

BRUNO DE MOURA MORCELI

**RECONSTRUÇÃO DE RODOVIAS A PARTIR DE
TRAJETÓRIAS GNSS DENSAS VIA DETECTOR DE
LINHAS DE STEGER**





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

BRUNO DE MOURA MORCELI

**RECONSTRUÇÃO DE RODOVIAS A PARTIR DE
TRAJETÓRIAS GNSS DENSAS VIA DETECTOR DE
LINHAS DE STEGER**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Presidente Prudente-SP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz

Presidente Prudente - SP
2021

M833r Morceli, Bruno de Moura
Reconstrução de rodovias a partir de trajetórias GNSS densas via detector de linhas de Steger / Bruno de Moura Morceli. -- Presidente Prudente, 2021
114 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente
Orientador: Aluir Porfirio Dal Poz

1. Geociências. 2. Mapeamento colaborativo. 3. Detecção e reconstrução de rodovias. 4. Posicionamento GNSS a partir de smartphones. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: RECONSTRUÇÃO DE RODOVIAS A PARTIR DE TRAJETÓRIAS GNSS
DENSAS VIA DETECTOR DE LINHAS DE STEGER

AUTOR: BRUNO DE MOURA MORCELI

ORIENTADOR: ALUIR PORFIRIO DAL POZ

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS
CARTOGRÁFICAS, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela
Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALUIR PORFÍRIO DAL POZ (Participação Virtual)

Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

VIDEOCONFERÊNCIA

Prof. Dr. MAURICIO GALO (Participação Virtual)

Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

VIDEOCONFERÊNCIA

Prof. Dr. DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS (Participação Virtual)

Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná

Presidente Prudente, 30 de abril de 2021

DEDICATÓRIA

À minha família, pelo apoio, incentivo e confiança ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro durante o projeto de pesquisa, por meio da concessão da bolsa de estudo (Processo 132396/2019-0).

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) e à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa de mestrado.

Ao Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, por sua orientação e incentivo ao longo dos últimos anos.

Aos amigos e colegas do PPGCC pelas conversas e contribuições, em especial a turma do processo seletivo de 2019 e os frequentadores do Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto.

A todos os professores do Departamento de Cartografia e do PPGCC, pelos ensinamentos durante os cursos de graduação e pós-graduação.

À banca de qualificação e da defesa final, pelas correções e sugestões que contribuíram para a versão final desta dissertação.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Atualmente, devido ao elevado volume de informação geográfica adquirida por grande parte da população por meio de *smartphones*, *smartwatches*, entre outros dispositivos capazes de coletar e armazenar dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*), vários trabalhos estão sendo desenvolvidos, com o objetivo de: estudar o padrão de deslocamento das pessoas; analisar os impactos ao meio ambiente; promover estratégias de saúde pública; bem como mapear feições cartográficas de interesse. Neste trabalho é proposta a utilização de trajetórias GNSS densas, coletadas a partir de *smartphones*, no processo de reconstrução de rodovias. O método desenvolvido consiste, resumidamente, em gerar uma imagem de frequência através dos pontos que constituem as trajetórias GNSS e, posteriormente, aplicar o detector de linhas de Steger para extrair o eixo viário. Para a análise dos resultados utilizou-se um ortofotomosaico georreferenciado, sobre o qual foram vetorizados os eixos de referência. Os experimentos realizados demonstraram o alto potencial de aplicação do detector de linhas de Steger em imagens de frequência. A partir dos experimentos foi possível alcançar valores de completeza e correção acima de 98% e 99%, respectivamente. Além disso, obteve-se uma acurácia geométrica de 0,63 m para um dos experimentos realizados. A partir dos valores de RMSE (*Root Mean Square Error*) obtidos constatou-se que os eixos extraídos atendem a classe A para projetos de mapeamento nas escalas 1:5.000, 1:10.000 e 1:25.000, de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Por fim, após a comparação do método proposto com outros presentes na literatura, verificou-se que o mesmo apresentou resultados promissores.

Palavras-chave: *Smartphones*, Trajetórias GNSS, Extração de Rodovias, Detector de Linhas de Steger.

ABSTRACT

Nowadays, due to the high volume of geographic information acquired by a large part of the population through smartphones, smartwatches, among other devices capable of collecting and storing GNSS (Global Navigation Satellite System) data, several works are being developed, with the objective of: study the movement pattern of people; analyzing the environmental impacts; promote public health strategies; as well as mapping cartographic features. This work proposes the use of dense GNSS trajectories, collected from smartphones, in the reconstructing roads process. The developed method consists, briefly, in generating a frequency image through the points that constitute the GNSS trajectories and, later, applying the Steger line detector to extract the road axis. For the analysis of the results, a georeferenced orthophotomosaic was used, on which the reference axes were vectored. The experiments performed demonstrated the high potential for application of the Steger line detector in frequency images. From the experiments it was possible to achieve completeness and correctness values above 98% and 99%, respectively. Furthermore, we obtained a geometric accuracy of 0.63 m for the experiments. From the RMSE (Root Mean Square Error) values obtained was found that the extracted axes meet Class A for mapping projects at scales of 1:5,000, 1:10,000 and 1:25,000, according to the *Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais* (PEC-PCD). Finally, after comparison with other method proposed in the literature, it was found that the developed method showed promising results.

