios, lagos, córregos, APPs e outras características geográficas relevantes para a função custo.

Jong, Jha e Schonfeld (2000) desenvolveram um modelo integrando SIG e algoritmos genéticos como funções de otimização para alinhamentos horizontais. O propósito principal do estudo foi o desenvolvimento de um alinhamento suave obedecendo às restrições de raio mínimo de curvas, como mostra a Figura 11. Além dos custos de aquisição de terreno, de impactos ambientais e de construção, também foram inseridos os custos operacionais (operação do veículo, tempo de viagem e custos de acidentes), até então negligenciados em vários estudos anteriores. Além da obtenção de traçados mais suaves que os obtidos em estudos anteriores, a exploração dos dados diretamente em um SIG reduziu o tempo de processamento das operações no modelo, e permitiu análises num espaço realístico e com formas irregulares. Uma outra vantagem é que existem duas possibilidades de realização do processo de otimização no *software*, na primeira o projetista pode fornecer os parâmetros iniciais de análise para que o programa faça um refinamento destes até a obtenção do traçado ótimo, e na segunda, o programa é capaz de gerar um primeiro alinhamento a partir de um traçado inicial e fazer sua sequência de pesquisa para o traçado ótimo. Como já mencionado, quando é necessário que o projetista insira os parâmetros iniciais, a análise torna-se mais subjetiva, tornando o resultado dependente da boa carga de experiência e conhecimento acumulados pelo engenheiro. Por outro lado, se o projetista ainda não tem experiência ou segurança suficientes, ele ainda é capaz de conduzir estudos preliminares de estradas com um *software* que garanta a realização de todas as etapas de análise.

Figura 11 – Exemplo de alinhamento horizontal ótimo.



Fonte: Jong, Jha e Schonfeld (2000).

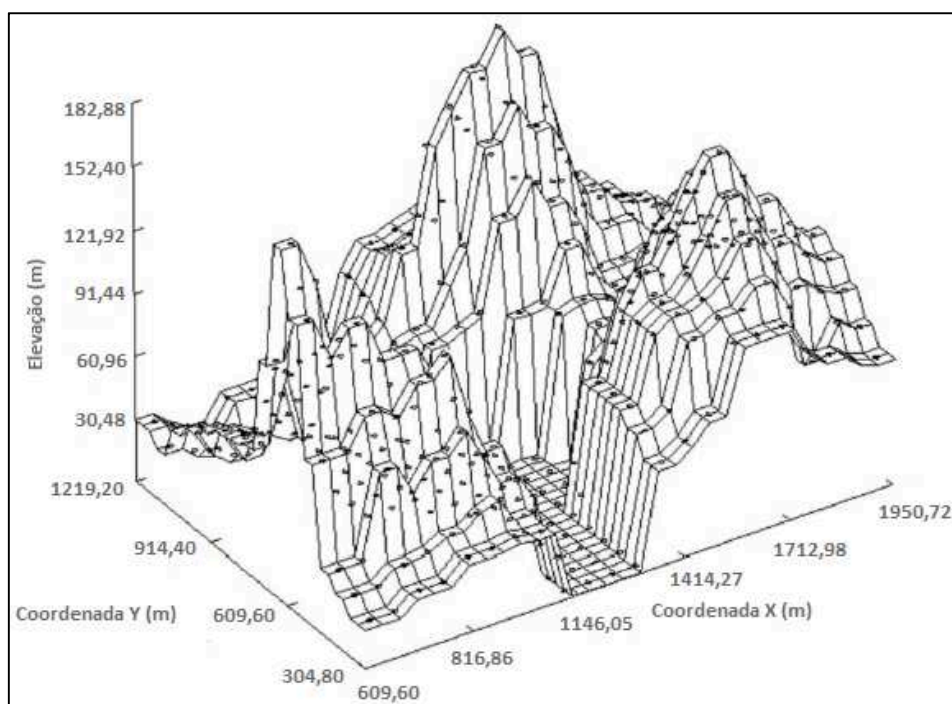
Embora o modelo tenha fornecido tais vantagens, ainda ficou muito espaço para melhorias posteriores. Primeiro, para padrões de terrenos com formato ou uso do solo muito irregulares, é possível obter-se curvas com orientação voltadas para trás - *backtracking*, isso poderia ocorrer em casos de terrenos com topografia muito acidentada quando analisados os alinhamentos vertical e horizontal juntos, porém, neste caso, torna-se desvantajoso e não aplicável em alinhamento horizontal esta orientação de curvas para trás. Segundo, ainda, até por se tratar dos primeiros estudos implementando o SIG, não houve a otimização simultânea dos alinhamentos horizontal e vertical, apenas do alinhamento horizontal. Jong, Jha e Schonfeld (2000) recomendam esta análise para trabalhos futuros e confirmam a capacidade de sua realização no SIG, em que é possível armazenar e manipular dados referentes a elevação do terreno e estimar custos de terraplenagem relacionados aos traçados gerados no processo de otimização.

Jong e Schonfeld (2003) desenvolveram um modelo de otimização tridimensional revolucionário que superou algumas dificuldades encontradas nos modelos anteriores. Os componentes de custo e restrições de projeto foram demonstrados de forma mais compreensiva. Desta forma, o problema resultante tem uma estrutura limitada, não linear e não diferenciável, que não pode ser resolvida eficientemente por técnicas clássicas de

otimização, por isso a denominação do modelo como ‘revolucionário’. As características requeridas pelo modelo incluem: consideração de vários componentes de custo, satisfazer restrições importantes, busca por traçados realísticos, manipulação de curvas voltadas para trás e encontrar boas soluções eficientemente.

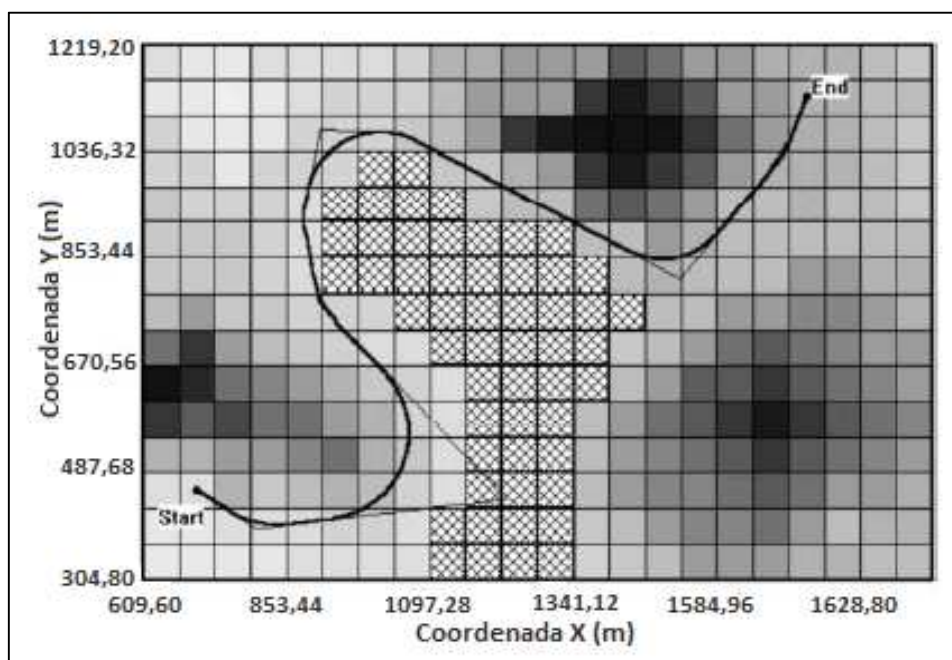
Foi utilizada uma região de estudo retangular dividida em uma malha de células iguais de dimensões pequenas afim de se assumir características internas homogêneas em cada uma delas, como, por exemplo, custo de desapropriação, elevação, condições do solo, entre outros. Com a imposição de elevados custos em algumas células, é possível representar regiões com formas altamente irregulares e assim, os alinhamentos podem passar por qualquer ponto dentro da malha, ao invés de em um conjunto finito de pontos como acontece nos métodos do caminho mais curto e de programação dinâmica. Ao invés da representação dos alinhamentos tridimensionais em partes de seguimentos lineares ou funções cúbicas *spline*, como era feito anteriormente e que fornecia resultados de traçados grosseiros, os alinhamentos foram representados por uma série de pontos de interseção em um espaço tridimensional, conforme Figura 12, que conectados entre os pontos de início e fim formavam a trajetória de seguimentos lineares, resultando em alinhamentos mais suaves, como mostrado na Figura 13.

Figura 12 – Vista tridimensional do terreno.



Fonte: Jong e Schonfeld (2003), adaptado pela autora.

Figura 13 – Alinhamento Horizontal Ótimo obtido por Jong e Schonfeld (2003).



Fonte: Jong e Schonfeld (2003), adaptado pela autora.

As principais vantagens encontradas no modelo foram a não restrição do algoritmo proposto a severas premissas estruturais sobre as funções objetivo, como, por exemplo, linearidade, diferenciabilidade e convexidade. Isso possibilitou a manipulação de *backtracking alignments* baseada em uma função de custos compreensiva. Obteve-se com um exemplo numérico real, sem nenhum conhecimento prioritário, ou seja, sem a inserção de alternativa de traçado inicial por um engenheiro projetista, um custo 34% menor do que o obtido pela média de soluções aleatórias, o que mostrou que os resultados obtidos pelo programa foram satisfatórios. Além disso, houve uma eficiência quanto ao tempo de computação do programa, que se mostrou inferior aos tempos requeridos pelos modelos anteriores, comparando-se em computadores de mesma característica.

Programas revolucionários podem ser eficientes e eficazes, porém é necessário um maior desenvolvimento de operadores apropriados aos problemas, uma vez que estes programas dependem consideravelmente destes operadores. Infelizmente, o desenvolvimento de operadores para cada tipo específico de problema não é uma tarefa fácil, o que não tornou o modelo válido para situações e problemas gerais. Finalmente, o programa proposto necessita de configurações de parâmetros matemáticos que podem não ser tão óbvios para usuários como engenheiros projetistas de estradas. Assim, foi recomendado para estudos posteriores a criação de um guia para a configuração de tais parâmetros ou a inserção de operadores

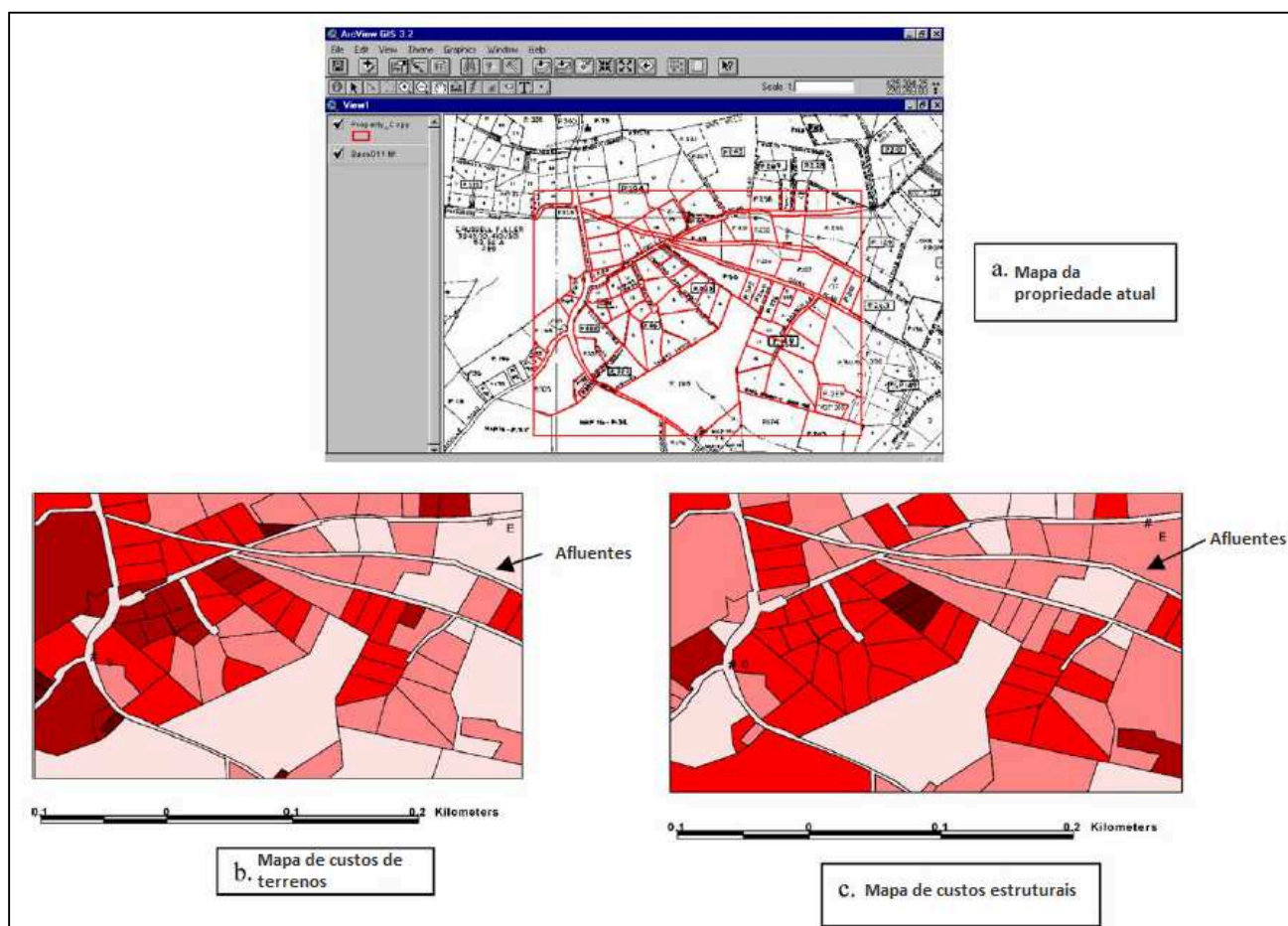
específicos combinando algoritmos genéticos com métodos tradicionais de busca para objetivos específicos de otimização de alinhamentos.

Jha e Schonfeld (2004) apresentaram um modelo também integrando SIG e algoritmos genéticos, em que foram integradas diversas publicações anteriores e adicionadas algumas novas análises. Algoritmos genéticos mostraram-se eficientes na otimização de alinhamentos, principalmente na otimização horizontal e vertical simultânea, além de trabalharem diretamente com mapas reais em um SIG gerando alinhamentos suaves e contínuos. O modelo considera vários custos para a seleção do alinhamento e explora a otimização em espaços restritos que realisticamente refletem as situações encontradas em projetos de melhoramento, reconstrução, ou reforma de rodovias existentes.

Para a otimização de alinhamentos baseados na minimização de custos, conforme Jha e Schonfeld (2004) é necessário formular-se compreensivamente todos os custos dominantes e custos sensitivos. Os autores classificaram estes custos em duas grandes categorias: 1) custos do fornecedor, que são diretamente incorridos pelas agências de estradas; 2) custos dos usuários, incorridos pelos usuários da rodovia. Os custos do fornecedor são divididos em três categorias: a) custos de construção, pavimentação e outros custos relacionados diretamente ao comprimento da rodovia; b) custos de desapropriação, incluindo os custos de impactos ambientais; c) custos de terraplenagem. Os custos dos usuários também foram divididos em três categorias: a) custo relacionado ao tempo de viagem; b) custo de operação dos veículos; c) custos com acidentes. Além disso, os custos de infrações de trânsito foram embutidos inicialmente nas restrições de projeto, nos parâmetros de curvas horizontais e verticais, e distância de visibilidade.

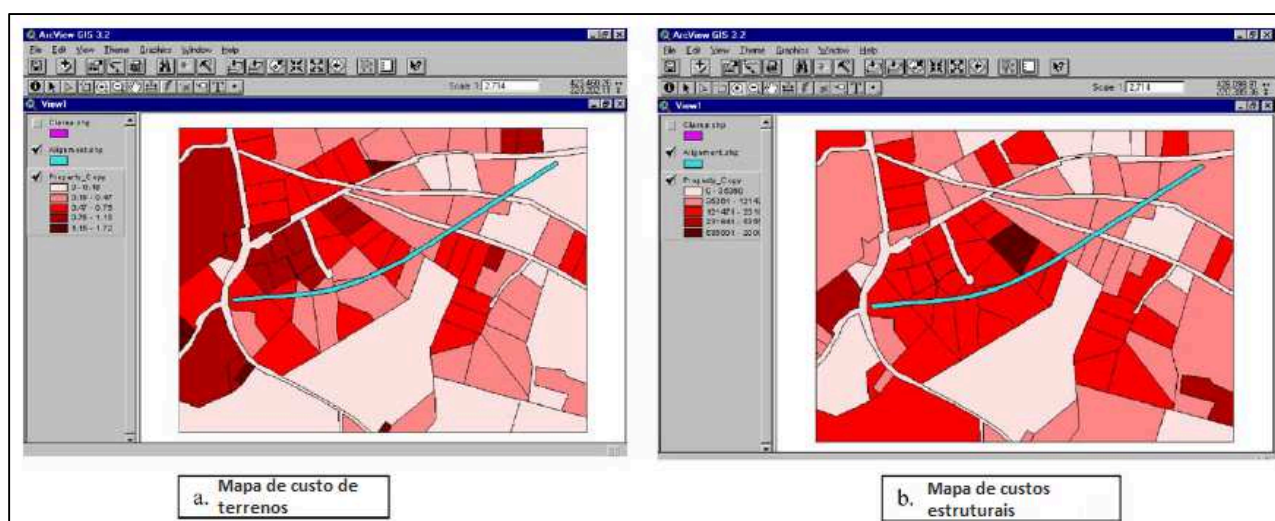
Foram feitas análises para quatro estudos de caso diferentes, sendo, o primeiro, Figura 14, otimização de custos totais em um mapa real, o segundo, otimização de custos de desapropriação em um mapa real, o terceiro, otimização de custos totais em um espaço de pesquisa restrito com utilização de mapa real, e finalmente, otimização de custos totais utilizando um mapa artificial de terreno montanhoso. Na Figura 15 é mostrado o resultado da otimização de custo total feita para um mapa real, primeiro estudo de caso.

Figura 14 – Espaço de pesquisa utilizado no estudo de caso com mapa real.



Fonte: Jha e Schonfeld (2004), adaptado pela autora.

Figura 15 – Alinhamento ótimo obtido na 101ª geração do estudo de caso com mapa real.



Fonte: Jha e Schonfeld (2004), adaptado pela autora.

Observou-se que, neste modelo, além do objetivo de otimização de traçado preliminar, buscou-se também uma caracterização de como esta otimização é influenciada pela consideração ou não dos diversos custos dominantes e sensíveis. O processo de otimização mostrou-se bastante vulnerável à inserção ou retirada de determinados custos, e por isso, a manipulação destas funções deve ser feita com bastante cautela. Além disso, segundo Jha e Schonfeld (2004), os custos relacionados ao tempo de viagem, que geralmente não são a grande preocupação pelo ponto de vista dos fornecedores, geralmente tenderam a ser dominantes.

O modelo mostrou-se eficiente na otimização de alinhamentos preliminares de estradas com utilização de SIG e possibilidade de trabalhar com dados geográficos reais. O teste de otimização de alinhamento tridimensional em terreno montanhoso complexo mostrou que o modelo é capaz de fornecer boas soluções para regiões de topografia acentuada. Observa-se que o modelo apresentado é particularmente apropriado para aplicações em alinhamentos preliminares, e que, com o fornecimento de funções custo suficientemente detalhadas e de dados geográficos, ele também pode ser utilizado na otimização de alinhamentos em fases de detalhamento. Embora hoje isso não represente mais uma dificuldade encontrada, um problema ainda enfrentado no estudo foi o tempo de processamento dos dados. Percebeu-se que a densidade das parcelas aumentou significativamente o tempo de computação, assim, a eficiência da computação aumenta uma vez que são utilizados espaços de pesquisa menores. Para a resolução de problemas em grandes áreas, a restrição do espaço é recomendada, o que reduz a eficácia do programa.

Pode-se observar que os estudos apontados até então tiveram foco no desenvolvimento das funções matemáticas, algoritmos e codificações a serem inseridas em programas computacionais afim de criar-se modelos capazes de conduzir a otimização dos traçados geométricos de forma automatizada. Além disso, em geral, as abordagens eram feitas com foco na otimização quanto a minimização de custos, assim, buscou-se também o aperfeiçoamento e o desenvolvimento detalhado de forma compreensiva das funções custo, e a variação dos resultados obtidos conforme alteração de suas variáveis. Atualmente, com o desenvolvimento das ferramentas em SIG é possível explorar os programas e adquirir resultados variados conforme a necessidade do usuário. Os programas já possuem diversas ferramentas com seus próprios algoritmos para a solução de problemas variados e com diversas aplicações.

Neste contexto, surgiu uma nova abordagem de Abdelrazig e Moses (2015) que utilizaram a plataforma em SIG para a realização de uma otimização baseada apenas em dados espaciais. Quatro critérios de otimização foram considerados: 1) Comprimento da rodovia - minimização do comprimento total da rodovia; 2) Declividade do terreno – redução das declividades percorridas, o que corresponde a redução de custos de terraplenagem; 3) Custo de terrenos – custo de desapropriação; 4) Restrições ambientais – minimização de custos acarretados em regiões ambientalmente sensíveis, como por exemplo, lagos, zonas de solo fraco ou úmidos, áreas inundáveis, etc.

No modelo desenvolvido pelos autores, a região geográfica em estudo é transformada em uma grade (*raster*) que contém diversas células de tamanho pequeno capazes de armazenar dados espaciais homogêneos em toda sua área, nestas células são armazenados dados como, custo de desapropriação, declividade, características hídricas, APP's, e zonas de inundação. Segundo os autores, esta estrutura de dados em *raster* fornece um rico ambiente de modelagem e operadores para análises espaciais.

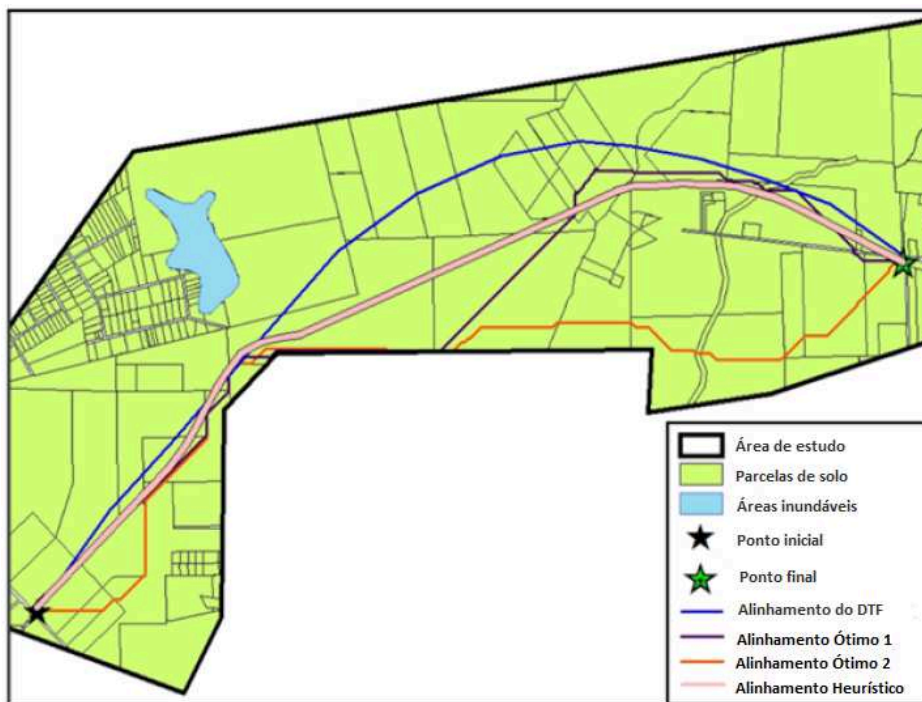
Como uma formulação para os diversos custos não é elaborada, Abdelrazig e Moses (2015) computaram como dados apenas os custos de desapropriação, e a ideia geral do modelo é que, a consideração de corpos hídricos, restrições ambientais e áreas protegidas no espaço de pesquisa é tomada nos cálculos atribuindo-se um alto custo unitário à essas porções, sendo assim, essas regiões evitadas durante a pesquisa pelo alinhamento ideal, que é realizada diante de uma sequência de passos realizados com ferramentas do programa até finalmente a obtenção do traçado otimizado com a ferramenta do menor caminho (*shortest path*).

Para a demonstração da metodologia, os autores utilizaram um estudo de caso de alinhamento de uma nova estrada proposto pelo Departamento de Transportes da Flórida (DTF). Foram obtidos dois alinhamentos ótimos e um terceiro alinhamento heurístico, conforme mostrado na Figura 16.

O alinhamento Ótimo 1 baseou-se nos custos de desapropriação, e o Alinhamento Ótimo 2 foi baseado nos custos de desapropriação mais a consideração da declividade. Os alinhamentos obtidos foram comparados com o alinhamento proposto pelo DTF e em ambos os custos de implantação da faixa de domínio foram menores que os obtidos pelo DTF, correspondendo a uma redução de 36% e 18% para os Alinhamentos Ótimos 1 e 2, respectivamente. Embora tenha ocorrido a redução significativa de custos nos alinhamentos

obtidos, eles ainda não poderiam ser utilizados no lugar do alinhamento proposto pelo DTF, pois ambos resultaram em formatos irregulares. Assim, um terceiro Alinhamento Heurístico foi desenvolvido utilizando as direções indicadas pelos dois alinhamentos ótimos obtidos para a suavização dos resultados. Este Alinhamento Heurístico apresentou uma redução de 31% dos custos para implantação da faixa de domínio.

Figura 16 – Alinhamentos obtidos nas otimizações de Abdelrazig e Moses (2015).



Fonte: Abdelrazig e Moses (2015), adaptado pela autora.

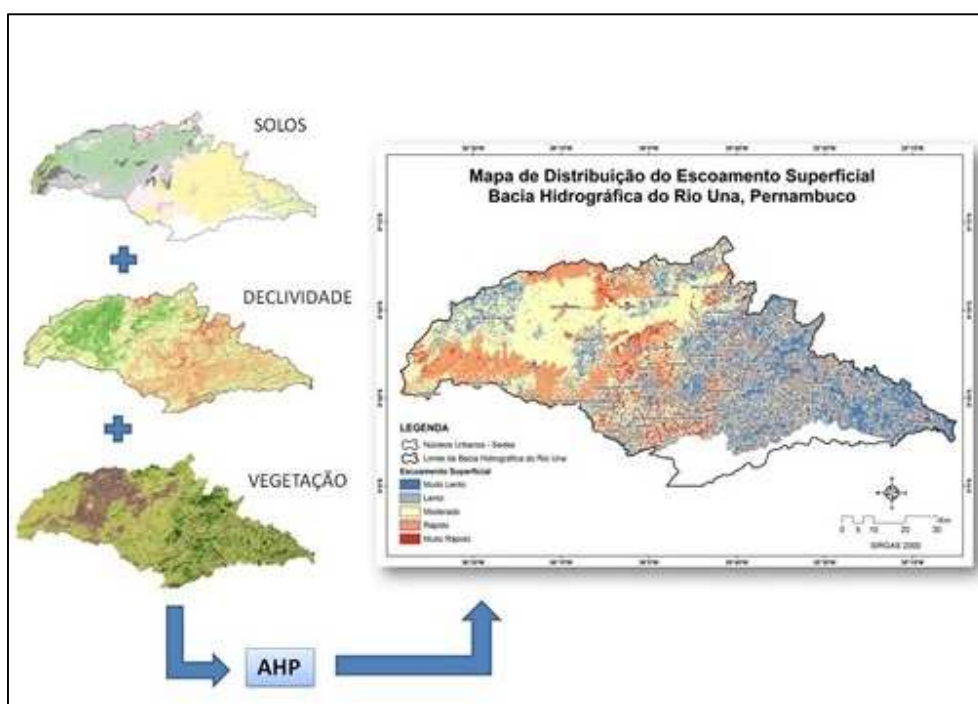
Esta metodologia foi elaborada para ser empregada na fase de planejamento preliminar, em que, a locação inicial ótima da estrada é obtida baseada em custos, declividades do terreno e impactos ambientais. Não houve foco na formulação compreensiva de todos os custos envolvidos na construção de uma nova estrada, uma vez que o objetivo principal da pesquisa foi a realização de uma análise baseada em dados espaciais em ambiente SIG. Assim, os únicos custos considerados foram os custos de desapropriação, o que já fornece um resultado comparativo e suficiente para estágios preliminares de planejamento. Embora tenha sido conduzido um Alinhamento Heurístico para a obtenção de um traçado suave, a forma como esse alinhamento foi realizado não ficou explícita. Além disso, o modelo não considerou restrições de projeto, como raios de curvatura mínimos e distância de visibilidade, o que deixa espaço para melhorias futuras.

2.4. Análises Multicriteriais em Ambiente SIG

Durante o processo de decisão, neste caso, de formação do traçado preliminar ótimo, grandes volumes de conjuntos de dados devem ser tratados e analisados. Considerando que a maior parte destes dados é de natureza espacial, os Sistemas de Informação Geográfica apresentam-se como ferramenta para integração de forma consistente dos dados e permissão da comunicação de cenários para apoiar o pesquisador ou analista na determinação do traçado.

Neste contexto, conforme Schmidt e Barbosa (2016), a determinação da solução de um problema constituído por diversas variáveis pode ser obtida por meio de análises quantitativas, em uma estrutura matemática que permite descrever e sistematizar a análise de fatores econômicos e ambientais de forma estruturada e lógica. Isto é realizado por meio de análises multicriteriais em ambiente SIG, com a ponderação das diversas camadas de informações (custos de desapropriações, restrições ambientais e declividade do terreno, por exemplo). Existem diferentes técnicas para se chegar a ponderação adequada das camadas de acordo com fatores técnicos, econômicos, construtivos e ambientais envolvidos. Uma delas, e que será utilizada nesta pesquisa, é a *Analytical Hierarchic Process* (AHP), conforme demonstra a Figura 17.

Figura 17 – AHP utilizada em análises multicriteriais em ambiente SIG na área de recursos hídricos.



Fonte: Duarte, Corrêa e Girão (2012).

A AHP é uma técnica utilizada como ferramenta de tomada de decisões que funciona com a obtenção de prioridades dominantes por meio da comparação entre elementos homogêneos com respeito a atributos ou critérios comuns (SAATY, 1994).

A técnica AHP foi desenvolvida por Saaty (1980) para aplicação no campo de gerenciamento empresarial, e em termos mais simples, seu princípio consiste no desmembramento de um problema complexo em diversos problemas menores, orientando após isso, os especialistas e tomadores de decisão a determinarem uma hierarquia de importância destes problemas menores.

A AHP tem sido utilizada em diversos contextos que consideram problemas espaciais, como por exemplo, na seleção de área para reservatórios de abastecimento, estudos de vulnerabilidade ambiental, estudo de fragilidade de solos, e seleção de área para disposição de resíduos (SCHMIDT e BARBOSA, 2016).

O método AHP trata-se de processo de obtenção de uma escala relativa usando dados ou julgamentos que partem de uma escala padrão (SAATY, 1990). Assim, a AHP conduz a hierarquização de múltiplos critérios representativos de um problema. É realizada uma comparação pareada de dois em dois critérios, utilizada para determinar a importância relativa de cada um deles, em que um especialista ou julgador expressa sua opinião julgando qual deles é mais importante conforme uma escala padrão pré-determinada. Desta forma, uma matriz, chamada de matriz dominante ou matriz de comparação pareada, é montada com os critérios de entrada. As linhas e colunas desta matriz recebem os valores atribuídos pelos especialistas e ela caracteriza-se como uma matriz quadrada, recíproca e positiva (SCHMIDT e BARBOSA, 2016).

Em cada cruzamento de linhas e colunas da matriz o especialista atribui o valor da escala recomendada por Saaty (1991), como apresentado na Figura 18, que vai de 1 a 9, com 1 significando a indiferença de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância entre esses níveis 1 e 9, como descrito na Figura 19. Dessa forma, na parte triangular inferior, a matriz recebe uma ponderação direta e, no lado oposto, o elemento da matriz é o inverso da ponderação do mesmo par. A diagonal principal da matriz é unitária, desconsiderando as comparações entre os próprios critérios conforme mostrado na tabela apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Matriz de comparação pareada ou matriz dominante.

Fatores	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
Fator 1	1	1/P2	1/P3	1/P4
Fator 2	P2	1	1/P2	1/P3
Fator 3	P3	P2	1	1/P2
Fator 4	P4	P3	P2	1

Fonte: Schimidt e Barbosa (2016).

Após a obtenção dos valores pareados (P), cada elemento da coluna é dividido pelo valor obtido pela somatória da coluna a que pertence, conforme mostrado na tabela apresentada na Figura 20. Na última coluna à direita, está apresentada a média aritmética dos valores obtidos em cada linha, representando os pesos normalizados (Pn).

Figura 19 – Escala de comparações do AHP.

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i.	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz.

Fonte: Saaty (1991).

Figura 20 – Caso genérico para a determinação dos pesos.

Fatores	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Pesos
Fator 1	$F1/\sum \text{Coluna1}$	$F1/\sum \text{Coluna2}$	$F1/\sum \text{Coluna3}$	$F1/\sum \text{Coluna4}$	$\sum \text{Linha1}/n$
Fator 2	$F2/\sum \text{Coluna1}$	$F2/\sum \text{Coluna2}$	$F2/\sum \text{Coluna3}$	$F2/\sum \text{Coluna4}$	$\sum \text{Linha2}/n$
Fator 3	$F3/\sum \text{Coluna1}$	$F3/\sum \text{Coluna2}$	$F3/\sum \text{Coluna3}$	$F3/\sum \text{Coluna4}$	$\sum \text{Linha3}/n$
Fator 4	$F4/\sum \text{Coluna1}$	$F4/\sum \text{Coluna2}$	$F4/\sum \text{Coluna3}$	$F4/\sum \text{Coluna4}$	$\sum \text{Linha4}/n$
Somatório das colunas	$\sum \text{Coluna1}$	$\sum \text{Coluna2}$	$\sum \text{Coluna3}$	$\sum \text{Coluna4}$	$\sum \text{pesos} = 1$

Fonte: Schmidt e Barbosa (2016).

Os pesos obtidos (P_n), conforme Saaty (1994), são a prioridade do parâmetro, ou seja, o peso inicial deste parâmetro na análise. Este resultado é um autovetor normalizado e os pesos variam de 0 a 1. Desta forma, a somatória de todos os pesos calculados é igual a 1. Cada valor apresentado na coluna Pesos representa a ponderação a ser atribuída ao critério na tomada de decisão final (SCHMIDT e BARBOSA, 2016).

Quando muitas comparações de pares são realizadas, não há garantias que a matriz dominante seja recíproca positiva e consistente. A inconsistência surge quando algumas opiniões da matriz de comparação se contradizem com outras. Por isso, é necessário a análise da consistência da matriz por meio do Índice de Consistência (IC), que é calculado pela Equação 1.

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Em que,

$\lambda_{m\acute{a}x}$: autovalor máximo;

n: número de critérios analisados ou ordem da matriz dominante.

O autovetor fornece a ordem de prioridade dos critérios e o autovalor é a medida de consistência do julgamento. O método da análise hierárquica busca o autovalor máximo, $\lambda_{m\acute{a}x}$, que pode ser calculado pela multiplicação da matriz de julgamentos da Figura 18 pelo vetor coluna de prioridades obtido, coluna Pesos da Figura 20, seguido da média da divisão desse novo vetor encontrado, pelo primeiro vetor, Peso, novamente. Finalmente, o valor de $\lambda_{m\acute{a}x}$ é obtido.

É sugerido ainda o cálculo da razão de consistência (CR), que é calculada dividindo-se o valor IC pelo índice aleatório IR criado por Saaty (1994), apresentados na tabela apresentada na Figura 21. Como regra geral, se a razão de consistência obtida for inferior a 0,10, então há consistência para prosseguir com os cálculos do AHP, porém, caso obtenha-se um valor superior a 0,10, recomenda-se que os julgamentos sejam refeitos, podendo ser o questionário reescrito ou realizando a recategorização dos elementos.

Figura 21 – Valores de IR para matriz de ordem n.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fonte: Saaty (1991).

CAPÍTULO 3

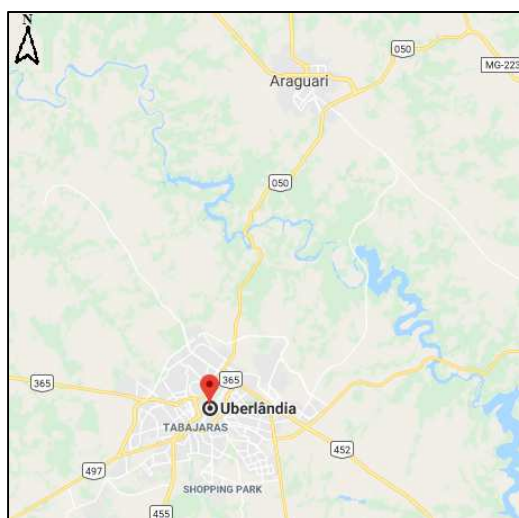
METODOLOGIA

Este capítulo visa descrever o problema estudado relacionando-o com a literatura apresentada e possibilitando assim, sua resolução por meio da metodologia proposta. Em resumo, esta metodologia consiste no descrito a seguir.

3.1. Área de Estudo

A área de estudo corresponde a região entre as cidades de Uberlândia e Araguari no estado de Minas Gerais, conforme apresentado na Figura 22. A área de estudo foi delimitada por um quadrado de lado igual a aproximadamente dez quilômetros abrangendo como eixo do lado inferior o viaduto Regis Bittencourt de acesso a Uberlândia pela BR-50, rodovia existente que conecta as duas cidades. O viaduto correspondeu ao Ponto Inicial do problema. O Ponto Final está demarcado sobre a BR-050 (que está sendo utilizado como ponto de referência conhecido) antes de seu cruzamento com o Rio Araguari, desta forma, não foi considerado no modelo a travessia em cursos hídricos, como por exemplo, este rio. Optou-se pela utilização desta área de aproximadamente 100 km², pois, esta é suficiente para o levantamento de dados, aplicação da metodologia e análise dos resultados.

Figura 22 – Mapas de situação de Uberlândia e Araguari, MG.



Fonte: Google Maps (2018).

Na Tabela 1 estão apresentadas as principais características de projeto da BR-050 no trecho em estudo, as informações foram coletadas no ano 2018 na unidade do DNIT localizada no município de Uberlândia. Observa-se que a rodovia existente no trecho em estudo está inserida, de acordo com o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999), na classificação 1-A. Rodovias desta classe apresentam um mais alto nível de serviço, com pista dupla, grande demanda de tráfego, interseções em desnível e elevado controle de acesso. Além disso, a região de estudo é caracterizada como contendo relevo ondulado à montanhoso, onde as inclinações naturais do terreno exigem com frequência a execução de cortes e aterros laterais para a implantação dos alinhamentos verticais e horizontais aceitáveis, o que é ainda caracterizado pela velocidade diretriz reduzida, igual a 80 km/h.

Tabela 1 – Características de projeto da área em estudo.

	KM	CLASSE	VELOC. DIRETRIZ (KM/H)	RELEVO	COMPRIMENTO (KM)	RAMPA MÁX. (%)
PONTO INICIAL	68,40	1-A	80	OND/MONT	14,03	4,50
PONTO FINAL	54,55	1-A	80	OND/MONT		4,50

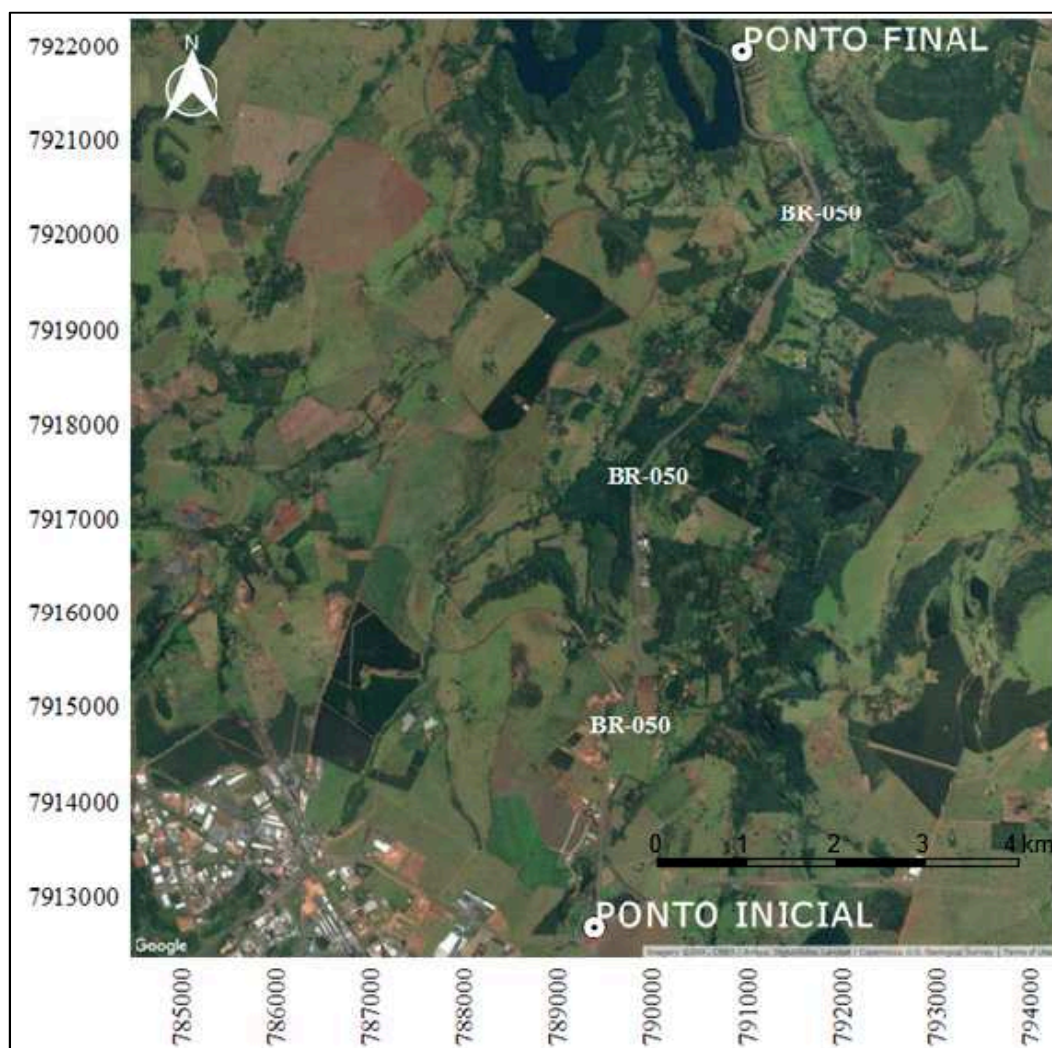
Em que: OND = ondulado e MONT = montanhoso.

Fonte: DNIT (2018).

Nas Figuras 23 e Tabela 2 estão apresentados uma imagem da área de estudo e as coordenadas planas dos Pontos Inicial e Final projetadas na projeção *Universal Transversa de Mercator* (UTM) no sistema de referência geodésico Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) dos Pontos Inicial e Final.

Na região próxima ao vértice inferior esquerdo, é possível observar parte da área urbana do município de Uberlândia, e na região superior da imagem, observa-se, em azul escuro, um trecho do Rio Araguari. Além disso, a imagem apresenta as áreas de lavouras (regiões de cor verde escuro), pastagens (verdes claros) e reservas legais (verdes intermediários).

Figura 23 – Imagem da área de estudo.



Fonte: Google Earth – imagens de maio de 2017, adaptado pela autora (2018).

Tabela 2 – Coordenadas planas dos Pontos Inicial e Final.

	COORDENADAS PLANAS (SIRGAS 2000/UTM 22S)
PONTO INICIAL	789370.8, 7912678.5
PONTO FINAL	790940.7, 7921945.1

Fonte: Autora (2018).

3.2. Métodos

O processo de obtenção do traçado geométrico preliminar foi executado por meio de uma análise multicriterial baseada nos quatro critérios:

1) Redução do comprimento total da estrada: obtenção do menor comprimento considerando as principais restrições de projeto impostas no Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (Departamento de Estradas de Rodagem – DNER, 1999), utilizado atualmente como regulamentação pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes – DNIT. Este critério impacta, em geral, na redução dos custos de construção, operação e manutenção da estrada;

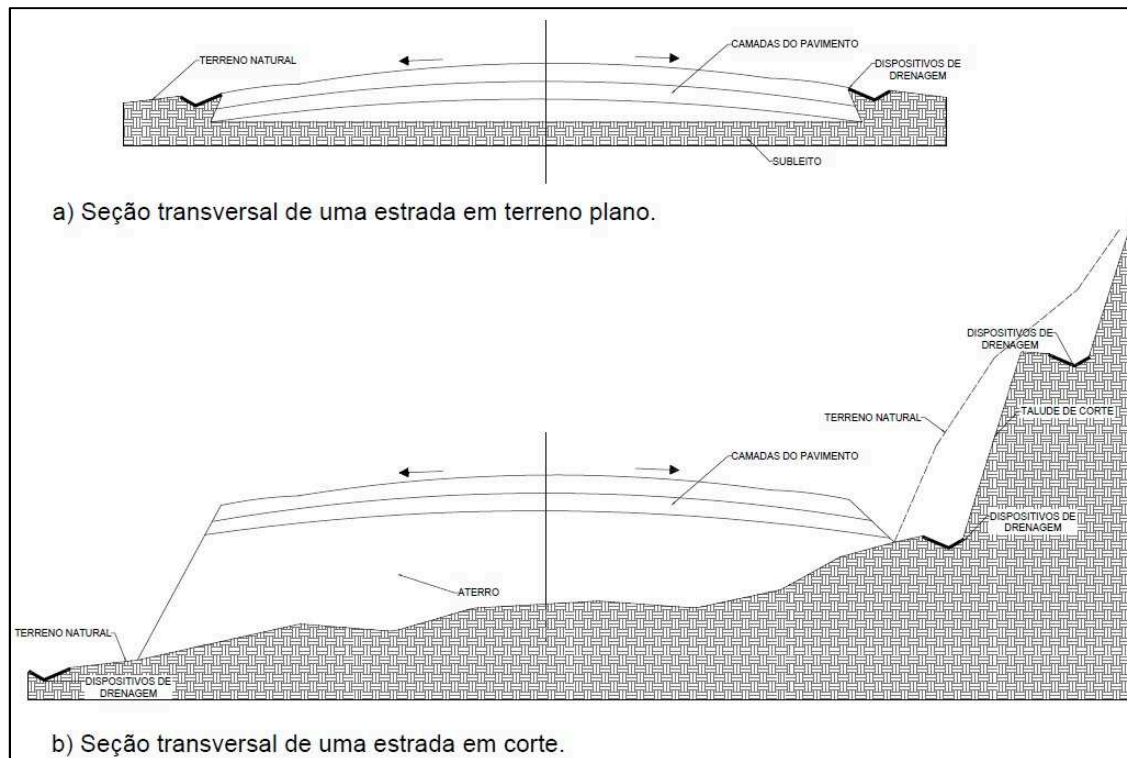
2) Restrições ambientais: prevenção da passagem do traçado em regiões ambientais restritas. Foram consideradas todas as características ambientais da região, como, presença de APPs, APAs, reservas legais e rios. Apesar da consideração do Rio Araguari no modelo, o seu cruzamento não foi avaliado, visto que para isso seria necessária uma análise para a seleção do melhor ponto de intercepção entre o rio e a estrada, ou seja, seria requerido uma avaliação dos custos para a execução da obra de arte especial, no caso, uma ponte, e o local onde a implantação desta ponte resultaria em menor comprimento e menores impactos ambientais. Neste estudo, o Rio Araguari foi apenas evitado para a passagem do traçado, e não atravessado por este;

3) Custo de desapropriação: dependendo do número de benfeitorias ao longo da faixa de implantação da estrada, os custos de desapropriação podem inviabilizar um traçado, assim, foram buscadas áreas com menor custo de desapropriação;

4) Declividade do terreno: consideração da topografia nas análises para a redução de movimentação de terra, impactando na redução dos custos de terraplenagem. Busca de regiões planas para a implantação da seção transversal da estrada, pois segundo Filho (1998), regiões topograficamente desfavoráveis acarretam maiores movimentos de terra, elevando substancialmente o custo da construção, como é possível observar na Figura 24. Assim, o ideal é a procura por um traçado que acompanhe o máximo possível as curvas de nível da região ou a declividade do terreno, e quando isso não for possível e for necessário a travessia de um espigão para a passagem do traçado, opta-se por realizar esta travessia em seus pontos mais baixos, reduzindo a quantidade de movimentação de terra. Ressalta-se a

obrigatoriedade em se respeitar os valores limites de rampas estabelecidos pelo DNIT, parâmetro que também será contemplado no modelo.