Key words: *Smartphones*, GNSS Trajectories, Road Extraction, Steger Line Detector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio dos métodos de extração de rodovias a partir de trajetórias GNSS.	20
Figura 2 - Motivação para aplicação do método: (a) Imagem aérea de uma rodovia com os demais elementos da paisagem (vegetação); (b) Resultado da extração da rodovia, na qual é possível verificar os erros causados por regiões de oclusões, bem como pela detecção de falsos positivos; (c) Trajetórias GNSS rastreadas; (d) Imagem de frequência gerada a partir das trajetórias GNSS; e (e) Resultado da extração, na qual é possível verificar a ausência dos erros presentes em (b).	22
Figura 3 - Exemplo de utilização de dados disponibilizados por mapeamento colaborativo: (a) base cartográfica desatualizada; e (b) detecção de novo segmento. ...	28
Figura 4 - Ciclovias mapeadas em Presidente Prudente/SP de acordo com o projeto CICLOMAPA.....	29
Figura 5 - Quantidade de mapas produzidos pelo projeto <i>Tracksource</i> por Estado.....	29
Figura 6 - Esquema de uma antena do modelo <i>Planar Inverted-F Antenna</i>	32
Figura 7 - Esquema de funcionamento da técnica A-GNSS.	33
Figura 8 - Marco geodésico EP01 com coordenadas conhecidas.....	33
Figura 9 - Exemplo de trajetória GNSS, constituída pelos pontos em vermelho, sobreposta a uma ortofoto georreferenciada.....	35
Figura 10 - Exemplo de arquivo de trajetória GNSS no formato GPX.....	35
Figura 11 - Comprimento do arco de meridiano $B\phi$ em um ponto genérico p de coordenadas geodésicas $p(\phi, \lambda)$	36
Figura 12 - Representação de bordas com perfil do tipo degrau: (a) variação abrupta dos níveis de cinza; e (b) variação suave dos níveis de cinza.	40
Figura 13 - Detecção de bordas através da técnica de derivação espacial: (a) Borda do tipo degrau com variação suave dos níveis de cinza; (b) Perfil representativo da borda; (c) Comportamento da primeira derivada; e (d) Comportamento da segunda derivada.	41
Figura 14 - Resultado da aplicação do detector de bordas de Sobel em uma imagem de frequência de trajetórias GNSS.	42
Figura 15 - Resultado da aplicação do detector de bordas de Canny em uma imagem de frequência de trajetórias GNSS.	44

Figura 16 - Método de esqueletização de uma região pela Transformada do Eixo Médio.	45
Figura 17 - Resultado da aplicação do método de esqueletização em uma imagem de frequência de trajetórias GNSS.	45
Figura 18 – Modelo de linha com diferentes contrastes: (a) Perfil AB perpendicular à linha ($2w, 1$); (b) Comportamento do perfil.	47
Figura 19 - Curva paramétrica $s(t)$	49
Figura 20 - Limiares de histerese no processo de detecção de linhas por Steger: (a) Imagem aérea ou orbital de interesse; (b) Linhas extraídas de acordo com σ selecionado (na cor azul: fragmento de linhas espúrias; em preto: linha que representa a rodovia); (c) Segmentos de linhas retidas nos planos correspondentes aos limiares de histerese inferior (τ_1) e superior (τ_2); (d) Complementação dos segmentos no plano τ_2 por meio de busca no plano τ_1	50
Figura 21 - Esquematização dos índices de completeza e correção para o eixo extraído de rodovias.....	51
Figura 22 - Metodologia adotada para o cálculo do RMSE.	51
Figura 23 - Trajetórias GNSS e área de estudo referente ao primeiro experimento: trecho da Avenida Manoel Goulart com a Rodovia Raposo Tavares.....	53
Figura 24 - Trajetórias GNSS e área de estudo referente ao segundo experimento: trechos de rodovias que permitem o acesso entre as cidades de Presidente Prudente, Regente Feijó e Indiana.	54
Figura 25 - Trajetórias GNSS e área de estudo referente ao terceiro experimento: área urbana do município de Indiana-SP.....	54
Figura 26 - Trajetórias GNSS e área de estudo referente ao quarto experimento: <i>dataset</i> de trajetórias adquiridas a partir de ônibus escolares na cidade de Chicago, Illinois/EUA.	55
Figura 27 - Aplicativos para <i>smartphone</i> : (a) Ultra GPS Logger; e (b) GPS Logger....	57
Figura 28 - Etapas que compõem o método proposto para a realização da pesquisa e <i>softwares</i> utilizados.	58
Figura 29 - Etapa de densificação das trajetórias GNSS: (a) Exemplo de trajetória antes da densificação; e (b) Trajetória após a densificação, com os pontos interpolados em amarelo.	59