Figura 24 – Seções transversais de pavimento em terreno plano e em corte.



Fonte: Autora (2018).

Este processo de obtenção do traçado geométrico preliminar foi constituído por duas etapas principais:

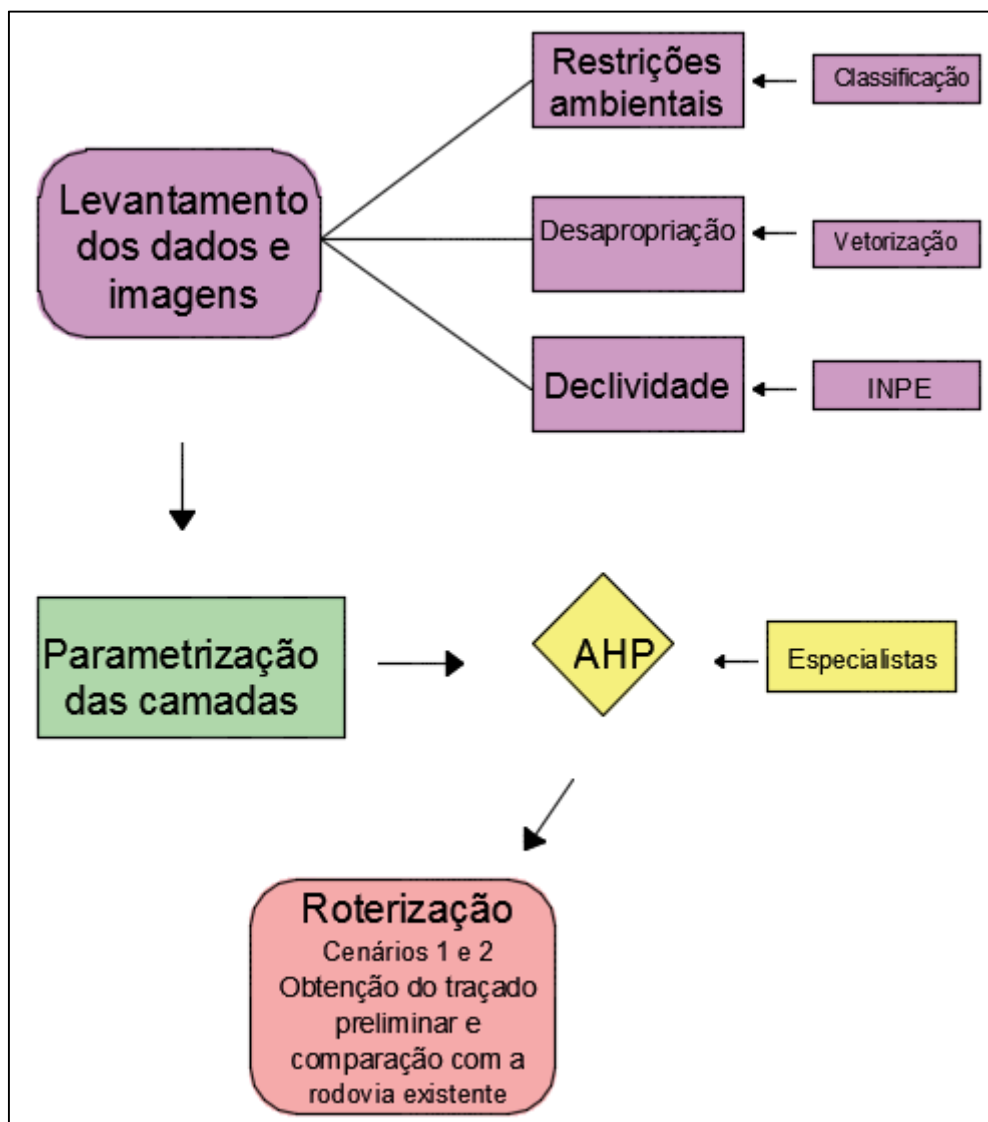
Na primeira etapa do estudo, foi elaborado um mapa de visualização das regiões aptas a receberem o traçado preliminar da estrada, considerando-se três dos quatro critérios mencionados: 2) restrições ambientais, 3) custo de desapropriações e 4) declividade do terreno. Cada um destes critérios compuseram uma camada parametrizada em uma escala padrão de 1 a 5 e para a realização da unificação destas três camadas, ou seja, para a formação do mapa final de áreas aptas a receberem o traçado, foram desenvolvidos dois cenários, o primeiro sem aplicação de técnica de ponderação sobre os critérios, e o segundo, aplicando o método de ponderação *Analytical Hierarchic Process* (AHP).

Na segunda etapa, de posse do mapa final de regiões mais aptas a receberem o traçado preliminar da estrada, foi aplicada uma ferramenta de roteirização para a geração do traçado

geométrico preliminar, em que, finalmente, foi considerado o critério 1) redução do comprimento total da estrada.

Em resumo, as etapas desenvolvidas nesta pesquisa estão apresentadas no fluxograma da Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma das atividades executadas nesta pesquisa.



Fonte: Autora (2018).

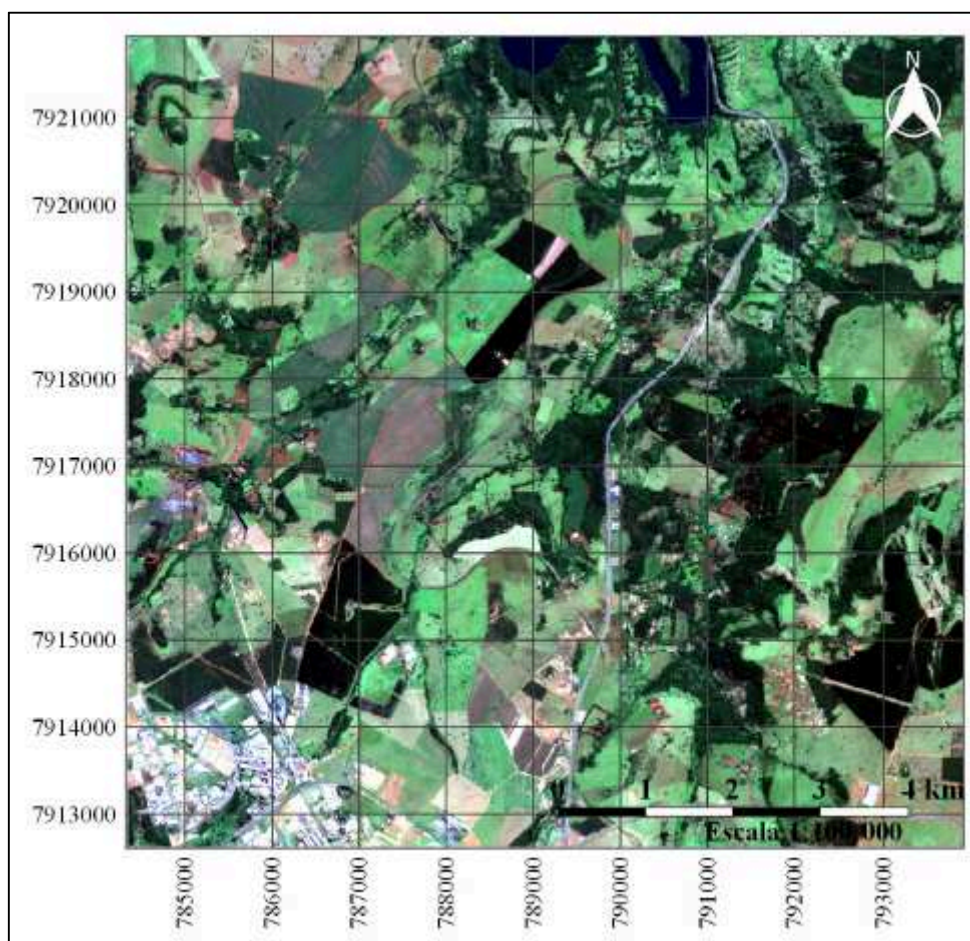
Foram utilizados, nesta pesquisa, dados coletados em fontes e plataformas nacionais e internacionais de *download*. Todos os dados foram tratados e organizados de forma a gerar informações compatíveis de serem trabalhadas em ambiente SIG. O programa escolhido para o tratamento e manipulação destes dados foi o QGis na versão 2.18.20. Optou-se pela

utilização deste software devido a sua amplitude de funcionalidades, que podem ser complementadas pela instalação de diversos *plug-ins* e por se tratar de um *software* aberto.

Para a elaboração dos mapas a área de estudo foi inicialmente delimitada considerando o Datum de referência WGS 84/ UTM Fuso 22S. O limite da área quadrada correspondeu às coordenadas, para o vértice inferior oeste 784351.0, 7912634.0 e para o vértice superior leste 794377.0, 7921991.0, após isso, o projeto iniciado dentro do QGis e todas as imagens e mapas foram reprojatados para o Datum SIRGAS 2000/ UTM zona 22S, como apresentado na Figura 26.

A imagem apresentada na Figura 26 foi capturada pelo satélite *Sentinel-2* na data de 05/05/2018 e baixada pela plataforma *online* da *European Space Agency* (ESA). Esta imagem foi utilizada como ponto de partida para recorte das demais camadas modeladas. Para seu processamento digital, foi realizado o tratamento de composição de cores na cor verdadeira RGB (*Red*, *Green* e *Blue*) nas bandas 04, 03 e 02 e resolução espacial de 10 m, que possibilitaria a elaboração de mapas na escala de até 1:25.000. Porém, como o Modelo Digital de Elevação utilizado para análise do critério declividade baixado do banco de dados Topodata possui resolução espacial de 30 m, a escala trabalhada neste trabalho foi padronizada em 1:50.000, uma vez que, de qualquer forma, após a soma de todos os critérios no programa QGis a resolução final dos mapas resultou em 30 m, como será melhor explicado adiante. Esse fato não afeta a qualidade dos resultados, uma vez que para o nível de projeto preliminar não é necessária essa escala de detalhamento.

Figura 26 – Imagem Sentinel-2 da área de estudo.

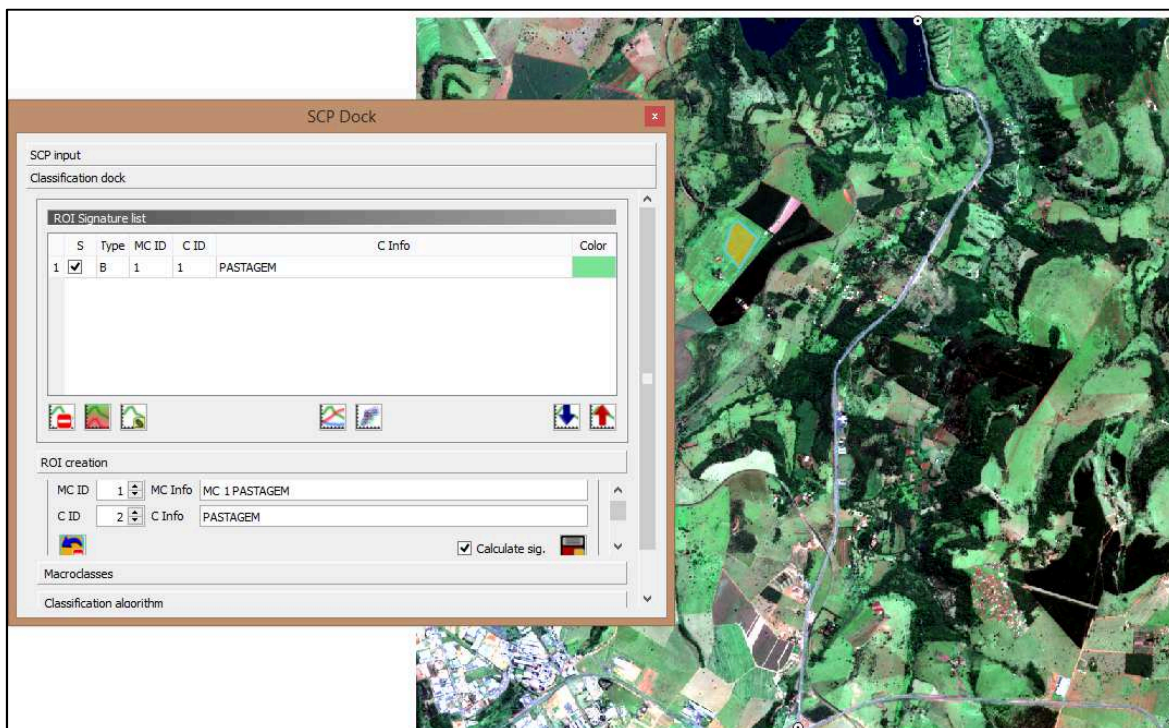


Fonte: ESA (2018), modificado pela autora (2018).

3.2.1. Elaboração do Raster Restrições Ambientais

Para a elaboração da camada contendo as informações referentes às restrições ambientais, aqui designada como *Raster Restrições Ambientais*, foi utilizada a imagem do satélite *Sentinel-2* contida na Figura 26. Primeiramente, para sua modelagem e parametrização, foi realizada sua classificação supervisionada, ou seja, uma classificação por amostragem, em que as amostras, denominadas área de treinamento, são coletadas como parcelas da própria imagem. A classificação supervisionada foi realizada utilizando o complemento '*Semi-Automatic Classification Plugin*' (SPC) e sua janela está apresentada na Figura 27.

Figura 27 – Janela do complemento SPC.



Fonte: Autora (2018).

Na classificação foram consideradas seis classes, sendo elas, Rio, Vegetação, Lavouras, Pastagens, Construções e Solos. Foram coletadas em torno de 15 a 20 amostras por classe. A classe Rio representa apenas a parte do Rio Araguari contida na área de estudo e suas amostras foram coletadas apenas na porção azul escuro da imagem.

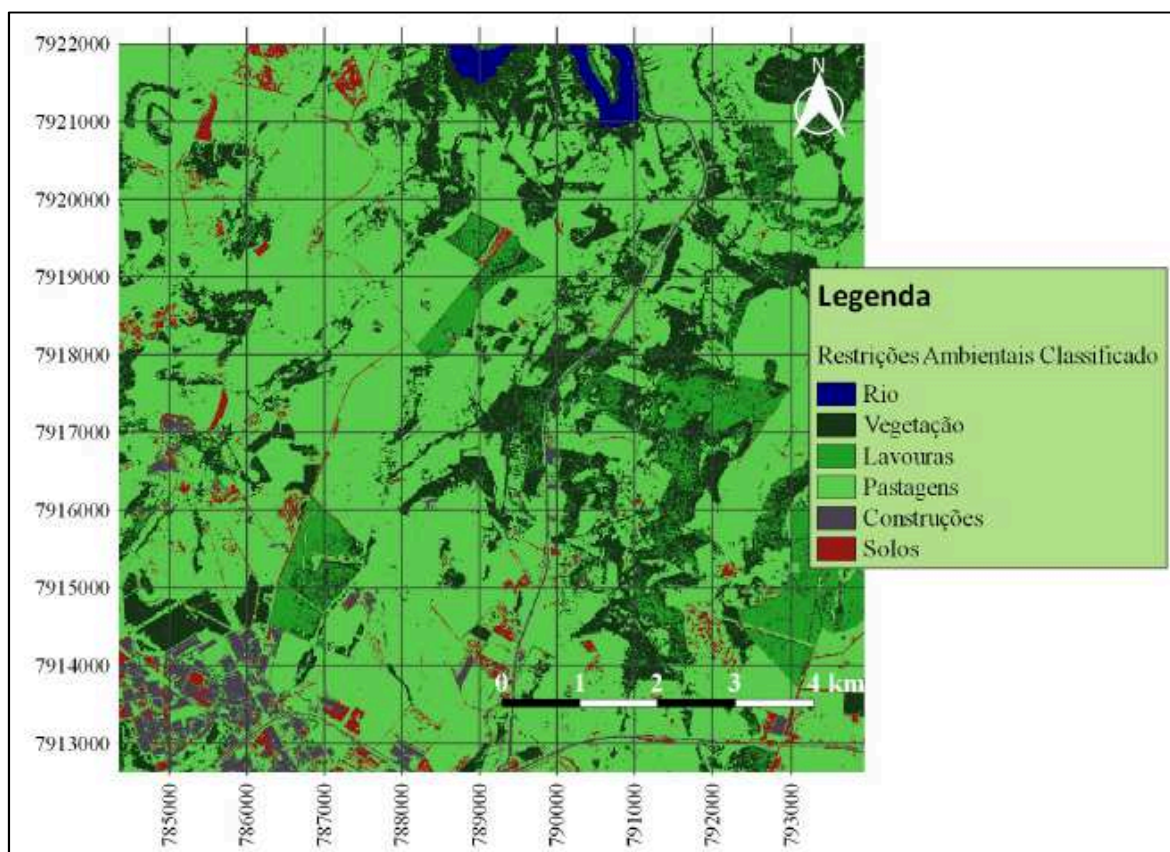
A classe Vegetação engloba todas as áreas de reserva legal e APPs, visto que não há APA's na área de estudo. Suas amostras foram coletadas dispersamente de modo que todas as variações de tonalidade de verde médio fossem capturadas para a caracterização desta classe.

Para a classe Lavouras, foram coletadas amostras na tonalidade de verde escuro, nas áreas onde é possível observar as bordas bem delimitadas. E para a classe Pastagem, as amostras foram captadas de forma espalhada sobre toda superfície com variações de tonalidades no verde claro.

As superfícies de tonalidade esbranquiçada e acinzentada obtiveram amostras representando a classe Construções e finalmente, os tons amarronzados a classe Solos, áreas onde há a existência de estradas não pavimentadas de acesso às propriedades rurais ou áreas onde não há plantação, correspondendo às regiões de pastos em reforma.

Na Figura 28 é apresentada a classificação final obtida utilizando o algoritmo de classificação ‘*maximum likelihood*’, ou, algoritmo de ‘máxima vizinhança’. Este algoritmo de classificação apresentou resultado mais satisfatório que o obtido com a classificação pelo algoritmo ‘*minimum distance*’, ou, algoritmo de ‘distância mínima’. A utilização de imagem do satélite *Sentinel-2* com resolução espacial de 10 m ajudou a obtenção de uma melhor classificação fornecendo limites entre classes mais bem definidos. Os valores de performance geral de classificação e o índice Kappa equivaleram a 93,0 % e 90,4 % respectivamente, o que indica boa performance no processamento, uma vez que estes resultados são aceitáveis para valores acima de 80,0 %.

Figura 28 – Raster restrições ambientais classificado.



Fonte: Autora (2018).

Afim de se converter a imagem classificada gerada para a escala padrão definida neste trabalho, foi necessário a reclassificação desta camada matricial pela ferramenta ‘*r.reclass*’ do GRASS 7.4.0. O *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS) é um programa livre e integrado ao QGIS e à diversas outras plataformas computacionais em SIG capaz de realizar funções de forma confiável, bem estruturada e transparente. Assim, os

algoritmos deste sistema de suporte foram utilizados em várias aplicações ao longo desta pesquisa.

Está apresentado na Tabela 3 o agrupamento das classes e a variação dos pesos atribuídos durante a reclassificação do raster restrições ambientais. As classes Pastagens e Solos foram agrupadas com o mesmo peso, igual a um, por serem as regiões mais favoráveis ambientalmente à passagem do traçado geométrico, isso porque tanto as áreas de pastagens quanto as áreas de estradas rurais são as que representam menores custos relacionados às características ambientais para a construção de uma nova estrada, ou seja, não há restrição do ponto de vista ambiental para a implantação de uma faixa de domínio nestas áreas. A classe Lavouras recebeu um peso acima porque a construção de uma estrada nestas pequenas parcelas isoladas (como se pode observar no mapa de classificação, esta não é a atividade predominante na região), acarreta maior impacto econômico e social do que em áreas de pastagens, por exemplo.

Tabela 3 – Reclassificação do raster restrições ambientais.

CLASSE INICIAL	PESO ATRIBUÍDO	DESCRIÇÃO
Pastagens e Solos	1	Áreas aptas
Lavouras	2	Restrição leve
Construções	3	Restrição moderada
Vegetações	4	Restrição forte
Rio	5	Restrição total

Fonte: Autora (2018).

A classe Construções não é uma classe que representa características inteiramente ambientais, mas que precisa ser incorporada e considerada neste mapa devido a sua restrição considerável e à impossibilidade de considerá-la como elemento pertencente às demais classes. Sendo assim, essa classe recebeu atribuição de peso médio, uma vez que a construção de uma estrada nestas áreas acarretaria maiores custos de desapropriação e demolição.

A classe Vegetações recebeu atribuição de restrição forte por ser altamente sensível ambientalmente, e nela estão inseridas as regiões de APP's e reservas legais, ou seja, aquelas onde a passagem do traçado acarretaria maiores custos financeiros e sociais, burocracia e prejuízos à fauna e flora locais. Em reservas legais, é possível a locação do traçado caso esta área não esteja averbada a propriedade rural que pertence, porém, seriam gerados maiores

custos com desmatamento e limpeza do terreno e ainda impactos ambientais significativos devido a remoção da cobertura vegetal nativa, além da burocratização do processo de desapropriação.

Na existência de APAs, que não é o caso dessa área de estudo, seria ainda mais difícil a obtenção de licenciamento ambiental autorizando sua utilização, uma vez que estas regiões geralmente contêm grande biodiversidade em fauna ou flora, e assim poderia ser requisitado um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) prevendo os impactos gerados pela construção da estrada e propondo medidas mitigadoras destes impactos. Isto acarretaria um aumento de custos, tempo de elaboração de estudos e projetos, e burocracia. Por isso, estas áreas também estariam enquadradas na classe de restrição forte.

Quanto às APP's, o Código Florestal Brasileiro (2012) traz que, estas áreas somente poderão receber intervenção ou supressão da vegetação nativa em hipóteses de utilidade pública, de interesse social ou de baixo impacto ambiental. Assim, quando não há outra solução senão a intercepção da estrada em uma área de APP, como por exemplo, necessidade de construção de obras de arte especiais e correntes, esta pode ocorrer conforme a Lei, porém, estas situações devem ser evitadas devido à geração de expressivo impacto ambiental. Por isso, as APP's foram neste trabalho consideradas como áreas de restrição forte.

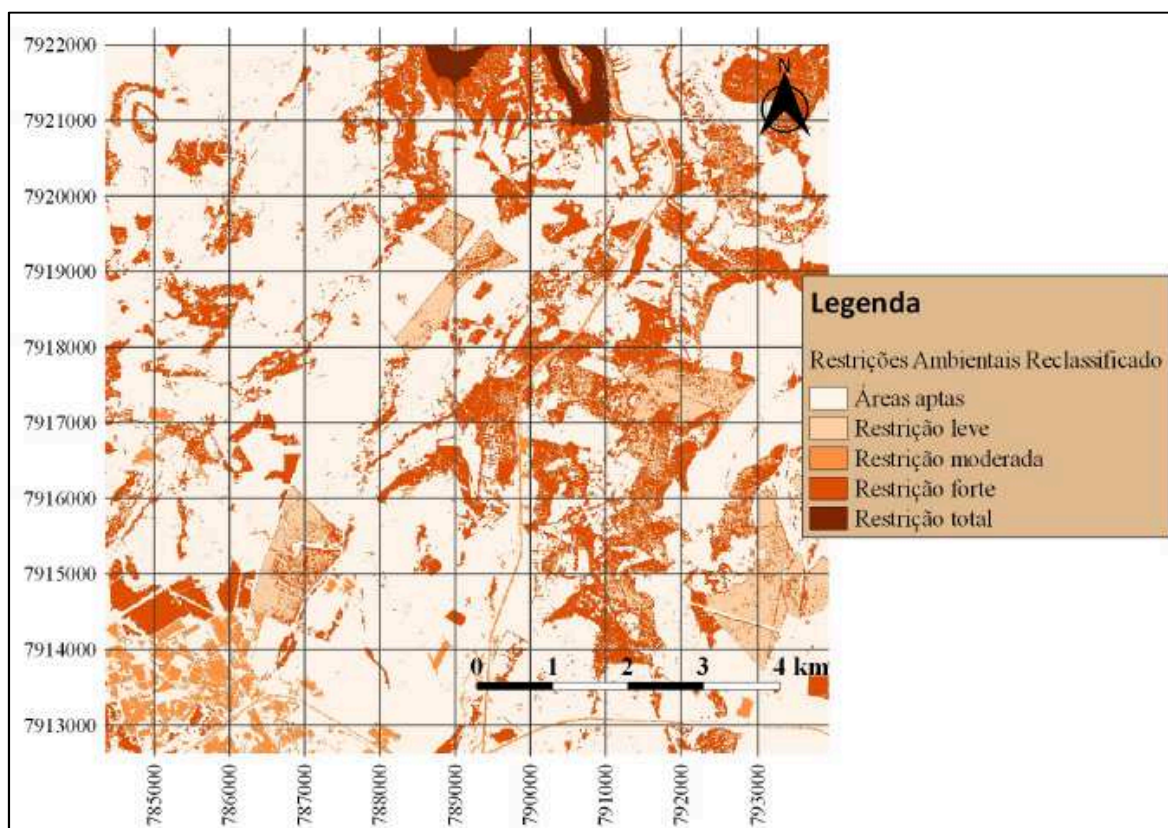
O maior peso restritivo foi atribuído à classe Rio, ou seja, regiões contendo corpos hídricos. Neste estudo foi considerado apenas o Rio Araguari, afim de que esta área fosse totalmente evitada para passagem do traçado preliminar da estrada.

Na Figura 29 está apresentado o mapa final de restrições ambientais reclassificado. Observa-se que as regiões classificadas inicialmente como Pastagens e Solos tornaram-se homogêneas, constituindo as áreas de regiões mais propícias ambientalmente à passagem do traçado. Além disso, como já mencionado, observa-se claramente as regiões isoladas de atividades de cultivo.

Um aspecto a ser observado foi a presença e classificação da BR-050 na classe Construções, como se pode observar na Figura 29. Devido as tonalidades presentes nos pixels da estrada serem semelhantes às das amostras coletadas para a classe Construções, a estrada ficou fielmente inserida dentro desta classe. Apesar de neste trabalho este fato não alterar significativamente os resultados, uma vez que a intenção é obter uma comparação entre o

traçado existente e o resultado obtido, sendo mais vantajoso que a estrada existente receba uma maior ponderação e seja evitada durante o traçado, para a obtenção de resultados mais realísticos ou em casos de aplicação da metodologia para traçados de estradas novas, a estrada deveria ser desconsiderada na classificação e homogeneizada com as características de seus vizinhos fronteiros.

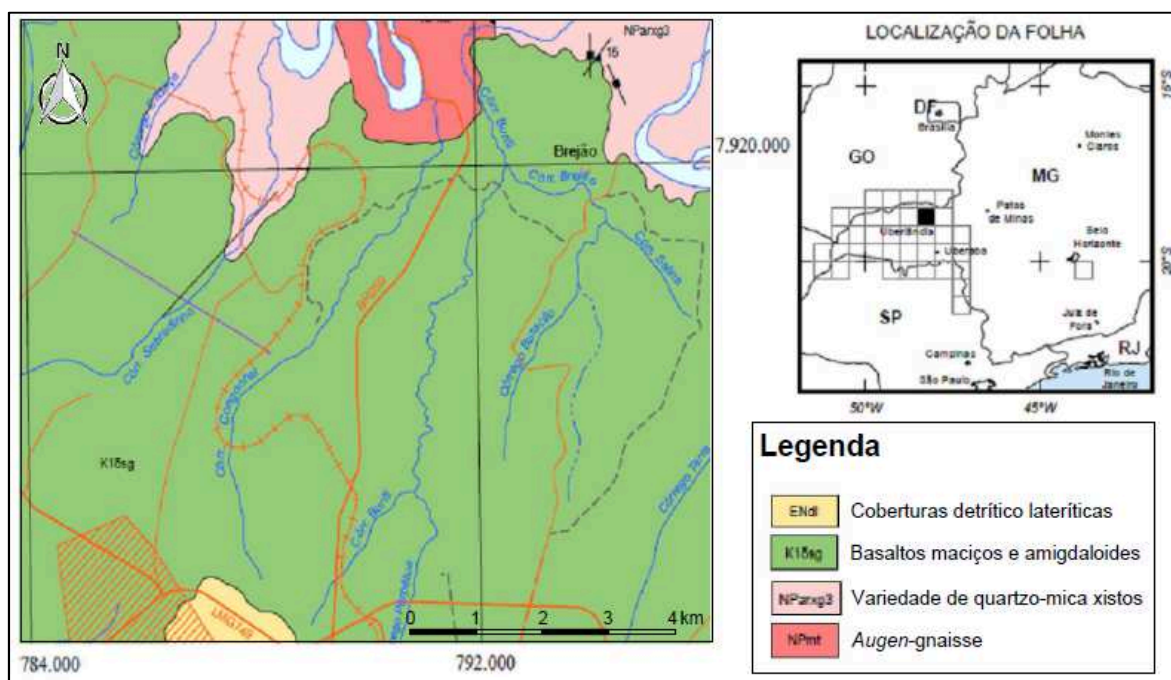
Figura 29 – Raster restrições ambientais reclassificado.



Fonte: Autora (2018).

Uma outra característica ambiental importante que poderia ser inserida nesta metodologia é a geologia da região, uma vez que as condições geológicas podem inviabilizar as diretrizes de uma estrada devido aos custos de estabilização de aterros e cortes serem significativamente altos em regiões de solos instáveis. Porém, conforme é possível observar na Figura 30, que representa o Mapa Geológico da área em estudo (PACHECO, *et al.*, 2017), não há grande variação do tipo de formações rochosas na região de estudo que pudessem alterar os resultados, então este critério não foi avaliado neste modelo. Além disso, a região não apresenta áreas de formações instáveis, o que evidencia a não necessidade de consideração deste parâmetro no modelo.

Figura 30 – Mapa geológico da área de estudo.



*Datum: WGS 84/ UTM zona 22S.

Fonte: PACHECO, *et al.* (2017).

3.2.2. Elaboração do Raster Desapropriação

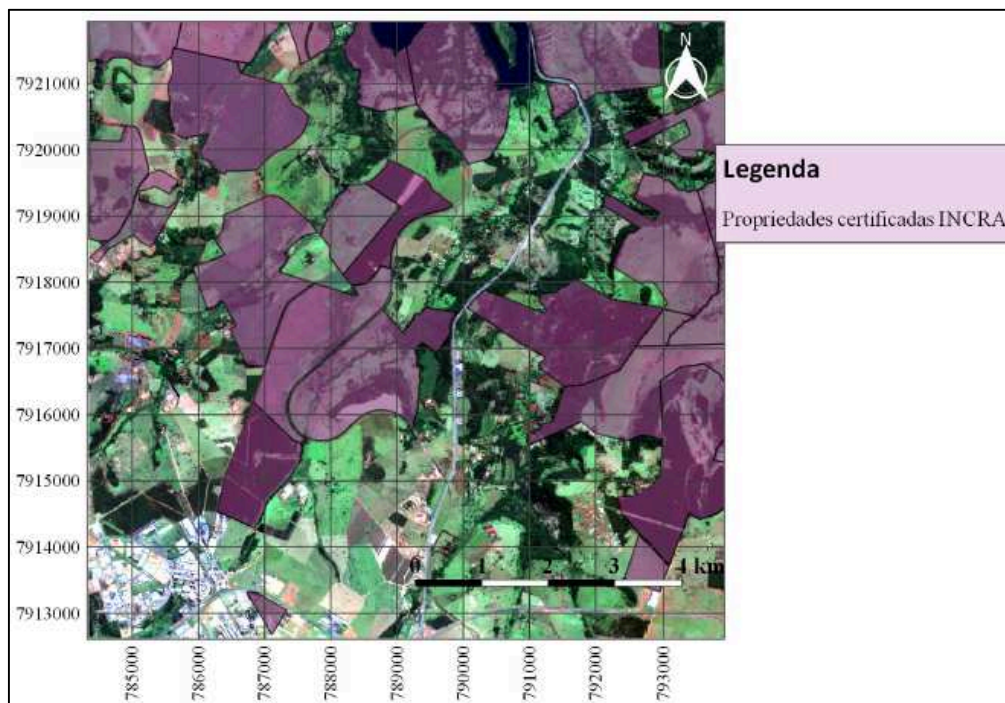
Para a elaboração da camada contendo as informações referentes aos custos de desapropriação de propriedades, aqui designada como *Raster Desapropriação*, seria necessário a posse de um mapa de uso e ocupação do solo da área rural do município de Uberlândia, ou seja, seria preciso a obtenção de um mapa contendo os limites de todas as propriedades rurais que estão dentro da área de estudo, para que assim, cada propriedade recebesse seu valor imobiliário. Porém, constatou-se a inexistência desse mapa ou de qualquer outro arquivo semelhante nos registros da Prefeitura Municipal de Uberlândia, e o levantamento dessas áreas por meio de consultas a matrículas ou registros nos cartórios demandaria muito tempo inviabilizando sua aplicação nesta pesquisa.

Assim, por meio da consulta ao Acervo Fundiário do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), foi possível a obtenção dos arquivos em formato vetorial contendo as propriedades rurais certificadas por estado do Brasil atualizadas quinzenalmente no *website*.

De posse do arquivo vetorial contendo as propriedades certificadas pelo INCRA no estado de Minas Gerais, foi feito seu recorte por meio da ferramenta de geoprocessamento de camadas vetoriais ‘Recortar’ gerando então um mapa com a delimitação de todas as propriedades rurais certificadas presentes na área de estudo representadas por polígonos, conforme é possível se observar na Figura 31. A camada vetorial está sobreposta à camada matricial da imagem de satélite apenas para facilitação da visualização da localização das propriedades rurais dentro da área de estudo.

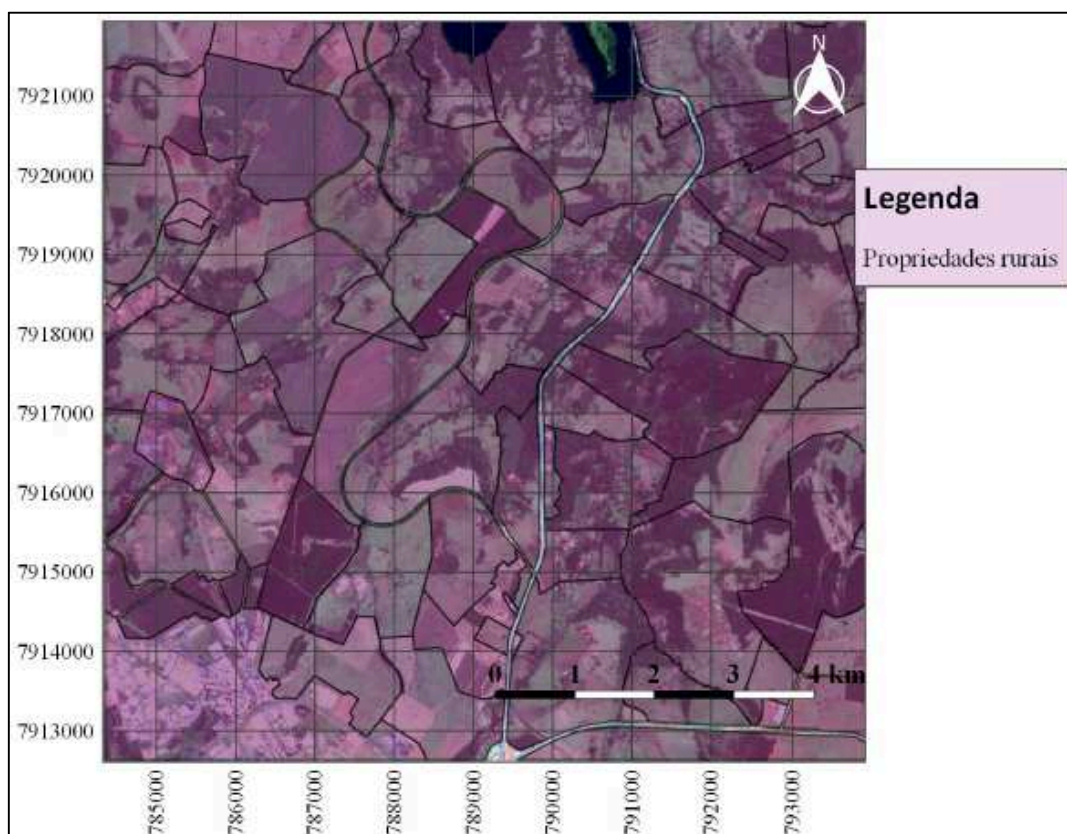
Como não foi possível a obtenção de todas as propriedades rurais contidas na área de estudo, foi realizada uma vetorização, ou seja, a digitalização, complementando esta camada com as demais propriedades. Para isso, foram considerados como limites das propriedades rurais inseridas todas as estradas pavimentadas e não pavimentadas e os pastos e lavouras de mesma característica, conforme apresentado na Figura 32. Ressalta-se que esta foi a melhor simplificação encontrada, uma vez que a inexistência de banco de dados impossibilitou a realização do trabalho de forma fiel à realidade. Porém, para efeitos de aplicação desta metodologia, esta simplificação forneceu resultados satisfatórios.

Figura 31 – Propriedades rurais certificadas pelo INCRA.



Fonte: INCRA (2018), modificado pela autora (2018).

Figura 32 – Propriedades rurais da área de estudo.



Fonte: Autora (2018).

Para a realização da avaliação das áreas o DNIT sugere a utilização do Método Evolutivo, apresentado no manual Diretrizes Básicas para Desapropriação (DNIT, 2011), na NBR 14653-1/2001 Avaliação de bens – Parte 1: Procedimentos gerais e na NBR 14653-3/2001 Avaliação de bens – Parte 3: Imóveis rurais.

O Método Evolutivo, conforme definição constante na NBR 14653-1/2001, consiste na identificação do valor do bem pelo somatório dos valores de seus componentes. Assim, fazem parte dos custos o valor de mercado do terreno mais os custos de benfeitorias da propriedade, que variam conforme idade e padrão das construções.

Como nesta pesquisa não foram desenvolvidas funções custo para os critérios analisados, mas sim uma análise inteiramente espacial, não foi necessário a realização do Método Evolutivo para avaliação das propriedades. Trabalhou-se apenas com os pesos relativos que cada propriedade possui conforme sua localização e algumas considerações adotadas de acordo com o manual Diretrizes Básicas para Desapropriação (DNIT, 2011).

Assim, considerou-se na definição dos pesos apenas o valor de mercado do terreno, uma vez que para a consideração de custos de benfeitorias seria necessário a condução de pesquisas em campo, o que inviabilizou a análise devido ao consumo de tempo. Além disso, os custos destas benfeitorias não alteram de forma expressiva o custo unitário do imóvel, que é o parâmetro importante nesta pesquisa, e que orientou a adoção do peso final de cada propriedade.

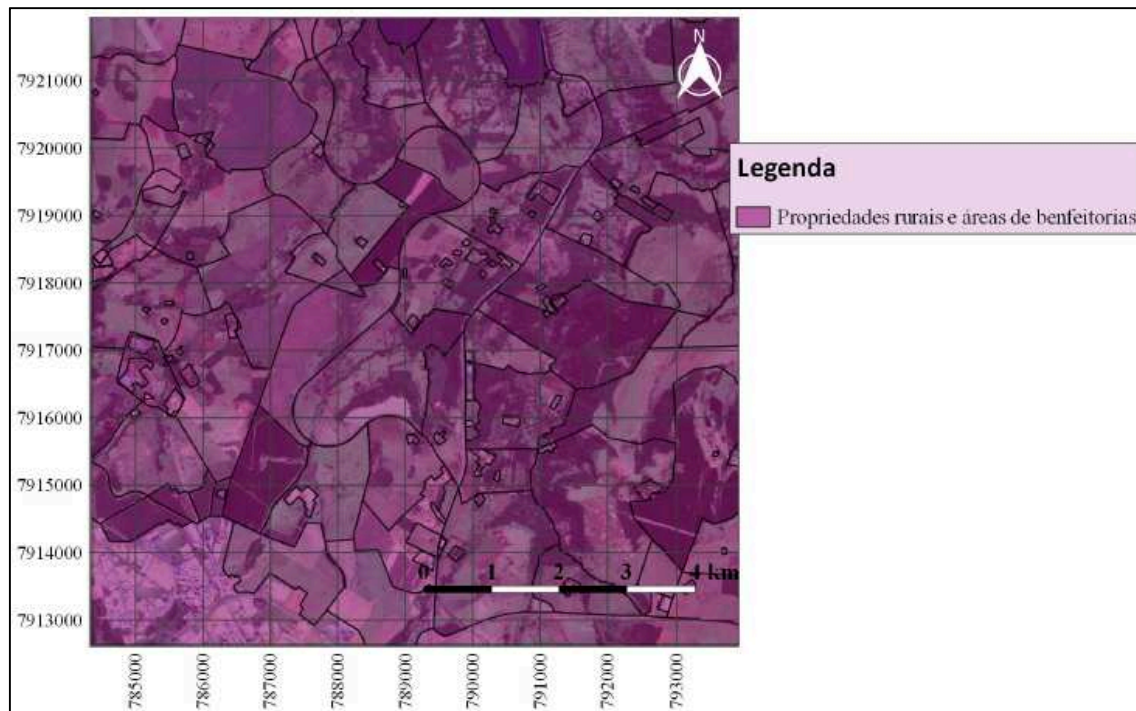
O único constrangimento gerado pela passagem do traçado sobre essas regiões que receberam benfeitorias, principalmente edificações, seria em aspecto social e burocrático. Assim, essas regiões que possuem benfeitorias não reprodutivas, que são caracterizadas como edificações, entraram na análise durante a parametrização da camada com a atribuição de pesos máximos, afim de que elas fossem evitadas na locação do traçado. Por outro lado, as benfeitorias que não se enquadram em edificações, como cercas, porteiras, poços, entre outros, e benfeitorias reprodutivas, que são fruteiras e lavouras de subsistência, não fizeram parte da análise pelos motivos já mencionados.

Desta forma, após a vetorização da camada delimitando o restante das propriedades rurais contidas na área de estudo, foi feita a vetorização das áreas de benfeitorias não reprodutivas, ou seja, apenas as áreas edificadas. Esta digitalização foi feita também sobre a imagem de satélite, onde, nas regiões com edificações existentes, foram construídos polígonos caracterizados como feições independentes das propriedades rurais. Na Figura 33 é apresentado o mapa final obtido após a vetorização. Ressalta-se ainda que a presença de estradas não foi considerada neste mapa, uma vez que este critério não foi analisado neste estudo. Desta forma, os limites das propriedades que possuem fronteiras com estradas, foram tomados até o eixo destas, homogeneizando o mapa final obtido.

Os pesos foram distribuídos conforme a escala padrão. Considerou-se que os valores de mercado dos terrenos variam de forma linear em regiões concêntricas em relação ao limite da área urbana de Uberlândia, conforme demonstrado na Figura 34. As regiões mais próximas à cidade de Uberlândia e ao Rio Araguari possuíram maior valor imobiliário agregado – Regiões 1 e 9, e as faixas de regiões intermediárias à essas áreas de extremo receberam atribuições de peso de forma decrescente a partir de suas regiões vizinhas de peso superior. As pequenas áreas delimitadas em roxo escuro correspondem as áreas de

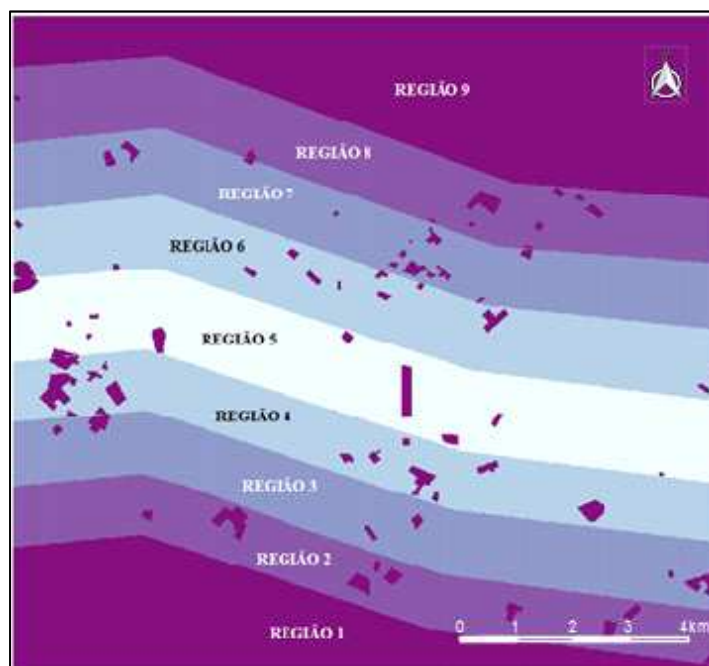
benfeitoria. Na Tabela 4 está apresentada a parametrização da camada desapropriações apontando o agrupamento das regiões e os pesos atribuídos a elas.

Figura 33 – Propriedades rurais e áreas de benfeitoria da área de estudo.



Fonte: Autora (2018).

Figura 34 – Faixas de regiões equivalentes de distribuição de pesos referentes ao valor imobiliário do terreno.



Fonte: Autora (2018).

Tabela 4 – Parametrização da camada desapropriações.

CLASSE INICIAL	PESO ATRIBUÍDO	DESCRIÇÃO
Região 5	1	Menor valor
Regiões 4 e 6	2	Valor intermediário baixo
Regiões 3 e 7	3	Valor intermediário
Regiões 2 e 8	4	Valor intermediário alto
Regiões 1 e 9 e áreas de benfeitorias	5	Maior valor

Fonte: Autora (2018).