Figura 30 - Tela de execução do algoritmo elaborado.	61
Figura 31 - Resumo das etapas para geração da imagem de frequência: (a) Trajetórias GNSS; (b) Determinação da frequência; (c) Imagem de frequência gerada; e (d) Imagem normalizada.	61
Figura 32 - Exemplo de extração de rodovias com o detector de linhas de Steger aplicado sobre uma imagem de frequência de trajetórias GNSS.	62
Figura 33 - Comparação entre o segmento de linha extraído e a linha poligonal gerada após a aplicação do operador de poligonização.....	63
Figura 34 - Nuvem de pontos fotogramétrica.....	64
Figura 35 - Resultado da filtragem para separação de pontos de terreno (marrom) de outras classes (vegetação, edificação, etc.) (branco).	65
Figura 36 - Modelo Digital de Terreno gerado.....	65
Figura 37 - Ortofotomosaico gerado para avaliação dos experimentos I, II e III, e eixos de referência vetorizados.	66
Figura 38 - Exemplo de segmento com os diferentes valores de <i>buffers</i> selecionados: 2 m, 4 m, 6 m, 8 m e 10 m.....	66
Figura 39 - Eixo de referência para análise do experimento IV.....	67
Figura 40 – Exemplo de consultas SQL realizadas no aplicativo QGIS.....	67
Figura 41 - Detalhes da região selecionada para realização do experimento I.....	69
Figura 42 - Imagem de frequência gerada, a partir dos dados de trajetória GNSS, referente ao primeiro experimento, por meio do algoritmo desenvolvido.	69
Figura 43 - Perfil traçado sobre a imagem original.	71
Figura 44 - Perfil traçado sobre a imagem suavizada com σ igual a 2,31.....	71
Figura 45 - Perfil traçado sobre a imagem suavizada com σ igual a 3,46.	72
Figura 46 - Imagem de frequência gerada, a partir dos dados de trajetória GNSS, referente ao segundo experimento, por meio do algoritmo desenvolvido (em destaque a ampliação de algumas regiões).....	72
Figura 47 - Subdivisão dos eixos de referência do experimento II para a análise da acurácia da extração.....	73

Figura 48 - Imagem de frequência gerada, a partir dos dados de trajetória GNSS, referente ao terceiro experimento, por meio do algoritmo desenvolvido.....	75
Figura 49 - Imagem de frequência gerada, a partir dos dados de trajetória GNSS, referente ao quarto experimento, por meio do algoritmo desenvolvido.....	76
Figura 50 – Visualização dos resultados do subexperimento 1: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.....	78
Figura 51 - Visualização dos resultados do subexperimento 2: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.	79
Figura 52 - Visualização dos resultados do subexperimento 3: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.	81
Figura 53 - Visualização dos resultados do subexperimento 4: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.	82
Figura 54 - Visualização dos resultados do subexperimento 5: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.	83
Figura 55 - Visualização dos resultados do subexperimento 6: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.	84
Figura 56 – Visualização dos indicadores de qualidade para os 6 subexperimentos: (a) Completeza; e (b) Correção.....	84
Figura 57 – Acurácia geométrica obtida para cada um dos 6 subexperimentos realizados.....	85
Figura 58 - Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais.	85
Figura 59 – Influência de se manter a maior parte do tempo na faixa direita.	86
Figura 60 – Rodovias extraídas a partir do experimento II.	87
Figura 61 - Análise quantitativa do experimento II.....	87
Figura 62 - Exemplo de regiões com extração correta e regiões com erros na detecção (experimento II): (a) Apesar de algumas trajetórias espúrias o eixo foi bem extraído devido à alta densidade de trajetórias; (b) Extração correta em um trevo, destaque para a conexão de vias do tipo simples e duplas; (c) Segmento não detectado, visto que o retorno foi percorrido apenas uma vez, ou seja, baixa densidade; e (d) Inclusão de um segmento devido à baixa densidade de trajetórias GNSS na região.....	88

Figura 63 - Relação entre a acurácia, tipo de rodovia (faixa simples ou dupla) e a densidade de trajetórias GNSS: (a) Trecho 1; (b) Trecho 2; (c) Trecho 3; e (d) Trecho 4.	90
Figura 64 - Análise do perfil traçado transversalmente as rodovias na imagem de frequência gerada: (a) Trecho da imagem de frequência correspondente a Figura 63a; e (b) Trecho da imagem de frequência correspondente a Figura 63d.	90
Figura 65 - Vias urbanas extraídas a partir do experimento III antes da aplicação das funções para eliminar segmentos espúrios e conectar as intersecções.	91
Figura 66 - Vias urbanas extraídas a partir do experimento III após a aplicação das funções para eliminar segmentos espúrios e conectar as intersecções.	92
Figura 67 - Análise quantitativa do experimento III.	92
Figura 68 - Exemplo de regiões com extração correta e regiões com erros na detecção (experimento III): (a) Vias bem detectadas apesar do elevado número de trajetórias GNSS espúrias, bem como a exclusão de uma via que foi percorrida poucas vezes; (b) Regiões de intersecção entre vias extraídas corretamente; (c) Vias que não foram detectadas devido à baixa densidade de trajetórias GNSS; e (d) Exemplo de via que foi detectada em uma região com poucas trajetórias, na qual o erro das mesmas impactou diretamente a qualidade geométrica da extração.	93
Figura 69 - Vias urbanas extraídas a partir do experimento IV.	94
Figura 70 - Exemplo de regiões com extração correta e regiões com erros na detecção (experimento IV): (a) Extração bem sucedida em uma região com várias trajetórias espúrias; (b) Intersecção extraída corretamente; (c) Problema na extração da intersecção; e (d) Trecho não detectado devido a baixa densidade de trajetórias.	94
Figura 71 - Análise quantitativa do experimento IV.	96
Figura 72 - Comparação, em termos de <i>F-score</i> , entre o método proposto e os métodos apresentados no trabalho de Biagioni e Eriksson (2012).	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas de referência e coletadas com o <i>smartphone</i>	34
Tabela 2 - Discrepâncias encontradas para cada uma das técnicas de rastreo.	34
Tabela 3 - Resultado da Fototriangulação em termos de acurácia.	64
Tabela 4 - Valores dos parâmetros do detector de linhas de Steger selecionados para cada um dos experimentos.....	70
Tabela 5 – Comprimento do eixo de referência vetorizado e dos eixos extraídos em cada subexperimento.....	77
Tabela 6 – Resultados obtidos a partir do subexperimento 1 para os indicadores completeza, correção e RMSE.	78
Tabela 7 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 2 para os indicadores completeza, correção e RMSE.	79
Tabela 8 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 3 para os indicadores completeza, correção e RMSE.	80
Tabela 9 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 4 para os indicadores completeza, correção e RMSE.	81
Tabela 10 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 5 para os indicadores completeza, correção e RMSE.	82
Tabela 11 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 6 para os indicadores completeza, correção e RMSE.	84
Tabela 12 - Resultados obtidos a partir do experimento II para os indicadores completeza e correção.	87
Tabela 13 - Média das discrepâncias, precisão e acurácia obtidos para o experimento II.	89
Tabela 14 - Resultados obtidos a partir do experimento III para os indicadores completeza e correção.	92
Tabela 15 - Média das discrepâncias, precisão e acurácia obtidos para o experimento III.	94
Tabela 16 - Resultados obtidos a partir do experimento IV para os indicadores <i>Recall</i> , <i>Precision</i> e <i>F-score</i>	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo das especificações das áreas de estudo e dos conjuntos de dados utilizados..... 55