Durante o procedimento de vetorização e distribuição de pesos, a tabela de atributos desta camada foi criada contendo os campos Identidade, referente a identificação da feição, Peso, referente ao peso atribuído para cada propriedade rural, conforme a Tabela 4, e Origem, relativo à origem do dado, INCRA ou digitalizado. Na Figura 35 está apresentada a janela contendo esta tabela de atributos.

Figura 35 – Tabela de atributos da camada vetorial desapropriações.

ID	PESO	ORIGEM
1	1	5 INCRA
2	10	4 INCRA
3	11	5 INCRA
4	12	1 INCRA
5	13	3 INCRA
6	14	3 INCRA
7	15	3 INCRA
8	16	2 INCRA
9	17	2 INCRA
10	18	2 INCRA
11	19	1 INCRA
12	2	5 INCRA
13	20	4 INCRA

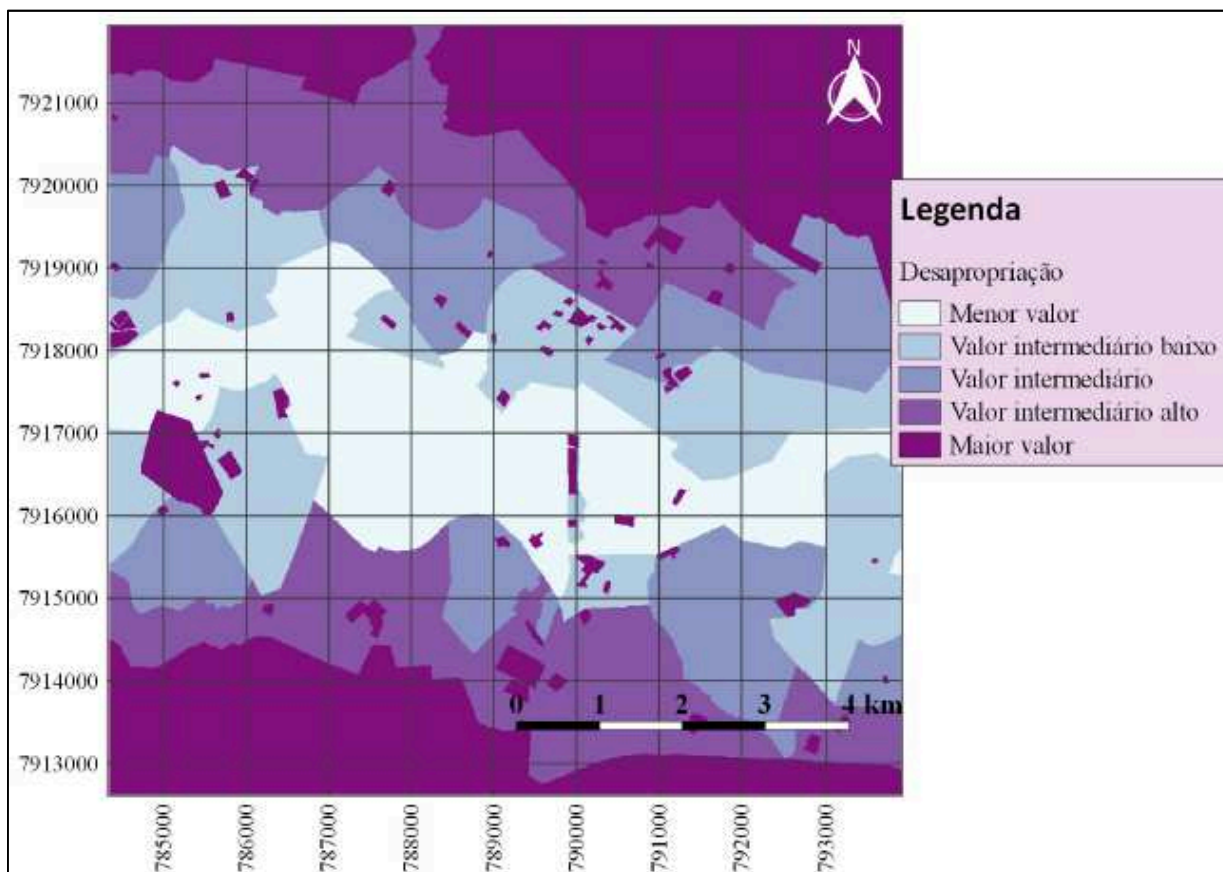
Fonte: Autora (2018).

Afim de se trabalhar com a mesma estrutura computacional, que neste trabalho foi o formato matricial, essa camada vetorial foi convertida para *raster* pela ferramenta do GRASS ‘*v.to.rast.attribute*’. Esta ferramenta permitiu a simultânea conversão e parametrização da

camada vetorial pelo campo Pesos. Assim, a imagem final obtida já está classificada na escala padrão, conforme está apresentando na Figura 36.

É possível observar na Figura 36 que as regiões classificadas do raster desapropriação obtido tem formato irregular, ao contrário das faixas delimitadas para atribuição dos pesos demonstrada na Figura 34. Isso tornou a parametrização deste critério mais realística, uma vez que uma propriedade rural recebeu um valor uniforme dentro de toda sua área. Quando uma propriedade possuiu área dentro de mais de uma região, seu valor foi atribuído conforme a região em que maior parte de sua área foi inserida. Ressalta-se ainda que a área onde encontra-se o Rio Araguari foi classe dentro das áreas de maior imobiliário, reforçando sua restrição quanto a passagem do traçado.

Figura 36 – Raster desapropriação.



Fonte: Autora (2018).

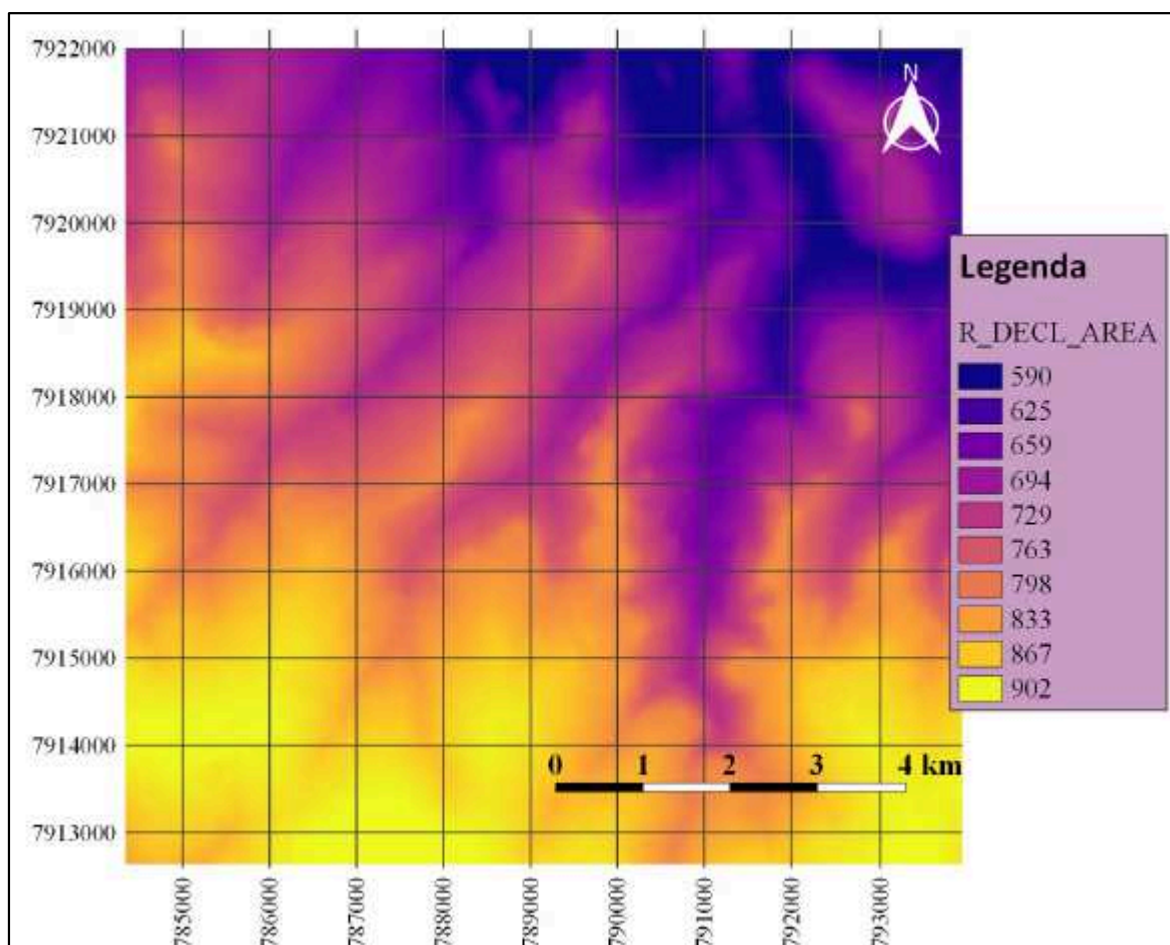
3.2.3. Elaboração do Raster Declividade

O *raster* declividade foi trabalhado sobre um Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE é uma imagem onde o valor armazenado de cada pixel representa a cota altimétrica do

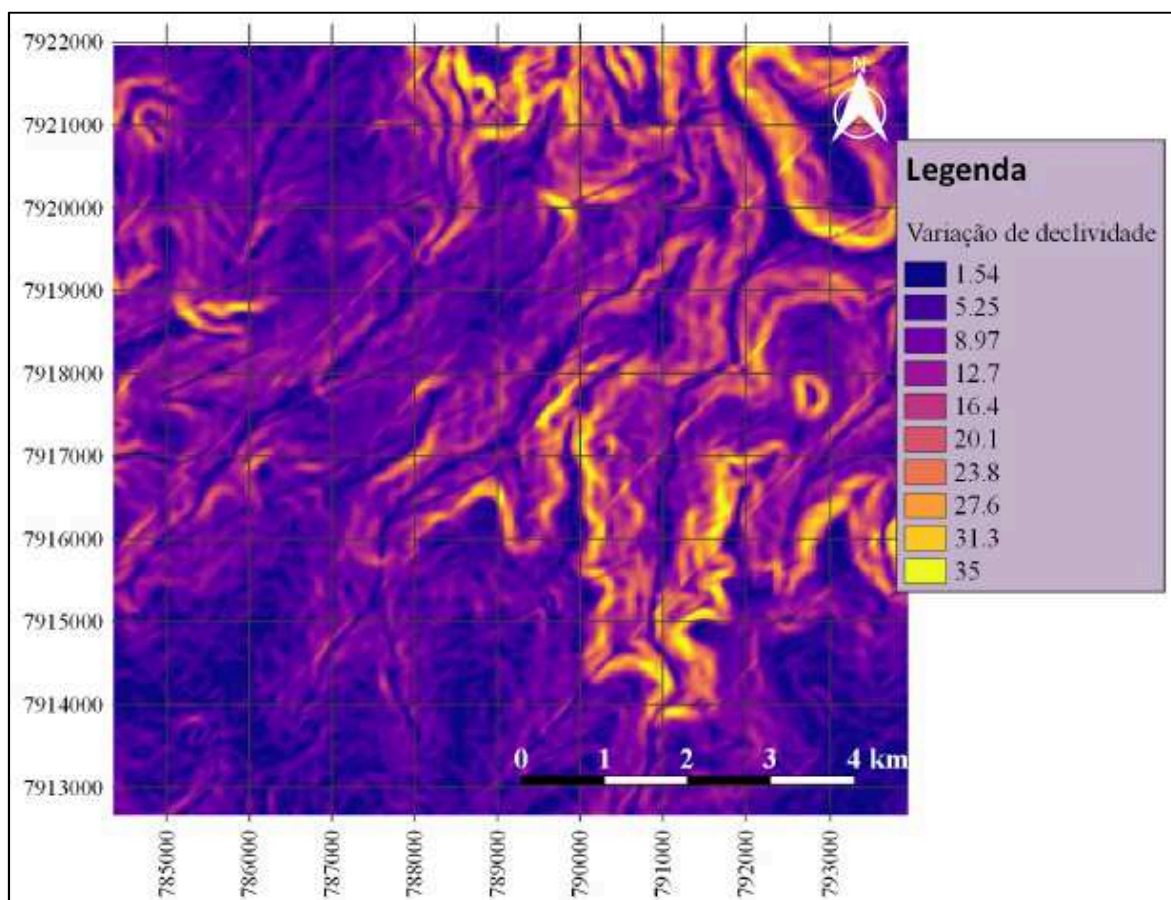
terreno naquela posição. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) possui um banco de dados *online*, chamado de Topodata, com arquivos de MDE de toda a superfície brasileira disponíveis para *download* e compatíveis para a utilização em SIG. Este banco de dados foi consultado para o levantamento da MDE referente a área de estudo. A quadrícula contendo a área de estudo é a 18S495.

O arquivo baixado foi reprojetado para o *Datum* de trabalho SIRGAS 2000/ UTM zona 22S e depois recortado nas dimensões da área de estudo – Figura 37. Para a extração da declividade desta camada, foi aplicada a ferramenta de análise de *raster* ‘MDE’ com a seleção do modo ‘Declividade’. Além disso, foi escolhida a opção de declividade expressa em porcentagem, ao invés de graus. Assim, o *raster* obtido contém nos valores de seus pixels, a declividade do terreno nos pontos que pertence. Na Figura 38 é apresentado o *raster* declividade obtido.

Figura 37 – MDE da área de estudo.



Fonte: DSR/INPE (2018), modificado pela autora (2018).

Figura 38 – *Raster* de declividade da área de estudo.

Fonte: Autora (2018).

A parametrização deste *raster* foi realizada de acordo com a variação de declividades presentes no terreno. Uma vez que a rampa máxima permitida para esta classe de rodovia é de 4,50 %, como mostrado na Tabela 5, o peso um foi atribuído para declividades constantes neste intervalo, assim os melhores caminhos para passagem do traçado foram estes onde as declividades estão dentro da máxima permitida, reduzindo assim a movimentação de terra para a atividade de terraplenagem ou a necessidade de realização de curvas para vencer os desníveis do terreno.

Tabela 5 – Tabela de parametrização do *raster* declividade.

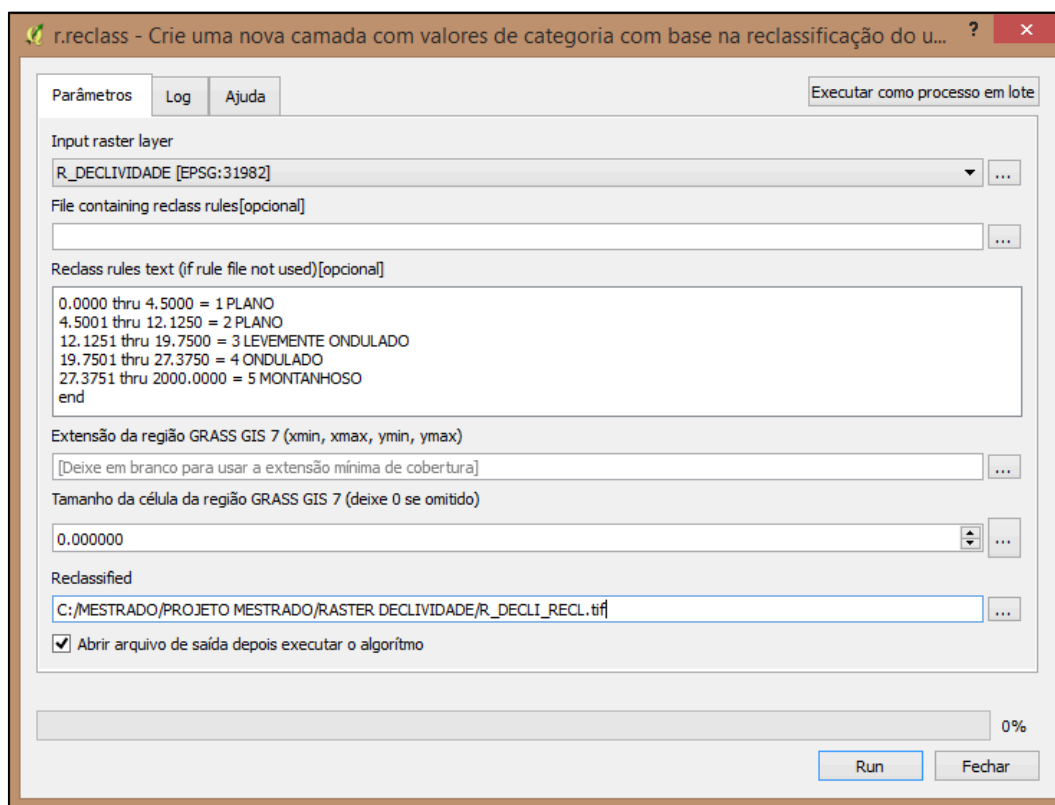
CLASSE INICIAL	PESO ATRIBUÍDO	DESCRIÇÃO
0 - 4,50 %	1	Relevo plano (dentro do limite de rampas)
4,50 - 12,125 %	2	Relevo plano (fora do limite de rampas)
12,125 - 19,75 %	3	Relevo levemente ondulado
19,75 - 27,375 %	4	Relevo ondulado
> 27,375 %	5	Relevo montanhoso

Fonte: Autora (2018).

A máxima declividade encontrada no terreno foi de 35,0 %, assim, os restantes dos pesos foram aplicados dentro deste intervalo, 4,50 a 35,0 %, em subintervalos iguais, conforme apresentado na Tabela 5. Desta forma, onde não foi possível a passagem do traçado em locais de peso um devido à restrição pelos outros critérios de projeto, a escolha foi feita gradativamente dos locais de menores para os locais de maiores declividades, focando assim, sempre, na redução dos custos de terraplenagem, até que isso seja inevitável e a estrada precise atravessar regiões de maiores declividades.

Para a realização da parametrização do *raster* declividade foi utilizada a ferramenta de reclassificação de *rasters* ‘r.reclass’ contendo a regra descrita na Tabela 5. Na Figura 39 está apresentada a janela deste comando do GRASS.

Figura 39 – Janela do comando ‘r.reclass’ do GRASS.

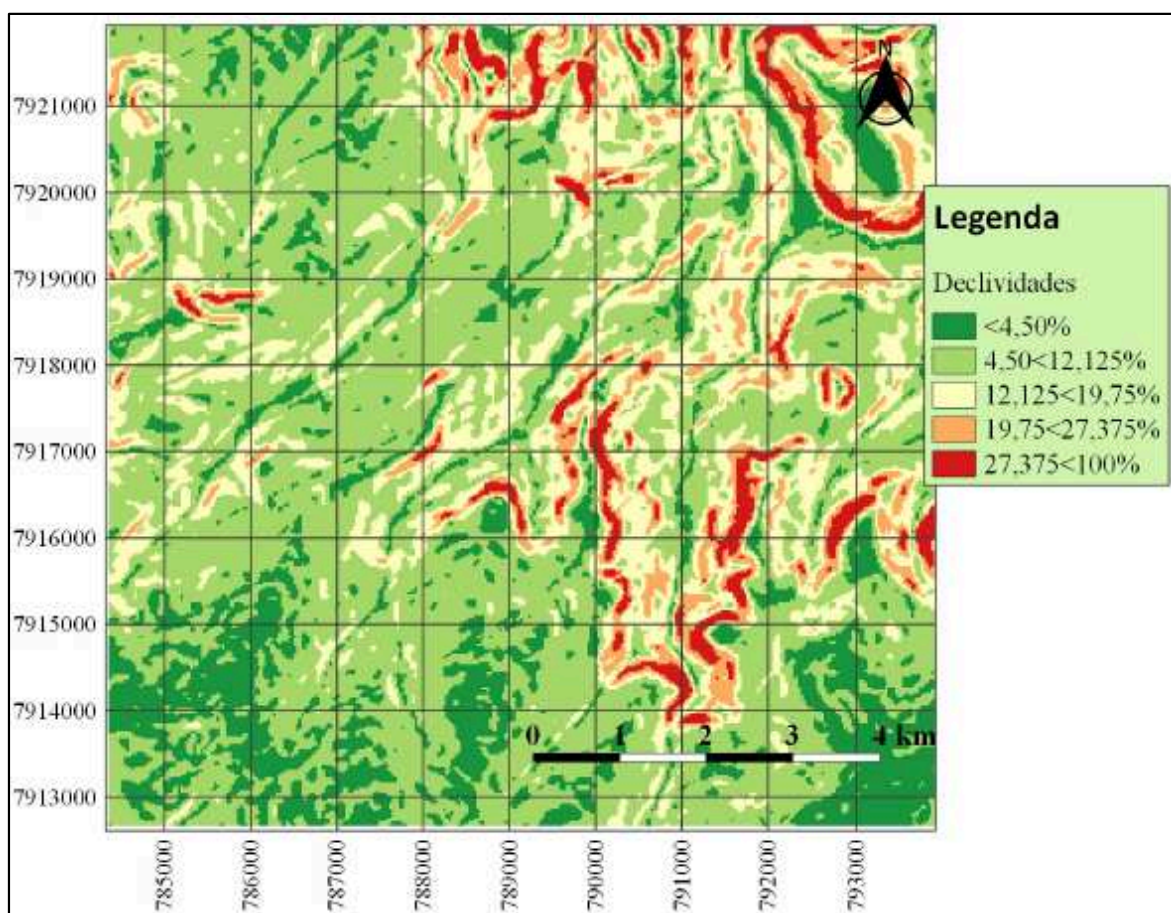


Fonte: Autora (2018).

O *raster* declividade final obtido após a reclassificação do *raster* declividade está apresentado na Figura 40. Observa-se que poucas regiões apresentam declividades inferiores a máxima permitida de 4,50 %, por isso, a divisão das classes dentro do intervalo de declividade constante na área de estudo, de 0 a 35%, foi a melhor forma para parametrização encontrada. Se a parametrização tivesse sido feita dentro do intervalo de declividades de 0 a

100 %, a maioria do terreno se enquadraria dentro da primeira classe de declividades, sendo esta de 0 a 20 %, e dessa forma, os resultados obtidos seriam poucos trabalháveis e realísticos. Nota-se também que poucas áreas se enquadraram na classe de declividade entre 27,375 a 100 %, mostrando que a região de estudo possui poucas áreas de relevo acidentado. A maioria das áreas encontram-se no intervalo de declividade de 12,125 a 19,75 %, caracterizando o relevo do terreno de plano a levemente ondulado.

Figura 40 – Raster declividade reclassificado.





Fonte: Autora (2018).

3.2.4. Aplicação de AHP para Análise de Tomada de Decisão

De posse de todas as camadas parametrizadas, foi aplicado então o método AHP para a determinação do peso que cada critério recebeu na tomada de decisão final. A matriz foi montada com todos os critérios já mencionados, exceto o 'critério 1: redução do comprimento total da estrada', que foi incorporado na etapa final de roteirização.

Foi solicitado a um grupo de três especialistas em Infraestrutura e Planejamento de Transportes, com formação em engenharia civil, que indicassem em um questionário a ponderação de cada elemento pareado com os demais, ou seja, que avaliassem, em termos quantitativos, qual a importância que cada critério possui para a tomada de decisão durante a elaboração de um traçado preliminar de estradas. O questionário apresentou perguntas sobre a avaliação pareada da importância de cada fator, conforme a técnica AHP, que foram respondidas em uma escala de 1 a 9. O questionário fornecido aos especialistas está apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Questionário para aplicação do método AHP.

		UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA		
		PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		
		INFRAESTRUTURA E PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES		
QUESTIONÁRIO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO ANALYTICAL HIERARCHIC PROCESS (AHP) NA PONDERAÇÃO DE CRITÉRIOS				
Data:	Junho de 2018			
FORMULÁRIO PARA ESPECIALISTAS				
<p>Em um ambiente de projetos geométricos de estradas, especificamente na fase de desenvolvimento de projetos preliminares, a escolha de um traçado preliminar é apontada como um termo passível a modificações significativas, em que, os critérios Restrições Ambientais (presença de APP's, reservas legais e corpos hídricos), Devididade e Custos de Desapropriação são determinantes para a sua obtenção. De acordo com estes critérios, responda as questões solicitadas considerando a escala de intensidade de importância contida no Quadro 01 apresentado a seguir.</p>				
QUADRO 01 - ESCALA FUNDAMENTAL DE NÚMEROS ABSOLUTOS DE SAATY (1991)				
INTENSIDADE DE IMPORTÂNCIA	DEFINIÇÃO		EXPLICAÇÃO	
1	Mesma importância		As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.	
3	Importância pequena de uma sobre a outra		A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra.	
5	Importância grande ou essencial		A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra.	
7	Importância muito grande ou demonstrada		Uma atividade é fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.	
9	Importância absoluta		A evidência favorece uma atividade em relação a outra com o mais alto grau de certeza.	
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes		Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.	
QUESTIONÁRIO				
CENÁRIO 1	Com relação às Restrições Ambientais, qual dos parâmetros abaixo possui maior relevância?			INTENSIDADE DE IMPORTÂNCIA
a)	Devididade			
b)	Custos de Desapropriação			
CENÁRIO 2	Com relação à Devididade, qual dos parâmetros abaixo possui maior relevância?			INTENSIDADE DE IMPORTÂNCIA
a)	Restrições Ambientais			
b)	Custos de Desapropriação			
CENÁRIO 3	Com relação aos Custos de Desapropriação, qual dos parâmetros abaixo possui maior relevância?			INTENSIDADE DE IMPORTÂNCIA
a)	Restrições Ambientais			
b)	Devididade			

Fonte: Autora (2018).

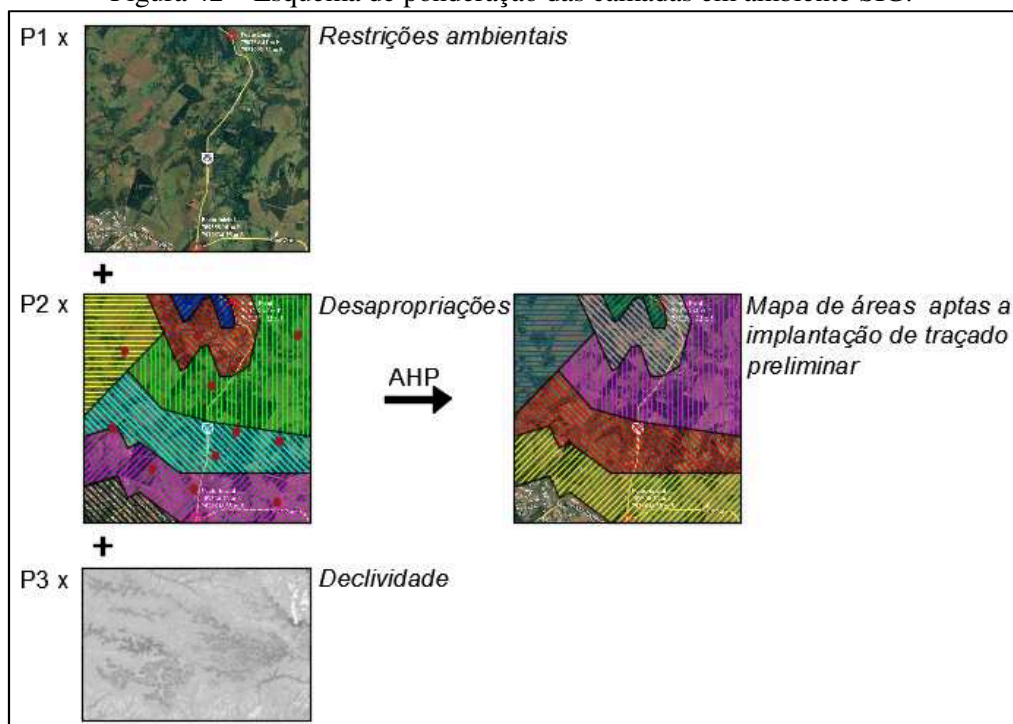
O resultado da AHP é um autovetor cujos valores componentes correspondem ao peso que cada camada receberá no processo de formação do mapa final de regiões aptas a receberem o traçado preliminar por meio da rotina calculadora *raster* no SIG. Estes pesos variam de 0 a 1 e a somatória de todos os pesos é igual a 1. Foram calculados os valores dos autovalores máximos para a matriz obtida de cada especialista para a escolha do resultado a ser utilizado.

3.2.5. Elaboração dos Mapas Finais de Áreas Aptas

Após a modelagem e parametrização das três camadas que contém as informações referentes a cada critério analisado, estas puderam então ser sobrepostas para a formação dos mapas finais de áreas aptas a receberem o traçado preliminar da estrada.

Dois cenários foram montados para a elaboração destes mapas. No primeiro, não houve a aplicação do método AHP na soma dos critérios, ou seja, considerou-se que os três critérios analisados possuem peso igual ($P1 = P2 = P3 = 1$) durante a tomada de decisão final para escolha de passagem do traçado. Já no segundo cenário, houve a aplicação dos pesos obtidos pela aplicação do método AHP, assim, cada critério recebeu durante a operação de soma, seu peso relativo às outras camadas ($P1 \neq P2 \neq P3$), conforme exemplo apresentado na Figura 42.

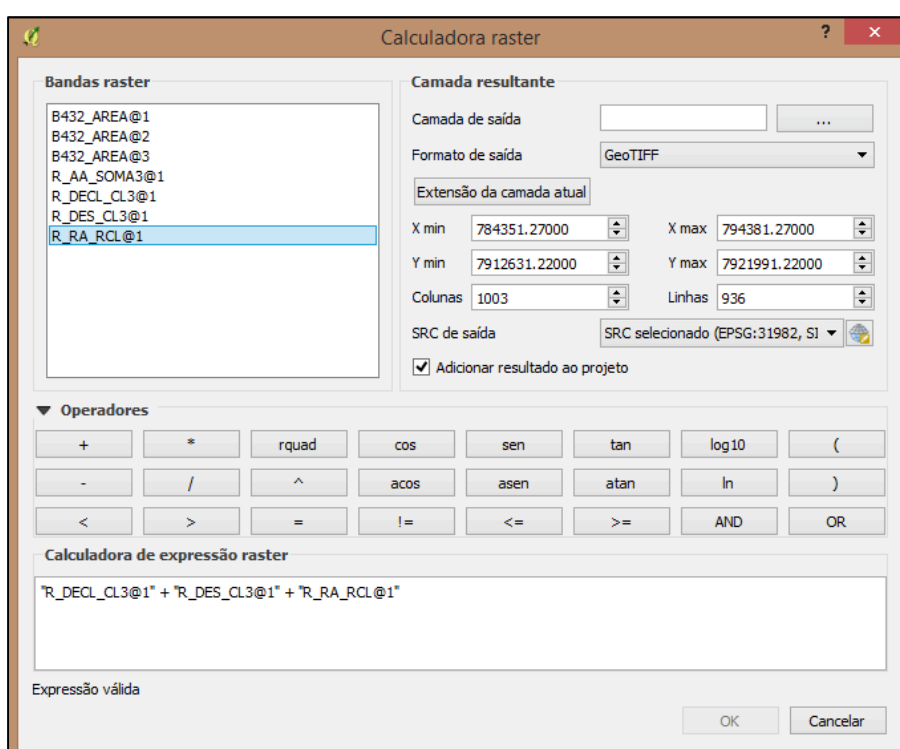
Figura 42 – Esquema de ponderação das camadas em ambiente SIG.



Fonte: Autora (2018).

Com todos os mapas dos critérios gerados em ambiente SIG, a elaboração dos mapas de áreas aptas contou com o uso da ferramenta do QGis ‘calculadora *raster*’. Na Figura 43 está apresentada a tela desta ferramenta aplicada ao Cenário 1, em que foram definidos o local, nome e sistema referencial de coordenadas do arquivo a ser gerado e escrita a equação a ser desenvolvida no campo ‘Calculadora de expressão *raster*’. Para que este procedimento fosse aplicado de forma correta, todos os arquivos de entrada deveram conter malhas e limites iguais. Para o Cenário 2, a única diferença foi a multiplicação de cada camada considerada pelo peso obtido no método AHP.

Figura 43 – Ferramenta ‘Calculadora raster’ do QGis – Cenário 1.



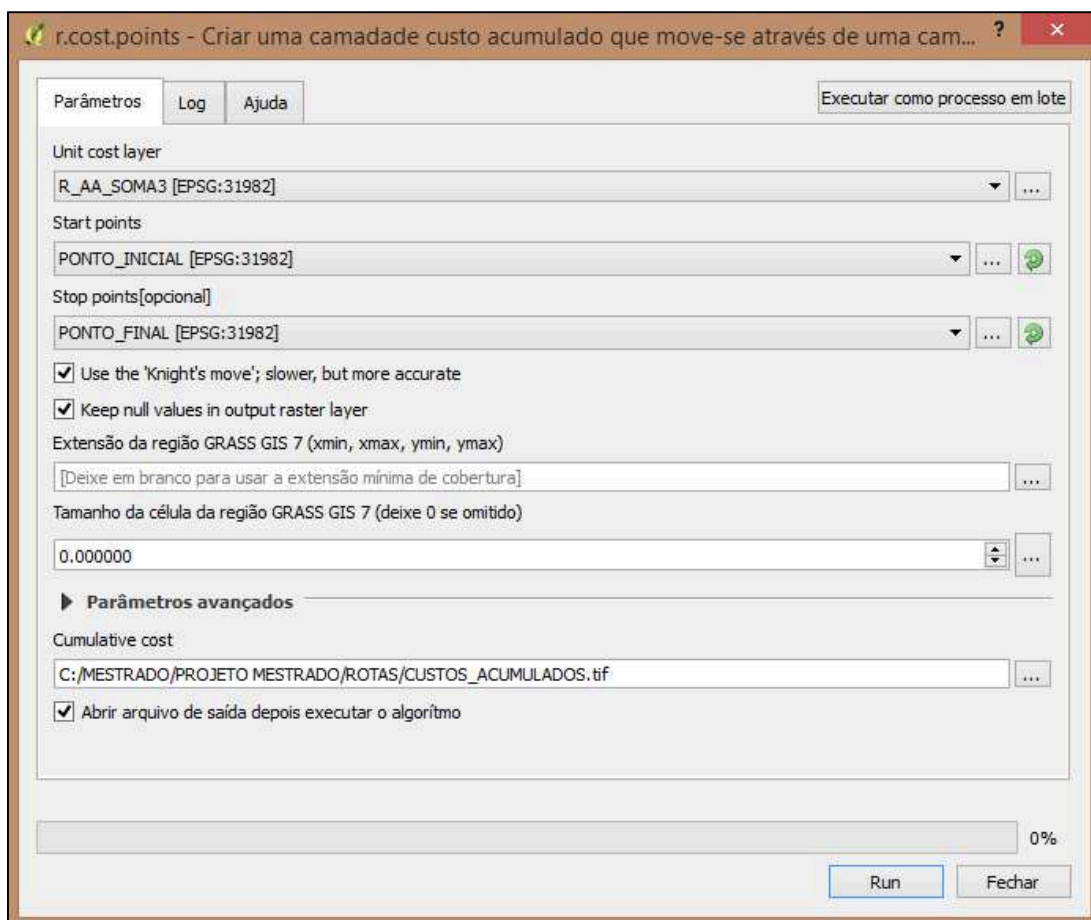
Fonte: Autora (2018).

3.2.6. Aplicação de Ferramenta de Roteirização

A obtenção do traçado preliminar envolveu a utilização de duas ferramentas. Primeiro, o *raster* de áreas aptas obtido foi transformado, por meio da ferramenta ‘*r.cost.points*’ do GRASS, em um *raster* de custos acumulados. O algoritmo incorporado à ferramenta foi capaz de criar uma camada de custos acumulado considerando a camada de áreas aptas, a partir do ponto inicial até o ponto final. Na camada de custos obtida os valores de cada pixel representam custos acumulados partindo-se da consideração de que os custos unitários equivaleram aos pesos atribuídos inicialmente na escala de trabalho definida (1 a 5). Na

Figura 44 é apresentada a janela do comando em que foram preenchidos os campos requerendo a camada de custos unitários, os pontos inicial e final, e nome do arquivo de saída.

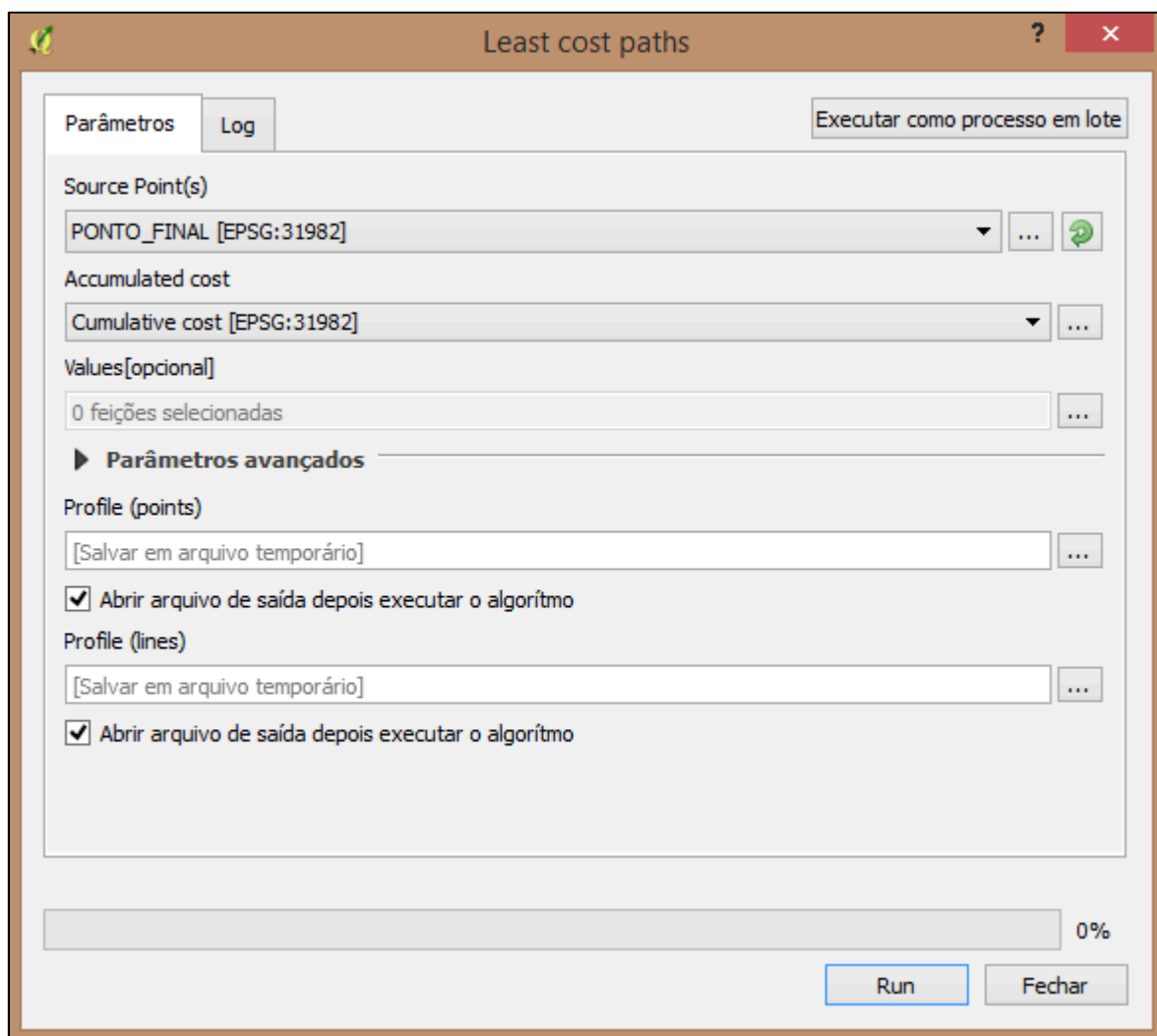
Figura 44 – Janela do comando ‘*r.cost.points*’ do GRASS.



Fonte: Autora (2018).

Após a obtenção do *raster* de custos acumulados, foi então utilizada a ferramenta ‘*Least Cost Paths*’ do *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA), que como o GRASS, é um *software* livre e integrado ao QGIS. Desta forma, o resultado calculado por meio da ferramenta forneceu o traçado de menor caminho possível com o menor custo atribuído, que nesta pesquisa representa o traçado preliminar da estrada. Ou seja, o menor traçado contém os menores custos de construção, operação e manutenção e o custo unitário atribuído (pesos) fornecem as áreas restritivas, conforme os critérios considerados. Na Figura 45 é apresentada a janela do comando, os dados de entrada foram, o ponto final, uma vez que a ferramenta considera como início do caminho o ponto de custo acumulado igual a zero, e o *raster* de custos acumulados obtido anteriormente.

Figura 45 – Janela do comando ‘Least Cost Paths’ do SAGA.



Fonte: Autora (2018).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo visa apresentar e discutir os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta nesta pesquisa.

4.1. Resultados

Os resultados gerados nesta pesquisa estão divididos em dois cenários, sendo eles:

- Cenário 1: Mapa de áreas aptas sem ponderação dos critérios e geração de traçado preliminar;
- Cenário 2: Mapa de áreas aptas com ponderação dos critérios pelo método AHP e geração de traçado preliminar.

4.1.1. Pesos Obtidos pelo Método AHP

Na Tabela 6 estão apresentadas as matrizes dominantes, pesos calculados (autovetor), autovalor máximo (λ_{\max}), índice de consistência (IC), índice aleatório (IR) e razão de consistência (CR) obtidos para cada especialista consultado.

Tabela 6 – Ponderação obtida pela AHP a partir dos especialistas.

ESPECIALISTA 1					
CRITÉRIOS	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2	CRITÉRIO 3	PESOS CALCULADOS	$\lambda_{\max} =$ 3.1132
CRITÉRIO 1	1	1/6	1/9	0.0571	IC = 0.0566
CRITÉRIO 2	6	1	1/4	0.2280	IR = 0.5800
CRITÉRIO 3	9	4	1	0.6486	RC = 0.0976
ESPECIALISTA 2					
CRITÉRIOS	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2	CRITÉRIO 3	PESOS CALCULADOS	$\lambda_{\max} =$ 3.0958
CRITÉRIO 1	1	1/3	1/6	0.0915	IC = 0.0479
CRITÉRIO 2	3	1	1/5	0.2014	IR = 0.5800
CRITÉRIO 3	6	5	1	0.7071	RC = 0.0826
ESPECIALISTA 3					
CRITÉRIOS	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2	CRITÉRIO 3	PESOS CALCULADOS	$\lambda_{\max} =$ 3.0951
CRITÉRIO 1	1	1	1/2	0.2290	IC = 0.0475
CRITÉRIO 2	1	1	1/5	0.1702	IR = 0.5800
CRITÉRIO 3	2	5	1	0.6008	RC = 0.0820

Fonte: Autora (2018).

Como é possível observar na Tabela 6, o menor valor de razão de consistência obtido foi o do Especialista 3. Desta forma, os pesos calculados pela análise das respostas deste Especialista foram utilizados na ponderação dos critérios na calculadora *raster* do QGis e equivalem a $P1=0,2290$, $P2=0,1702$ e $P3=0,6008$.

É possível observar que os valores de RC calculados para os três Especialistas se aproximaram, e o que possui a maior divergência é do Especialista 1. Além disso, os valores de IC obtidos para os Especialistas 2 e 3 quase se igualaram, sendo a maior divergência obtida, o IC do Especialista 1. Isso mostra que as respostas fornecidas por este Especialista foram as que possuíam maior inconsistência. Porém, como os resultados de todos índices se aproximaram, pode-se concluir que o questionário foi aplicado com êxito.

4.1.2. Cenário 1

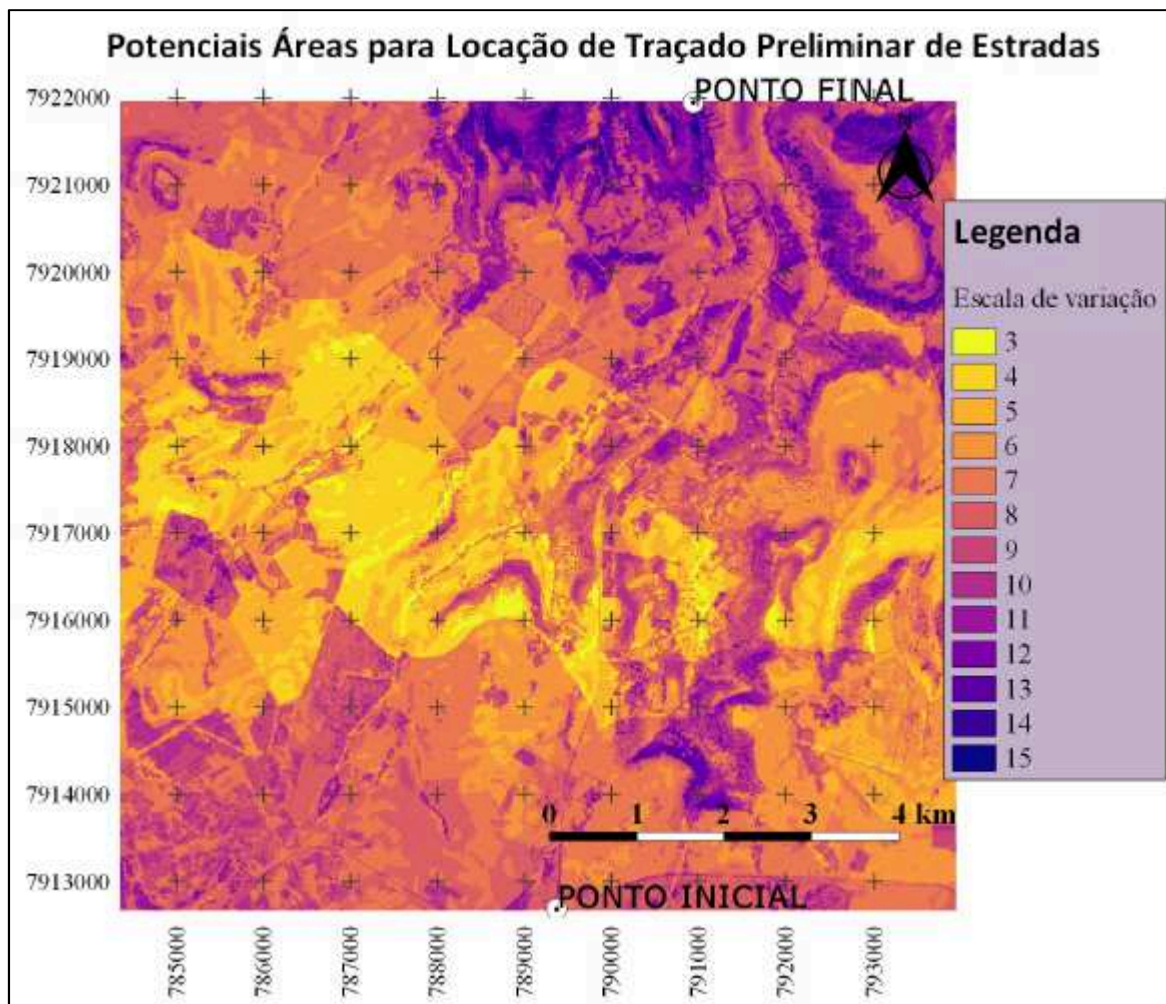
Após a aplicação da ferramenta ‘calculadora *raster*’ utilizando como arquivos de entrada os três mapas parametrizados obtidos para cada critério analisado sem aplicação de ponderação, ou seja, aplicando-se apenas a soma dos três *rasters*, foi obtido o mapa final de áreas aptas apresentado na Figura 46.