Quadro 2 - Especificações técnicas dos *smartphones* utilizados nas etapas de coleta e armazenamento das trajetórias GNSS, utilizadas nos experimentos I, II e III. 56

LISTA DE SIGLAS

A-GNSS	- <i>Assisted GNSS</i>
ASCII	- <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CGI	- <i>Contributed Geographic Information</i>
DCNN	- <i>Deep Convolutional Neural Networks</i>
DXF	- <i>Drawing Exchange Format</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
GPX	- <i>GPS Exchange Format</i>
GSA	- <i>European GNSS Agency</i>
GSD	- <i>Ground Sample Distance</i>
IGC - SP	- Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo
IDE	- <i>Integrated Development Environment</i>
ISPRS	- <i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
ITDP	- Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento
KDE	- <i>Kernel Density Estimation</i>
MDS	- Modelo Digital de Superfície
MDT	- Modelo Digital de Terreno
ML	- <i>Machine Learning</i>
PEC-PCD	- Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
PGM	- <i>Portable Graymap Format</i>
PIFA	- <i>Planar Inverted F Antenna</i>
POE	- Parâmetros de Orientação Exterior
RMSE	- <i>Root Mean Square Error</i>
SNR	- <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SQL	- <i>Structured Query Language</i>
TFW	- <i>Text File Word</i>
TM	- Transversa de Mercator
TTF	- <i>Time To First Fix</i>
UCB	- União de Ciclistas do Brasil
UTM	- Universal Transversa de Mercator
VGI	- <i>Volunteered Geographic Information</i>
WG IV/4	- <i>Collaborative Crowdsourced Cloud Mapping</i>
XML	- <i>eXensible Markup Language</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	19
1.1.	Estado da Arte	22
1.2.	Objetivos da Pesquisa.....	23
1.3.	Justificativa.....	24
1.4.	Estrutura da Dissertação	25
2.	REVISÃO DE LITERATURA	26
2.1.	Mapeamento Colaborativo	26
2.2.	Posicionamento GNSS em dispositivos móveis.....	30
2.2.1.	Pré-análise	33
2.3.	Trajetórias GNSS.....	34
2.4.	Transformações entre sistemas de coordenadas	36
2.4.1.	Transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas na projeção UTM.....	36
2.4.2.	Transformação de coordenadas da projeção UTM em coordenadas do sistema imagem.....	38
2.5.	Detecção de bordas e linhas em imagens	39
2.5.1.	Detector de bordas de Sobel.....	42
2.5.2.	Detector de bordas de Canny	43
2.5.3.	Esqueletização de regiões	44
2.5.4.	Detector de linhas de Steger	46
2.6.	Análise de Qualidade.....	50
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1.	Área de estudo e dados	53
3.2.	Recursos de Hardware e Software.....	56
3.3.	Metodologia.....	57
3.3.1.	Agrupamento e densificação das trajetórias GNSS	58
3.3.2.	Transformação de coordenadas e geração da imagem de frequência ..	59
3.3.3.	Extração de rodovias com o detector de linhas de Steger.....	61
3.3.4.	Geração de dados de referência e análise de qualidade	63

4.	EXPERIMENTOS.....	68
4.1.	Experimento I - Análise dos parâmetros do detector de linhas de Steger	68
4.2.	Experimento II – Extração de rodovias de faixas simples e duplas	72
4.3.	Experimento III – Extração de vias urbanas.....	74
4.4.	Experimento IV – Comparação de resultados	75
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
5.1.	Experimento I – Análise dos parâmetros do detector de linhas de Steger	77
5.2.	Experimento II – Extração de rodovias de faixas simples e duplas	86
5.3.	Experimento III – Extração de vias urbanas.....	91
5.4.	Experimento IV – Comparação de resultados	94
6.	CONCLUSÕES.....	97
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A – ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA GERAÇÃO DA IMAGEM DE FREQUÊNCIA DE TRAJETÓRIAS GNSS	106

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, com a necessidade de se localizar e se locomover através das melhores rotas, diversos aplicativos são utilizados por meio de dispositivos móveis (*smartphones*), que possuem a função de determinar e armazenar a posição geográfica em tempo real. Logo, um grande volume de informação posicional é disponibilizado de forma voluntária ou até mesmo involuntária pelos usuários desses aplicativos. Aliar essa informação, com o processo de extração de rodovias pode significar um grande avanço para a atualização da malha viária, devido ao elevado nível de automação.