No mapa apresentado a escala final de variação foi de três a quinze. Isso quer dizer por exemplo, que, para um ponto de peso mínimo atribuído, igual a um, para os três critérios analisados, após a aplicação da soma, este mesmo ponto pertenceu a classe mais apta, com peso mínimo igual a três. E para pontos de classificação máxima nos três critérios, no mapa final, estes pontos continuaram com classificação máxima, porém com soma dos pesos igual a quinze. Assim, esta escala de variação aponta das cores mais quentes na tonalidade de amarelo (valores inferiores da escala) para cores mais frias na tonalidade de roxo (valores superiores da escala), as áreas mais aptas para as menos aptas à passagem do traçado preliminar da estrada.

Observa-se que as regiões menos aptas a passagem do traçado são as regiões onde existem restrições ambientais, principalmente presença de vegetações, como também os picos do mapa onde são encontradas as maiores declividades (comparando-se ao mapa apresentado na Figura 40). Após isso, entraram as regiões de benfeitorias e construções, e por último as áreas onde as propriedades rurais tem valor mais elevado. Assim, é evidenciado no mapa que, áreas de menor valor imobiliário onde a atividade desenvolvida é a pecuária e não há a

presença de benfeitorias, são as melhores áreas para passagem do traçado preliminar da estrada por conduzirem a menores custos de construção.

Figura 46 – Mapa de potenciais áreas a receberem o traçado preliminar de estrada.



Fonte: Autora (2018).

Ressalta-se que nas regiões próximas a BR-050 existente, há a presença de maior quantidade de benfeitorias, que podem ser além de sede de fazendas, indústrias e comércios. Estas benfeitorias podem ter sido construídas justamente devido a existência da BR-050, uma vez que para indústrias estes pontos são mais atrativos devido à facilidade para logística dos bens produzidos. Desta forma, estas áreas influenciaram os resultados aqui obtidos, e a mancha de rota presente na região do traçado já existente, foi incorporada em áreas de menor aptidão à passagem de um novo traçado, o que neste contexto não é desvantajoso uma vez que a intenção era realmente a comparação de outras áreas potenciais a receberem o traçado geométrico na mesma região. Em outro contexto, para o caso de áreas de estradas novas a

serem projetadas, estes fatores podem ser levados em consideração inserindo-os em um outro critério de análise, que seria o critério rodovias vicinais.

Outro fator a ser discutido foi a não consideração de nascentes e pequenos córregos no modelo. Optou-se pela não consideração de rios e represas de elevada área, que não poderiam ser desviados durante a elaboração de um traçado preliminar e que por isso, precisariam ser interceptados e projetadas então, obras de arte especiais em seus cruzamentos. Porém, nascentes, pequenos córregos e riachos, podem ser desviados durante a escolha do traçado, ou ainda interceptados com a construção de obras de arte correntes, que são responsáveis pela condução das águas do talvegue de um lado da rodovia para o outro e possuem custos muito inferiores à construção de obras de arte especiais. Neste caso, a escolha pelo desvio ou intercepção da estrada com o corpo hídrico dá-se pela consideração e avaliação conjuntamente aos outros critérios, como por exemplo, comprimento do trecho de desvio, custos de terraplenagem e de implantação daqueles dispositivos de drenagem.

A presença destes corpos hídricos ocorre, em geral, nas regiões de talvegue classificadas no mapa como vegetações, pois, nestas áreas a vegetação é bastante densa por constituir regiões de APP. Assim, para a consideração destes fatores, seria necessária uma outra solução que não a classificação de uma imagem de satélite, onde não é possível a aparência destas áreas. É sugerido para projetos futuros uma digitalização destes pequenos corpos hídricos para sua incorporação nas análises.

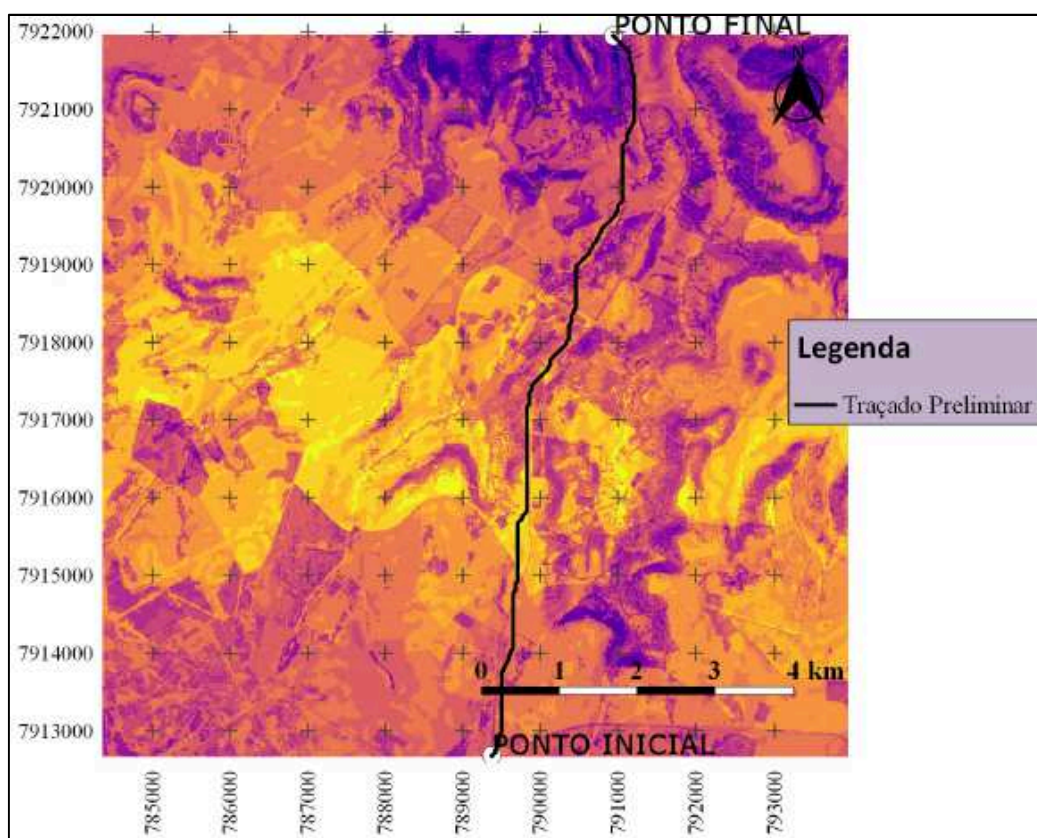
A menos que o comprimento do traçado obtido se torne muito mais extenso, na maioria dos casos, é preferível o desvio destas áreas para redução dos custos de construção, burocracia e consumo de tempo na obtenção de licenças ambientais de utilização de áreas de APP. Assim, nesta pesquisa essa consideração acabou sendo indiretamente realizada, uma vez que todas as regiões de talvegue onde há a provável existência de nascentes e córregos foram classificadas com restrição ambiental forte, devido a presença de vegetações na imagem utilizada.

Na Figura 47 está apresentado o mapa de áreas aptas com o traçado preliminar obtido. Não foi possível considerar as principais restrições de projeto impostas no Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999), como por exemplo, raios mínimos de curvas e distância de visibilidade, uma vez que a ferramenta utilizada na roteirização não permite a inserção de fórmulas ou restrições para o processamento de seus algoritmos. Assim, o

traçado obtido é uma orientação inicial de escolha de traçado, por isso, classificado ainda como traçado preliminar.

Observa-se que as regiões de curvas são bastante irregulares e sem suavidade devido ao caminho percorrido estar sobre os pixels, que tem formato quadrangular. Desta forma, é ainda necessário o desenvolvimento das concordâncias horizontal e vertical para a suavização do traçado.

Figura 47 – Traçado geométrico preliminar obtido – Cenário 1.

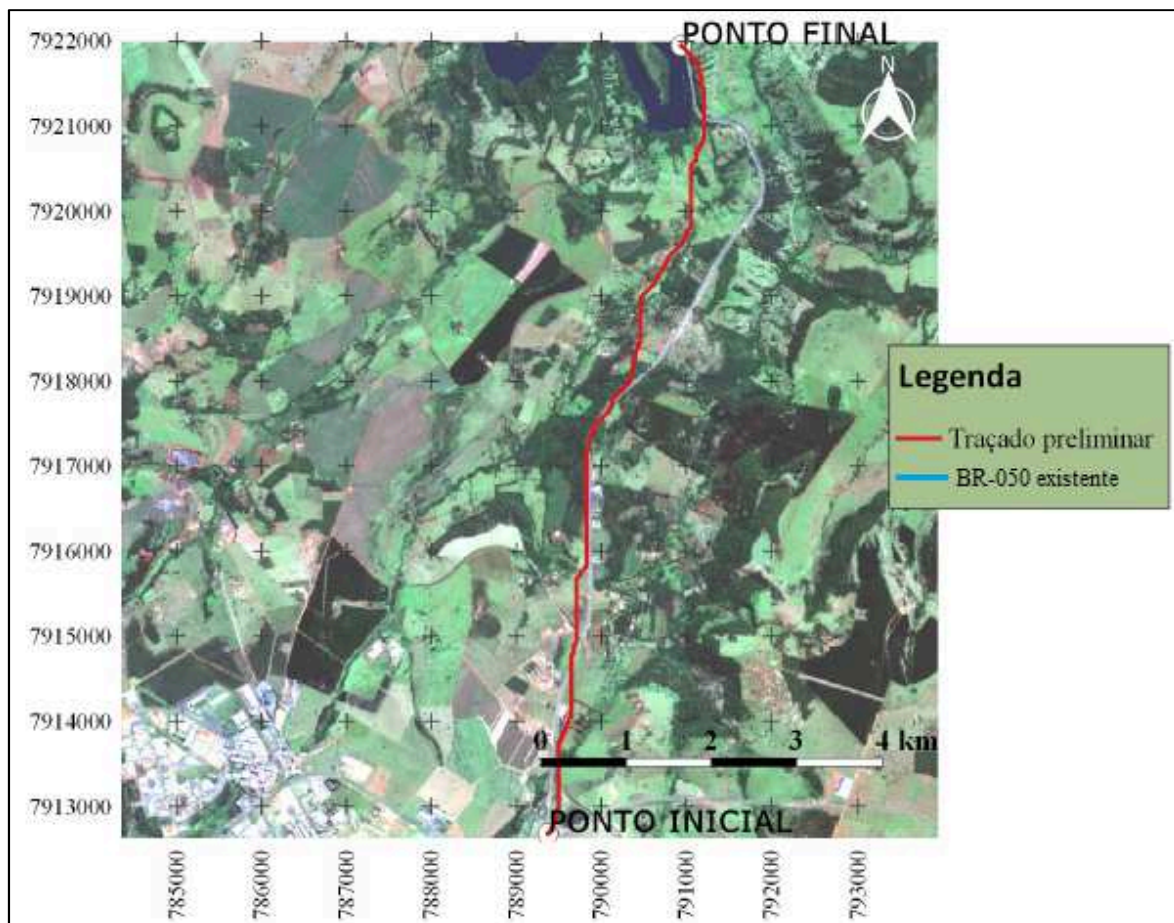


Fonte: Autora (2018).

Percebe-se que parte do traçado preliminar obtido quase sobrepõe o traçado existente da BR-050, conforme demonstrado na Figura 48, em que há a comparação dos dois traçados. Este fato pode ter sido influenciado pelos dados utilizados, que consideraram as características do local, que podem ser, em sua maioria, consequência da rodovia existente como já explicado no tópico anterior. Porém, nota-se uma expressiva diferença nos traçados no trecho anterior ao Ponto Final, próximo ao Rio Araguari. Neste trecho, a rota obtida é bem mais curta que a rota existente e consequentemente, os custos de construção, operação e

manutenção também seriam inferiores. O comprimento aproximado do traçado preliminar obtido é de 9,81 km e o da rodovia existente é de 14,03 km.

Figura 48 – Traçado existente e traçado preliminar obtido no Cenário 1.



Fonte: Autora (2018).

Comparando-se o traçado obtido com cada mapa parametrizado de cada critério, verifica-se que, quanto às restrições ambientais, as áreas de maior peso atribuído, como áreas de vegetação foram evitadas. Quanto ao valor imobiliário das propriedades, as áreas de benfeitorias também foram evitadas para a formação do traçado. E quanto à declividade, a preferência de passagem do traçado também se deu por regiões planas, desviando-se de regiões com a alta inclinação de terreno.

Isso mostra que foi obtido sucesso na metodologia aplicada, e possivelmente, os resultados também seriam interessantes se esta fosse aplicada para projetos de rodovias novas, em que não haveria influências e modificações dos critérios considerados devido a existência de uma rodovia no local, que não as vicinais.

4.1.3. Cenário 2

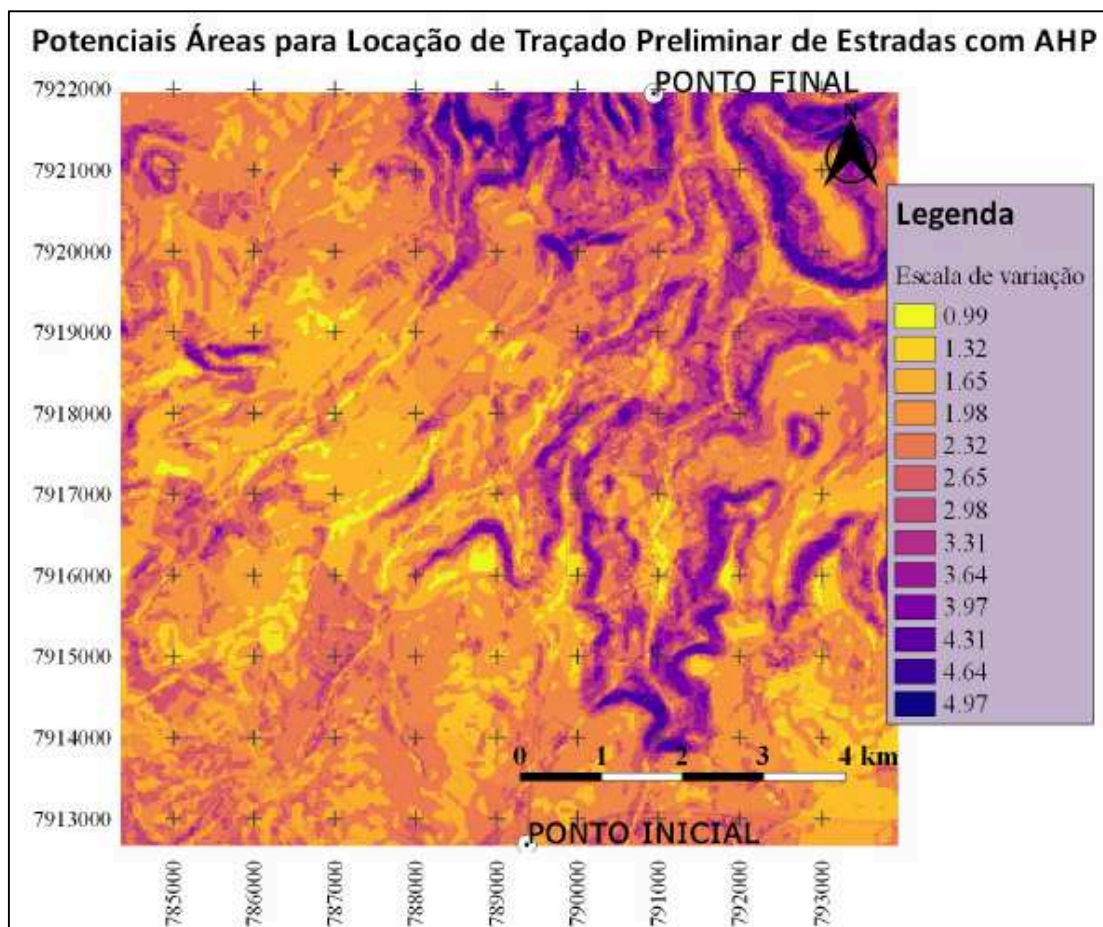
A aplicação dos pesos obtidos por critério na soma das camadas pela ‘calculadora *raster*’ forneceu o mapa de áreas aptas a receberem o traçado representado na Figura 49. A escala de variação das cores representa as áreas mais aptas, nas cores mais quentes em tonalidade amarelada, para áreas menos aptas, nas cores mais frias em tonalidade roxa.

Observa-se que houve uma uniformização das regiões que representaram a variação de custo das propriedades rurais para desapropriação, além disso, as áreas de benfeitorias não ficaram realçadas neste mapa, como é possível observar na Figura 50. Isso se deve ao peso recebido pelo *raster* desapropriação durante a ponderação, que foi o menor valor de todos os critérios. Isso quer dizer que, de acordo com o especialista julgador, o critério custos de desapropriação é o que menos influencia o projetista na tomada de decisão final.

Embora o critério restrições ambientais tenha obtido o menor peso atribuído dentre os demais critérios, é perceptível no mapa que áreas classificadas como Vegetação ainda continuaram em evidência com alto valor atribuído. Isso porque, nesta área de estudo especificamente, as regiões de vegetação densa localizam-se nos pontos de maior declividade, devido a existência do Rio Araguari e seus afluentes, onde as cotas altimétricas do terreno são inferiores.

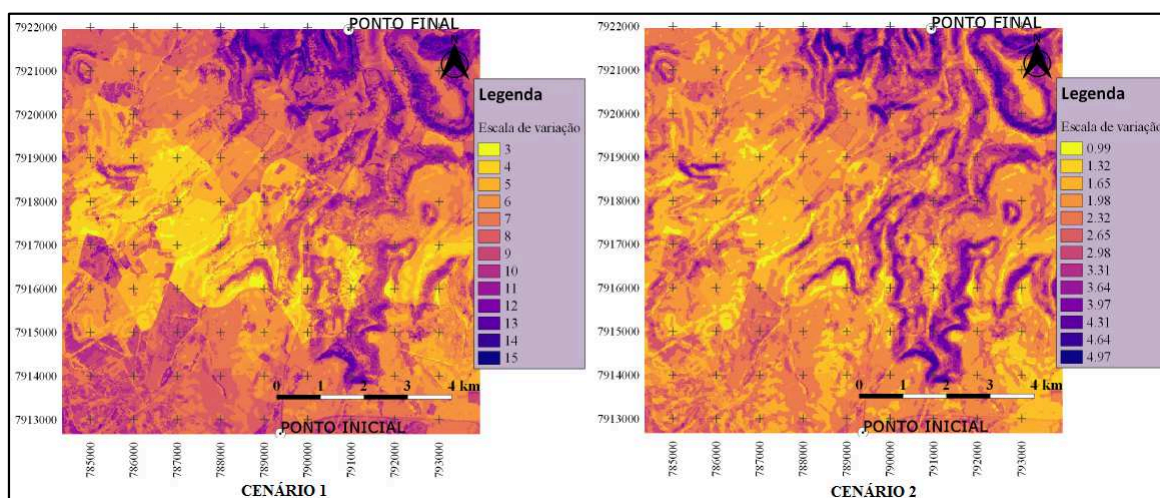
O critério declividade foi o que recebeu maior atribuição de peso de acordo com o julgador, conforme é também demonstrado no mapa nas áreas realçadas com tonalidade roxo escuro, se comparado ao *raster* declividade da Figura 40. Isso mostra que, por exemplo, em pontos onde não ocorrem nem restrições ambientais nem alto custo de desapropriação, porém há uma alta declividade, a escolha do especialista seria pela não passagem do traçado preliminar, uma vez que isto acarretaria um aumento dos custos. Além disso, o julgador considera que, dos três critérios analisados, a declividade do terreno é o que tem maior impacto sobre os custos de uma rodovia, principalmente os custos de construção, neste caso.

Figura 49 – Mapa de potenciais áreas a receberem o traçado preliminar de estrada com ponderação dos critérios pelo método AHP.



Fonte: Autora (2018).

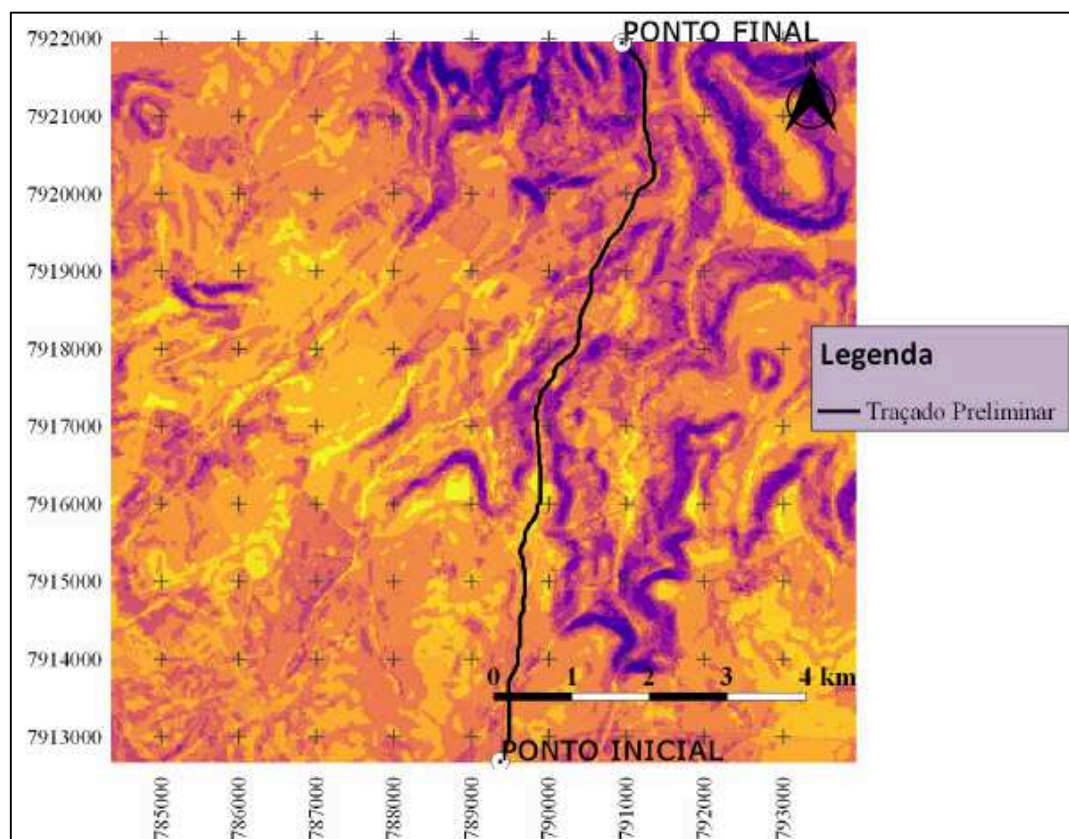
Figura 50 – Mapas de potenciais áreas para a localização do traçado preliminar – Cenário 1 e 2.



Fonte: Autora (2018).

O traçado geométrico preliminar obtido é demonstrado na Figura 51. É possível observar a passagem do traçado em uma região que fica entre duas áreas evidentes de pico de declividade, aproximadamente no trecho central do traçado. Isso mostra que a metodologia foi bem aplicada, uma vez que o software optou pela passagem do traçado em regiões mais planas. O comprimento aproximado do traçado preliminar obtido é de 9,95 km.