A partir da década de 70 pesquisadores despertaram interesse pelo processo de extração de rodovias a partir de imagens aéreas e orbitais, como pode ser observado no trabalho de Bajcsy e Tavakoli (1976), que desenvolveram um programa capaz de reconhecer estradas e suas intersecções, bem como demais elementos semelhantes a estradas: rios, córregos e trilhas. No entanto, segundo Davies *et al.* (2006) e Oloo (2018) a aplicação de métodos fotogramétricos convencionais para mapeamento de rodovias, é caracterizado por apresentar custos econômicos elevados, visto que para manter os mesmos atualizados novas imagens devem ser obtidas com frequência.

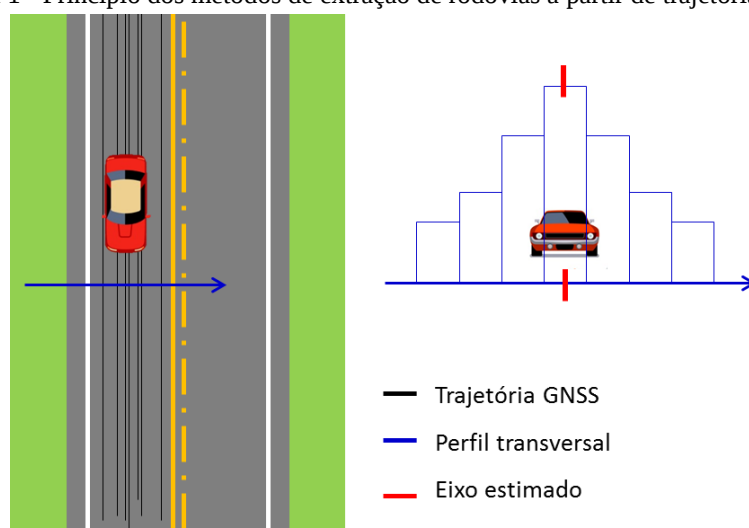
Porém, ressalta-se que quando um mapeamento aéreo é realizado, diversos produtos podem ser gerados a partir dos dados adquiridos: carta topográfica planialtimétrica, Modelo Digital de Terreno (MDT) e de Superfície (MDS), ortofotocarta, cartas temáticas, entre outros. Alternativamente, imagens orbitais também podem ser empregadas, porém se adquiridas exclusivamente para extração de rodovias, dependendo da resolução espacial necessária, o trabalho pode se tornar caro.

A principal motivação para continuação do interesse em desenvolver métodos, para o processo de extração de rodovias, se deve ao fato da necessidade de aprimoramento de alguns aspectos, como nível de automação e a utilização de diferentes fontes de dados. Além disso, a malha viária é uma das feições de maior interesse quando se trata de mapeamento (MARTINS, 2017; MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2019), visto que tanto o setor público quanto a iniciativa privada necessitam de uma base cartográfica atualizada, que se construída por métodos convencionais exige um enorme esforço do operador e dependendo da dimensão territorial do país, ao final do processo a mesma poderá já estar desatualizada (HUANG *et al.*, 2018).

Nos últimos anos, diversos trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de propor alternativas para o processo de extração de rodovias, alguns em especial, empregando como dados de entrada trajetórias GNSS (*Global Navigation Satellite System*) disponibilizadas por usuários de alguns serviços (ZHANG *et al.*, 2010; MARTINS, 2017; HUANG *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2018; PU *et al.*, 2019; FRANCA *et al.*, 2019), caracterizando o que pode ser denominado como uma espécie de mapeamento colaborativo (*crowdsourcing*). Os dados geoespaciais fornecidos voluntariamente por *crowdsourcers* são atualizados e apresentam precisão variada, visto que muitos usuários não são profissionais da área de mapeamento, no entanto, segundo Touya *et al.* (2017), a qualidade destes dados atende a diversas aplicações, dada a completeza, consistência topológica, acurácia posicional e temática dos mesmos.

O problema de reconstrução do eixo de rodovia, desde as simples de duas mãos até as mais complexas envolvendo múltiplas faixas, pode ser resolvido usando trajetórias GNSS densas. Nesse contexto, histogramas construídos transversalmente às rodovias são comumente utilizados. De acordo com Chen e Krumm (2010), estes histogramas tendem à distribuição normal à medida que o número de trajetórias GNSS aumenta. Assim, o centro do histograma corresponde a um ponto mais provável de eixo da rodovia (Figura 1).

Figura 1 - Princípio dos métodos de extração de rodovias a partir de trajetórias GNSS.



Fonte: O autor (2021).

A geração de imagens de frequência a partir de trajetórias GNSS para extração de rodovias foi uma estratégia abordada por alguns pesquisadores, sendo possível citar os trabalhos de Davies *et al.* (2006), no qual foi feita a conversão de trajetórias GNSS em uma

imagem binária para possibilitar a extração de eixos de rodovia usando técnicas de processamento digital de imagens, e Biagioni e Eriksson (2012), que aplicaram a técnica de esqueletização em uma imagem de intensidade, também gerada a partir de um conjunto denso de trajetórias GNSS.

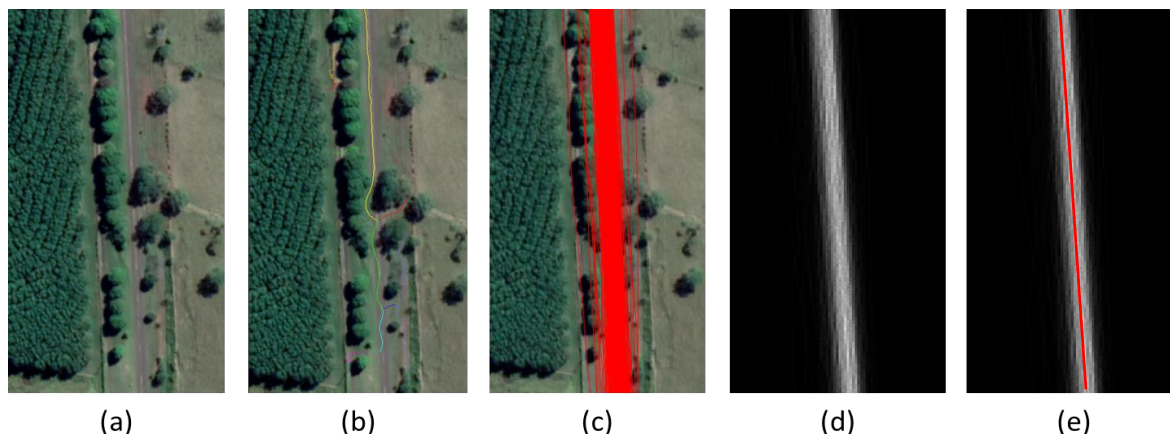
Nessa pesquisa é proposto o uso do detector de linhas de Steger (Steger, 1996, 1998 e 2000), para resolver o problema de extração de rodovias a partir de trajetórias GNSS densas, aplicado a imagens geradas a partir da frequência de amostragem dessas trajetórias. O detector de Steger foi desenvolvido para detectar linhas tanto com espessura de poucos pixels (1-3 pixels), quanto com dezenas de pixels. Nesse último caso, o alvo de interesse é o eixo (imaginário) de uma feição larga e alongada, como uma rodovia em uma imagem aérea ou de satélite de alta resolução. Já em uma imagem de frequência de trajetórias GNSS uma rodovia simples, por exemplo, tende a aparecer como duas faixas claras e adjacentes, com maior brilho nas respectivas posições centrais.

Logo, o detector de linhas de Steger possui, tendo em vista suas características, potencial para ser eficiente na detecção dos eixos de simetria das diferentes faixas de rodovia. A razão pela escolha do detector de linhas de Steger se deve a eficiência do mesmo nos processos de detecção e extração de linhas em imagens de baixa, média e alta resolução (ISHIBASHI, 2008). Além disso, o detector de linhas de Steger fornece precisão sub-pixel (STEGEER, 2000).

Uma das principais motivações para executar a metodologia proposta neste trabalho é o uso de uma imagem de frequência de trajetórias GNSS (Figura 2d), pois a mesma representa apenas a feição de interesse, no caso, rodovias, diferentemente de uma imagem convencional, na qual os demais elementos da paisagem se encontram presentes (vegetação, rios, edificações, etc.) (Figura 2a), que contribuem para que falsos positivos sejam detectados, além de exclusões causadas por regiões de oclusão (Figura 2b). Com um conjunto denso de trajetórias GNSS (Figura 2c) é possível extrair o eixo de forma acurada e com um alto nível de completeza (Figura 2e).

Além disso, os resultados serão avaliados através da comparação com imagens aéreas de alta resolução e métodos fotogramétricos rigorosos, visto que em muitos trabalhos (BIAGIONI e ERIKSSON, 2012) os dados de referência são extraídos a partir de fontes como *Google Earth*, *Google Maps* e *OpenStreetMap*, serviços conhecidos por não proporcionarem boa acurácia posicional.

Figura 2 - Motivação para aplicação do método: (a) Imagem aérea de uma rodovia com os demais elementos da paisagem (vegetação); (b) Resultado da extração da rodovia, na qual é possível verificar os erros causados por regiões de oclusões, bem como pela detecção de falsos positivos; (c) Trajetórias GNSS rastreadas; (d) Imagem de frequência gerada a partir das trajetórias GNSS; e (e) Resultado da extração, na qual é possível verificar a ausência dos erros presentes em (b).



Fonte: O autor (2021).

1.1. Estado da Arte

Ao longo dos últimos anos inúmeros estudos foram realizados, utilizando como fonte de dados trajetórias GNSS, sendo estas aplicadas nos mais diferentes campos, por exemplo, estudos de impacto ao ambiente, modelagem do comportamento humano e análise e previsão do tráfego de veículos (MARKOVIC *et al.*, 2019). Além dessas aplicações, encontram-se vários trabalhos voltados para extração e atualização de rodovias, estradas e vias urbanas, bem como para identificação de informações sobre o tráfego de veículos e elementos que compõem a infraestrutura de transportes (BIAGIONI e ERIKSSON, 2012, MARTINS, 2017; HUANG *et al.*, 2018).