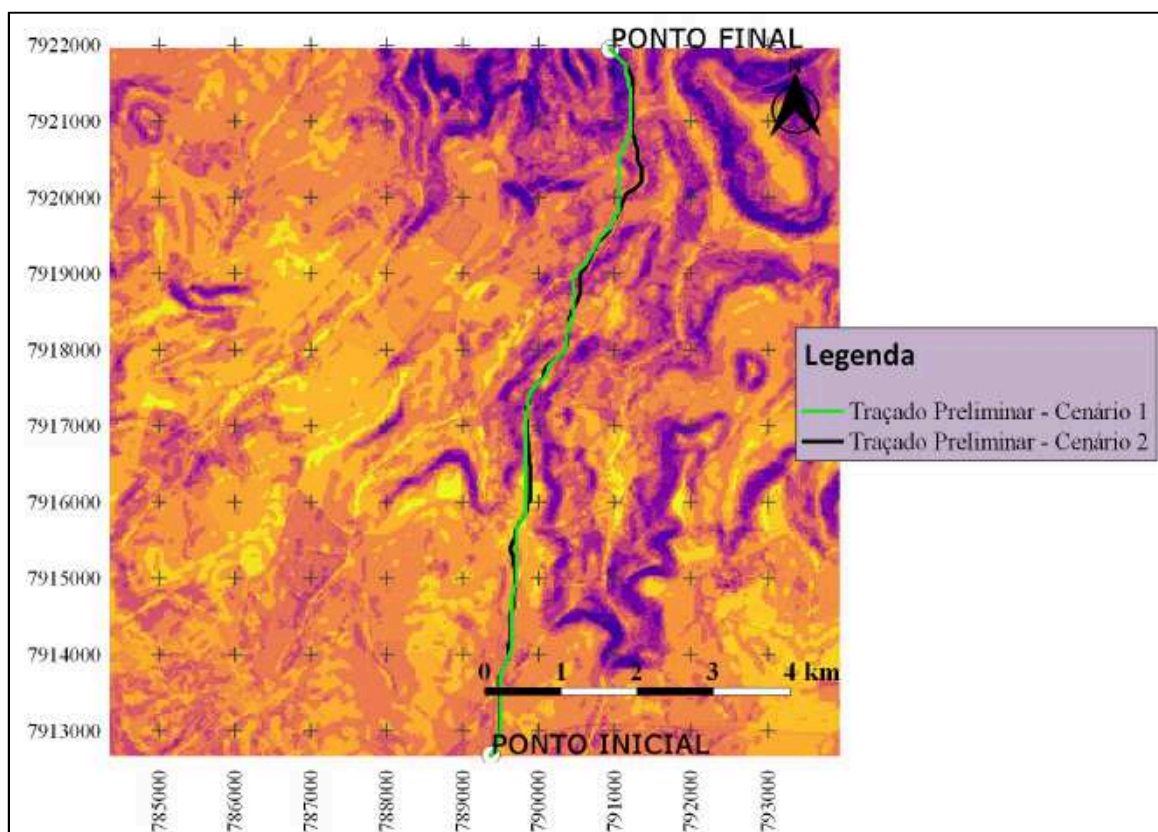
Figura 51 – Traçado geométrico preliminar obtido – Cenário 2.



Fonte: Autora (2018).

O traçado geométrico preliminar obtido neste cenário é semelhante ao traçado obtido no cenário 1, como é demonstrado na Figura 52. Pode-se concluir que, o critério desapropriação mesmo tendo seu peso expressivamente reduzido, não teve grande impacto no resultado, uma vez que as variações dos valores de propriedades rurais foram consideradas de forma concêntrica ao raio da cidade de Uberlândia, ou seja, os valores variam na direção perpendicular a direção dos pontos Inicial e Final, que tem como objetivo serem conectados. Portanto, o caminho mais curto entre estes pontos sempre será perpendicular à variação dos custos das propriedades rurais neste estudo adotados.

Figura 52 – Traçados geométricos preliminares obtidos – Cenário 1 e Cenário 2.



Fonte: Autora (2018).

A principal diferença de traçados obtidos no trecho antes do Rio Araguari, é justificada pela ponderação da declividade aplicada durante a soma das camadas. Analisando-se separadamente os *rasters* restrições ambientais, desapropriação e declividade, conclui-se que nos dois primeiros, não há variação das características classificadas nesta pequena região. Porém, no *raster* declividade, no local de passagem do traçado do Cenário 1 há uma maior variação de declividade do que onde foi locado o traçado do Cenário 2, o que teria significativo impacto nos custos de construção devido à terraplenagem. Isso mostra que a aplicação do método AHP para ponderação dos critérios tornou os resultados mais realísticos.

Embora pareça que há uma significativa diferença de comprimentos obtidos para os traçados do Cenário 1 e 2, o comprimento do traçado preliminar obtido no Cenário 1 equivale a 9,81 km enquanto que o comprimento da rota obtida no Cenário 2 equivale a 9,95 km, como é mostrado na Tabela 7. Isso mostra que embora o comprimento do Cenário 2 tenha sido maior devido ao trecho evidente antecedente ao Rio Araguari, os outros trechos do traçado foram menores que no Cenário 1, uma vez que a diferença total entre os dois traçados foi de apenas

140 m, conforme é possível observar na Figura 54 que tem maior detalhamento dos traçados. Esta diferença torna-se insignificante frente à diferença nos custos de terraplenagem que o traçado do Cenário 2 acarretaria.

Tabela 7 – Comparação entre os comprimentos dos traçados dos Cenários 1 e 2 e BR-050 existente.

<u>TRAÇADO</u>	<u>COMPRIMENTO (KM)</u>	<u>PORCENTAGEM DE REDUÇÃO</u>
Cenário 1	9,81	30,08
Cenário 2	9,95	29,08
BR-050 existente	14,03	0

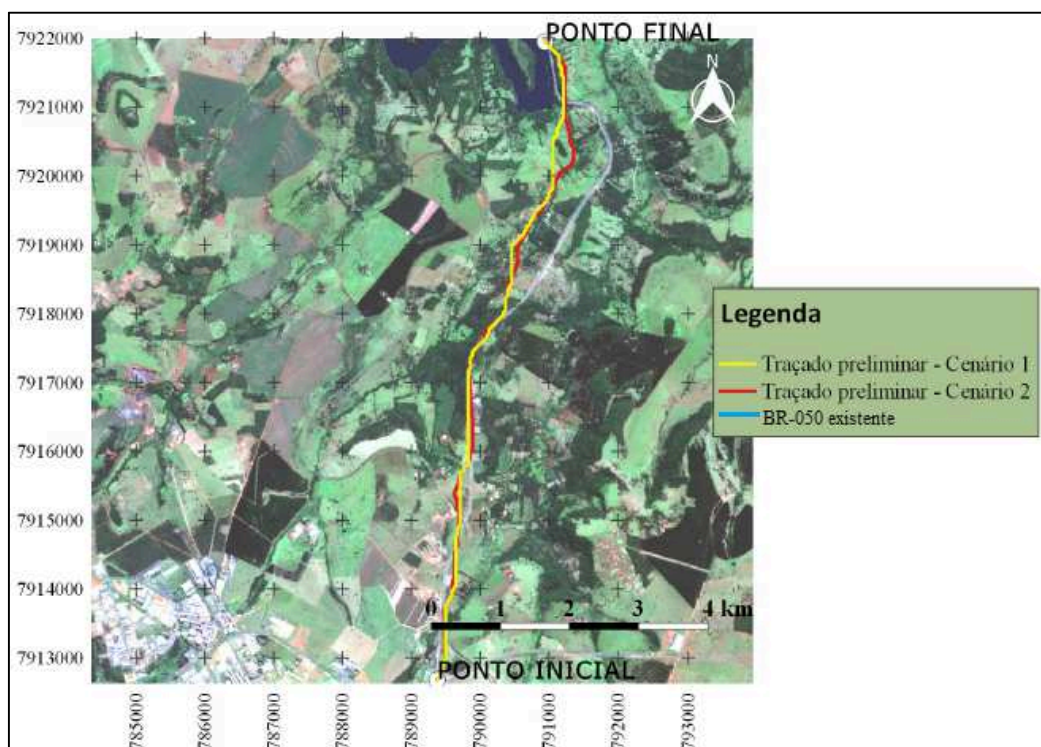
Fonte: Autora (2018).

Observa-se na Tabela 7 que houve uma redução significativa, aproximadamente igual a 30%, no comprimento dos traçados obtidos em relação ao comprimento da BR-050 existente, o que consequentemente, impacta em reduções nos custos de construção, operação e manutenção da rodovia.

Na Figura 53 é apresentada uma imagem da área de estudo com a passagem dos dois traçados obtidos e a rodovia existente, BR-050. Observa-se que, além de ambos os traçados obtidos terem comprimento inferior ao da rodovia existente, após a realização das concordâncias destes traçados, eles se tornariam mais suaves e retilíneos que a rodovia existente.

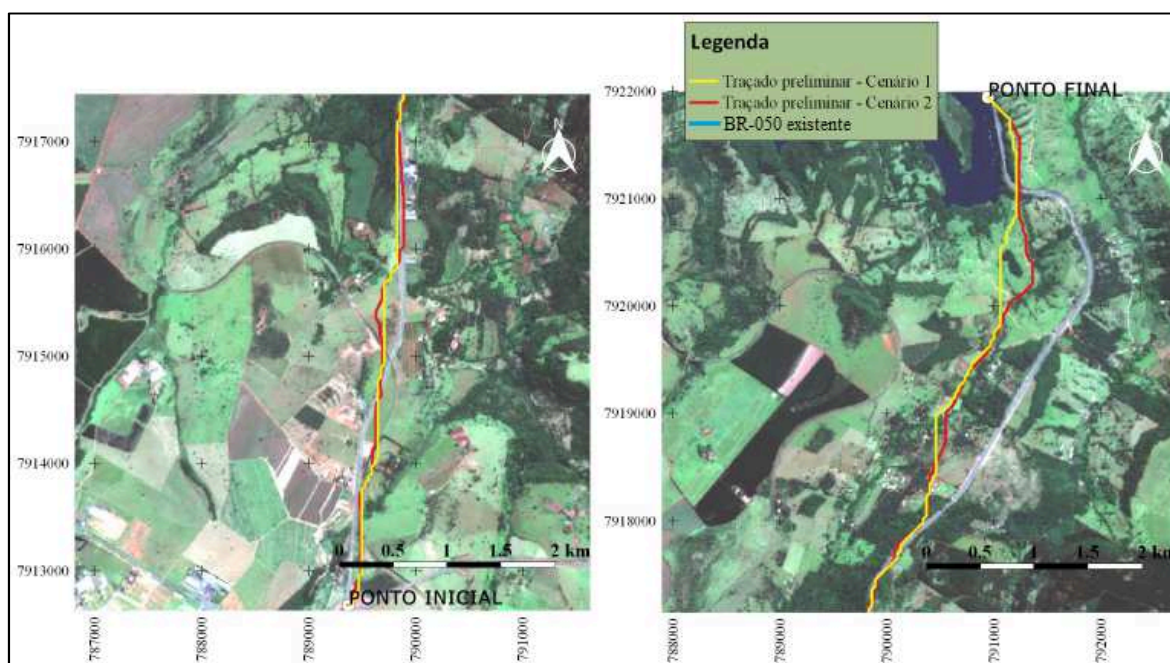
Um aspecto a ser discutido, é a influência evidente que a rodovia existente impôs sobre os resultados. Observa-se na Figura 53 que há uma grande quantidade de construções nos contornos da rodovia, principalmente perto do perímetro urbano. Desta forma, essas áreas construídas foram atribuídas com altos pesos, porém, na extensão da faixa de domínio, não foram atribuídos altos pesos, uma vez que a existência da rodovia não foi considerada. Desta forma, criou-se uma região de peso baixo entre essas áreas construídas, que se comportou como um corredor de passagem do traçado.

Figura 53 – Traçados obtidos nos Cenários 1 e 2 e rodovia BR-050 existente.



Fonte: Autora (2018).

Figura 54 – Detalhe traçados preliminares obtidos – Cenário 1 e Cenário 2.



Fonte: Autora (2018).

4.2. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este estudo visou a obtenção de um traçado geométrico preliminar de estradas com o auxílio da ferramenta SIG como plataforma de implementação. Este traçado foi obtido em um processo automatizado baseado em quatro critérios de análise, que foram, redução do comprimento total da estrada, restrições ambientais, custos de desapropriação e declividade do terreno.

Inicialmente foi feita a modelagem e parametrização das camadas de informações referentes à três critérios, restrições ambientais, custos de desapropriação e declividade. O critério redução do comprimento total da estrada não foi inserido nesta etapa, apenas na etapa final, em que houve a geração do traçado preliminar sobre dois tipos diferentes de ponderações, denominadas Cenários 1 e 2.

Conclui-se que a aplicação do método AHP para a ponderação dos critérios analisados tornou o resultado mais realístico, uma vez que os participantes da pesquisa para a realização do método são especialistas da área ou profissionais que tem experiência prática no assunto.

Foi julgado no método que o critério que tem maior impacto na tomada de decisão final quando na escolha de um traçado preliminar de estradas é a declividade do terreno, e isto se deve ao fato de que a necessidade de movimentação de altos volumes de terra para a estabilização de cortes e aterros e para a colocação do terreno no greide de projeto durante a execução de terraplenagem, acarretam aumento expressivo nos custos de construção da estrada. Desta forma, a consideração do peso nas análises deixou evidente nos resultados as regiões em que o terreno possui maior declividade e devem, portanto, ser evitadas para a locação do traçado preliminar.

A ferramenta de roteirização utilizada neste método buscou um caminho de menor distância possível com a menor quantidade de pesos acumulados dentro desta distância. Nesta etapa, considerou-se então o critério redução do comprimento total da estrada.

Ambos os traçados obtidos, Cenário 1 e Cenário2, tiveram comprimento total inferior ao da BR-050 em torno de 30%, equivalente a aproximadamente 5 km. Isso mostra que o método foi capaz de aperfeiçoar o processo tradicional de obtenção do traçado e esta diferença é expressiva, uma vez que impacta diretamente nos custos de construção, operação e manutenção da rodovia.

Ainda assim, ressalta-se que esse método deve ser utilizado apenas durante a etapa de projeto preliminar, indicando a provável melhor rota para o desenvolvimento das concordâncias entre os alinhamentos vertical e horizontal. Foram obtidos traçados não suaves e de formato irregular, principalmente nos trechos curvos, uma vez que não foi possível considerar os critérios de projeto requeridos pelo DNIT no Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999). Estes critérios não foram considerados devido a impossibilidade de inserção de equações na ferramenta de roteirização utilizada.

As rotas obtidas foram semelhantes, porém os trechos onde houve nítida diferença dos traçados, aconteceram devido à ponderação aplicada aos critérios. Nestes trechos, ficou evidente a existência de restrição quanto a declividade do terreno, que recebeu maior peso dentro da ponderação, apontando a eficiência da utilização do método AHP.

Os resultados do Cenário 1 poderiam ser utilizados na prática como ponto de partida para elaboração dos alinhamentos vertical e horizontal na ausência de tempo ou recursos para desenvolvimento do método AHP ou qualquer outro método de auxílio à tomada de decisão. Porém, o Cenário 2 apresentou resultados mais realísticos, e deve, portanto, ter prioritária utilização, principalmente na inserção e análise de mais critérios além dos considerados nesta pesquisa.

Dificuldades na condução da pesquisa estão na obtenção dos dados em escala (resolução espacial) e atualização (escala temporal) adequados à sua aplicação. A utilização de imagens do Sentinel-2 forneceu uma resolução espacial de 10 m que teve que ser degradada em função do MDE do Topodata ter resolução espacial de 30 m. Alternativas de utilização de cartas topográficas com curvas de nível de equidistância igual a 10 m esbaram no tempo necessário para sua digitalização e na desatualização, visto que foram executadas na década de 1970. Ainda assim, considera-se que a escala adotada em função da resolução de 30 m é compatível com a fase de pré-projeto trabalhada.

Além disso, não há registro de todas as propriedades rurais existentes na área de estudo, então a vetorização realizada consistiu em uma simplificação da realidade devido à ausência dos dados requeridos. Por outro lado, também seria necessário a realização de avaliação imobiliária pelo método proposto pelo DNIT para certificação dos valores das propriedades rurais. Porém, na prática, estas pesquisas não são realizadas na fase de projetos devido ao alto consumo de tempo, mas sim na fase de construção, em que ocorrem as desapropriações.

Desta forma, a consideração de pesos sobre os valores das propriedades rurais, é um referencial para a contemplação do critério custos de desapropriação durante a fase de projetos preliminares.

Desta forma, conclui-se que a metodologia aplicada neste estudo foi eficiente para a determinação de um traçado geométrico preliminar, eliminando o alto consumo de tempo e de incertezas geradas pelo método tradicional de obtenção deste traçado. Porém, essa é uma área ainda experimental, principalmente na literatura brasileira em que pouco foi explorado.

Desta forma, vislumbrando trabalhos futuros que possam se originar dessa pesquisa e dos dados utilizados, estão listados abaixo alguns obstáculos e dificuldades que foram encontrados ao longo desse estudo e poderiam ser superados futuramente:

- Obtenção de dados quanto ao critério custos de desapropriação, em que não foram encontrados registros de todas as propriedades rurais existentes na área de estudo;
- Realização de uma pesquisa de mercado em imobiliárias e corretores para a certificação dos pesos adotados referentes aos valores das propriedades rurais;
- Inserção de outros critérios importantes para a tomada de decisão final, como, por exemplo, geologia, corpos hídricos (consideração da construção de obras de arte especiais e correntes) e estradas vicinais;
- Aplicação da metodologia em uma área de estudo para rodovia nova, ou tentativa de redução das influências ocorridas devido a existência de uma rodovia no local;
- Inserção dos critérios de projeto requeridos pelo DNIT na obtenção do traçado geométrico preliminar, afim de se obter um traçado mais suave;
- Análise de custos para obtenção da previsão final dos componentes de custos de construção, operação e manutenção da rodovia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAZIG, Y.; MOSES R. Preliminary Roadway Alignment Design: A Spatial-Data Optimization Approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL, ENVIRONMENTAL AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING, 17., 2015, Dubai. **Anais** Dubai: International Scholarly and Science Research & Innovation, 2015. p. 1686.

ARONOFF, S. Geographic Information Systems: A management Perspective. Ottawa: WDL Publications, Canada, 1989, 294 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14653-1 Avaliação de Bens. Parte 1: Procedimentos Gerais**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14653-3 Avaliação de Bens. Parte 3: Imóveis Rurais**. Rio de Janeiro, 2001.

BERRY, J. K. Beyond Mapping III – Map Analysis. Editora Website: www.innovativegis.com Disponível em: <http://www.innovativegis.com/basis/BeyondMappingSeries/Beyondmapping_III/Default.htm>. Acesso em: 15 mar. 2018.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Instrução de Projeto: Estudos Preliminares de Traçado e Estudos Funcionais*. Secretaria dos Transportes. Mar. 2005.

BRASIL. **Código Florestal Brasileiro**. 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 Lei 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 mai. 2012.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais*. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Rio de Janeiro. 1999.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. *Diretrizes Básicas para Desapropriação*. Divisão de Supervisão/Desapropriação. Rio de Janeiro. 2011.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. Principles of Geographical Information Systems. Enschede: ITC, 2009. Disponível em: <https://www.itc.nl/library/papers_2009/general/PrinciplesGIS.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2017.

CÂMARA, G. , CASANOVA, M.A., HEMERLY, A. S., MAGALHÃES, G.C. MEDEIROS, C.M.B. 2009. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Rio de Janeiro: 1996. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/geopro/livros/anatomia.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

COWEN, D.J. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences? **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 54, p. 1551-1554, 1988.

DUARTE, C.C. CORRÊA, A. C. B. GIRÃO, O. Utilização do Processo Analítico Hierárquico como Metodologia Alternativa para a Elaboração de Mapa de Distribuição do Escoamento Superficial Hortoniano na Bacia Hidrográfica do Rio Una – Pernambuco. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9., 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2012.

European Spacy Agency. Disponível em: < <https://www.esa.int/ESA>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

FILHO, G. P. **Estradas de Rodagem: Projeto Geométrico**. 1. ed. São Paulo: São Carlos, 1998. 432 p.

Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

GOH C. J. CHEW E. P. FWA T. F. Discrete and Continuous Models for Computation of Optimal Vertical Highway Alignment. **Transportation Research**, v. 22A(6), p. 399-409, 1988. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(88\)90021-5](https://doi.org/10.1016/0191-2615(88)90021-5)

GOH C. J. CHEW E. P. FWA T. F. Simultaneous Optimization of Horizontal and Vertical Alignments for Highways. **Transport Research**, v. 23B, p. 315-329, 1989.

Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). Disponível em: <www.incra.gov.br>. Acesso em: 14 mar. 2018.

DSR/INPE Topodata. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

JHA, M. K.; SCHONFELD, P. A Highway Alignment Optimization Model Using Geographic Information Systems. **Transportation Research Part A**, Elsevier, v. 38, p. 455-481, 2004.

JHA M. K. SCHONFELD P. Geographic Information System-Based Analysis of Right of Way Cost for Highway Optimization. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Elsevier, v. 1719, Jan. 2000a.

JHA M. K. SCHONFELD P. Integrating Genetic Algorithms and Geographic Information System to Optimize Highway Alignments. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Elsevier, v. 1719, Jan. 2000b.

JONG, J-C, JHA, M. K. SCHONFELD, P. Preliminary Highway Design with Genetic Algorithms and Geographic Information Systems. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, Blackwell Publishers, v. 15, p. 261-271, 2000. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00190>

JONG, J. **Optimizing Highway Alignment with Genetic Algorithms**. 1998. Tese (P.h.D. em Mecanismos Probabilísticos). University of Maryland, College Park, 1998.

JONG, J.; SCHONFELD, P. An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 37, n. 2, p. 107-128, Feb. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(01\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00047-9)

KARRY G.; JHA M. K. A new method for 3-dimensional roadway design using visualization techniques. **Urban Transport XIII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century**, C.A. Brebia, vol 96, p. 123-130, 2007.

MAGUIRE, D. J. DANGERMOND, J. The functionality of GIS. **Geographic Information Systems: principles and applications**. Longman, London, vol. 1, p. 319-335, 1991.

NICHOLSON, A. J. ELMS, D. G. WILLIAN, A. A Variational Approach to Optimal Route Location. **Highway Engineer**, v. 23, p.22-25, 1976.

O'BRIEN, W. T. BENNETTI, D. W. A Dynamic Programming Approach to Optimal Route Location. In: PTRC SYMPOSIUM ON COST MODELS AND OPTIMIZATION IN ROAD LOCATION, DESIGN AND CONSTRUCTION, 1969, Londres.

PACHECO, F. E. R. C. SERRANO, P. M. CAXITO, F. A. MOURA, C. D. QUINTÃO, D. A. Mapa Geológico Folha Uberlândia SE.22-Z-B-VI. Governo do Estado de Minas Gerais, Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, 2017.

PARKER, N. A. Rural Highway Route Corridor Selection. **Transportation, Planning and Technology**, v. 3, p. 247-256, 1977. <https://doi.org/10.1080/03081067708717111>

SAATY, T. L. Método de análise hierárquica. São Paulo: McGrawHill Pub. Co., 1991. 367 p.

SAATY, T. L. How to make a decision: the hierachy process. **European Journal of Operational Research**. Elsevier Science Publisher, v. 48, p. 9-26, 1990. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)

SAATY, T. L. Highlights and critical points in the theory and application of the Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**. Elsevier Science Publisher, v. 74, p. 426-447, 1994. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90222-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90222-4)

SAATY, T. L. The analytic hierarchic process. New York. McGraw Hill International, 1980.

SCHMIDT, M. A. R., BARBOSA, R. B. 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, n. 3, p. 511-525, Jul.-Set. 2016.

STOTT, J. P. The Optimization of Horizontal and Vertical Alignment. In: COMPUTER SYSTEMS IN HIGHWAY DESIGN, 1972, Copenhagen. **Anais...** Copenhagen: Proc. of Nato Advanced Study Institute, 1972, p. 237-258.

DPI/INPE Tutorial de Processamento. Disponível em:
<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html>. Acesso em: 13 mar. 2018.