Yuan e Cheriadat (2016) combinaram imagens aéreas e trajetórias GPS para extração do eixo viário, onde as trajetórias originais foram utilizadas em conjunto com o processo de segmentação de imagens, detectando assim as regiões compostas pela malha viária. Ezzat *et al.* (2017) utilizaram o algoritmo de Douglas-Peucker para simplificação de trajetórias GPS, seguido pela técnica de agrupamento para a extração das vias e suas intersecções. Xie *et al.* (2017) utilizaram a técnica KDE (*Kernel Density Estimation*) para detectar intersecções de vias a partir de trajetórias GPS. Tang *et al.* (2017) e Yang *et al.* (2018) propuseram um método baseado na triangulação de Delaunay para extração de rodovias utilizando um conjunto de trajetórias GPS.

Oloo (2018) utilizou trajetórias GPS adquiridas por mototaxistas para mapear estradas rurais do Quênia (África), com o intuito de melhorar o acesso a comunidades vulneráveis, bem como contribuir com a iniciativa de mapeamento colaborativo *OpenStreetMap*. Munoz-Organero *et al.* (2018) utilizaram técnicas de *Machine Learning* (ML) para detecção automática de elementos que compõem a infraestrutura de tráfego, como semáforos, cruzamentos de vias e rotatórias, utilizando como fonte de dados trajetórias GPS coletadas apenas com dispositivos móveis. A partir das trajetórias os autores analisaram padrões de velocidade e aceleração, para extrair os elementos listados anteriormente.

Huang *et al.* (2018) desenvolveram um método para geração de mapas de rodovias, a partir de trajetórias GPS (*Global Positioning System*), empregando estrutura de grafos. Além disso, os autores discutem os desafios de se trabalhar com trajetórias GPS, sendo estes: regiões com baixa frequência de trajetórias; baixa taxa de amostragem dos pontos que compõem as trajetórias; bem como a influência dos erros de observação, grosseiros, sistemáticos e aleatórios, inerentes ao posicionamento GNSS.

Li *et al.* (2019) utilizaram trajetórias GPS de táxis combinadas com imagens orbitais de Sensoriamento Remoto para gerar mapas de rodovia via DCNN (*Deep Convolutional Neural Networks*). Com essa integração os autores conseguiram melhorar os resultados finais, visto que problemas como a densidade irregular, erros grosseiros e a baixa taxa de amostragem das trajetórias GPS, bem como as oclusões da malha viária por edificações e áreas com vegetação em imagens de Sensoriamento Remoto; são minimizados, pois as duas fontes de dados se tornam complementares.

Wu *et al.* (2019) também extraíram vias e suas intersecções por meio de um grande volume de dados de navegação provindos de dispositivos móveis. Uma técnica de filtragem de dados e validação topológica para segmentos e cruzamentos foi aplicada, obtendo uma acurácia de 1,84 m. Um algoritmo baseado no modelo oculto de Markov foi elaborado por Wu *et al.* (2016) e Francia *et al.* (2019) com o objetivo de extrair e atualizar vias urbanas, utilizando também como dados trajetórias GPS.

1.2. Objetivos da Pesquisa

O objetivo geral desta pesquisa é realizar a extração do eixo de rodovias, de faixa única (simples) e dupla, por meio do detector de linhas de Steger, utilizando-se de um

conjunto denso de trajetórias GNSS coletadas e armazenadas com dispositivos de baixo custo, no caso *smartphones*.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- 1) Desenvolver e implementar um algoritmo para transformar um conjunto de trajetórias GNSS em uma imagem bidimensional de frequência de trajetórias;
- 2) Utilizar o detector de linhas de Steger para extrair o eixo viário a partir da imagem de frequência;
- 3) Realizar o controle de qualidade de forma qualitativa e quantitativa, por meio de inspeção visual e com base nos indicadores de qualidade completeza, correção e RMSE (*Root Mean Square Error*);
- 4) Avaliar o potencial de aplicação em projetos de mapeamento topográfico de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), segundo a norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre; e
- 5) Utilizar imagens de alta resolução (0,45 m) e métodos fotogramétricos rigorosos para geração de dados de referência.

1.3. Justificativa

O Grupo de Trabalho WG IV/4 (*Collaborative Crowdsourced Cloud Mapping*) da *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS) tem como principal objetivo a aquisição e integração da informação geoespacial em um ambiente colaborativo. Como forma de alcançar o objetivo proposto o WG IV/4 estuda a utilização de dados geoespaciais disponibilizados voluntariamente por usuários. Dentre estes se encontram as trajetórias GNSS, que servirão como dado principal para a realização desta pesquisa. Logo, o tema dessa dissertação de mestrado está alinhado com um dos objetivos da comunidade científica da ISPRS.

Além disso, é possível encontrar na literatura uma grande quantidade de trabalhos que utilizam como fonte de dados trajetórias GNSS no contexto de extração de rodovias, no entanto, em sua maioria, os resultados são apresentados com base na qualidade topológica, poucos avaliam a acurácia geométrica da extração, bem como a aplicabilidade em projetos de mapeamento.

1.4. Estrutura da Dissertação

O conteúdo da dissertação está dividido em seis seções. Na segunda seção é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos abordados ao longo deste trabalho, como o mapeamento colaborativo, trajetórias GNSS, transformações entre sistemas de coordenadas, bem como os métodos de detecção de linhas e bordas em imagens digitais, sendo enfatizado o detector de linhas de Steger.

Na terceira seção apresenta-se a região de estudo, os dados, bem como os recursos de *software* e *hardware* utilizados ao longo do trabalho. Além disso, explica-se a metodologia proposta. A Seção 4 é dedicada para a apresentação dos experimentos, sendo: o primeiro experimento realizado com o intuito de avaliar o comportamento dos parâmetros do detector de linhas de Steger em imagens de frequência geradas a partir de trajetórias GNSS; o segundo experimento visa analisar uma aplicação prática de extração de rodovias para mapeamento, com base no estudo dos parâmetros realizado no primeiro experimento; o terceiro experimento verifica a possibilidade de emprego do método para detecção de vias em áreas urbanas; e por fim, o quarto experimento possui a finalidade de comparar o método proposto com outros métodos presentes na literatura.

A Seção 5 apresenta os resultados obtidos, bem como a discussão dos mesmos, para cada um dos experimentos brevemente descritos anteriormente. Por fim, na última seção, as conclusões são expostas. No Apêndice A, encontra-se o código e biblioteca implementados em linguagem ANSI C, utilizados na etapa de geração da imagem de frequência.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Nesta Seção será apresentada a fundamentação teórica que embasa essa pesquisa. Deste modo, será apresentada uma breve descrição sobre o tema mapeamento colaborativo (Subseção 2.1), bem como os princípios do posicionamento GNSS em dispositivos móveis (Subseção 2.2) e o que são trajetórias GNSS (Subseção 2.3). A Subseção 2.4 apresenta a formulação para transformação de coordenadas geodésicas (φ , λ) para coordenadas do sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), e posteriormente para o sistema de coordenadas de imagem. Finalizando, a Subseção 2.5 descreverá o detector de linhas de Steger e a Subseção 2.6 o método adotado para análise quantitativa dos resultados.

2.1. Mapeamento Colaborativo

Devido ao elevado custo inerente ao processo de aquisição de dados geoespaciais de alta acurácia, como imagens aéreas e orbitais de alta resolução, bem como coordenadas de pontos rastreadas por meio de métodos de posicionamento GNSS altamente precisos (OLOO, 2018 e HUANG *et al.*, 2018), a busca por fontes de dados geoespaciais alternativas vem se tornando cada vez mais comum. Deste modo, observa-se o crescente interesse da comunidade científica em desenvolver e aplicar metodologias com o intuito de aproveitar da melhor maneira possível dessas fontes de dados, visando à preservação de diversos aspectos, como: organização; distribuição; e manutenção da qualidade.

Uma das fontes de dados mais explorada ultimamente consiste no armazenamento de informação geoespacial disponibilizada por usuários de determinados serviços e/ou aplicativos (HAKLAY e WEBER, 2008). Muitas vezes essa informação é disponibilizada de forma voluntária, ou seja, o usuário concorda em liberar a mesma, e até mesmo involuntária, quando o usuário não possui o conhecimento de sua contribuição (HARVEY, 2013). Para ambos os casos, entende-se este processo como uma forma de mapeamento colaborativo, denominado também pelo termo *crowdsourcing* (HEIPKE, 2010), fundamental para manutenção de diversos projetos, como o *OpenStreetMap* (HAKLAY, 2010), no qual os usuários contribuem com dados de trajetória GNSS, bem como editam a base cartográfica, e *Wikipédia* (LEE e SEO, 2016), no qual os usuários podem atualizar e complementar os textos disponíveis sobre os mais diversificados temas.

O termo *crowdsourcing* é derivado do termo *outsourcing*, onde a produção é transferida para locais remotos e potencialmente mais baratos. De forma análoga, o *crowdsourcing* descreve o conceito em que grupos de usuários realizam trabalhos economicamente caros ou de difícil automatização (HEIPKE, 2010).

Existem diversas plataformas para edição de mapas virtuais, algumas livres e outras proprietárias. Como exemplo de *software* livre pode-se citar o aplicativo JOSM (*Java OpenStreetMap Editor*) lançado em 2006, usado para editar dados do projeto *OpenStreetMap* (JOSM, 2020). Em relação aos *softwares* proprietários, em 2008 a empresa Google desenvolveu o *Google Map Maker*, para que qualquer pessoa pudesse contribuir com a produção de mapas para melhorar a base cartográfica do *Google Maps*, visto que a base cartográfica de muitos municípios não foi disponibilizada pelos seus respectivos governos. Diferentemente do JOSM, ativo até hoje, o *Google Map Maker* foi encerrado em 2017 (WIKIPÉDIA, 2020).

A informação geográfica disponibilizada pelos usuários pode ser classificada em Informação Geográfica Contribuída (*Contributed Geographic Information* - CGI) e Informação Geográfica Voluntária (*Volunteered Geographic Information* - VGI), dependendo do grau de controle do usuário sobre a aquisição e utilização de dados geoespaciais. No VGI a informação geográfica coletada é fornecida com o conhecimento do produtor, enquanto que na CGI a informação geográfica é coletada e transmitida de forma autônoma (HARVEY¹, 2013 *apud* MARTINS, 2017).

Dentre os dados disponibilizados por *crowdsourcing* encontram-se as trajetórias GNSS (Subseção 2.3), podendo estas serem utilizadas em diversas aplicações, como: o estudo de padrões de mobilidade; identificação automática de fluxo de veículos, contribuindo para determinação de melhores rotas para o tráfego; entre outros. Segundo Huang *et al.* (2018) trajetórias GNSS contêm rica informação da estrutura de malhas viárias, visto que a partir das mesmas é possível extrair informação do tipo: geométrica (eixo de uma via) de forma direta; e semântica (limite de velocidade e velocidade média do trajeto) e topológica (intersecção de vias ou cruzamentos) de forma indireta.

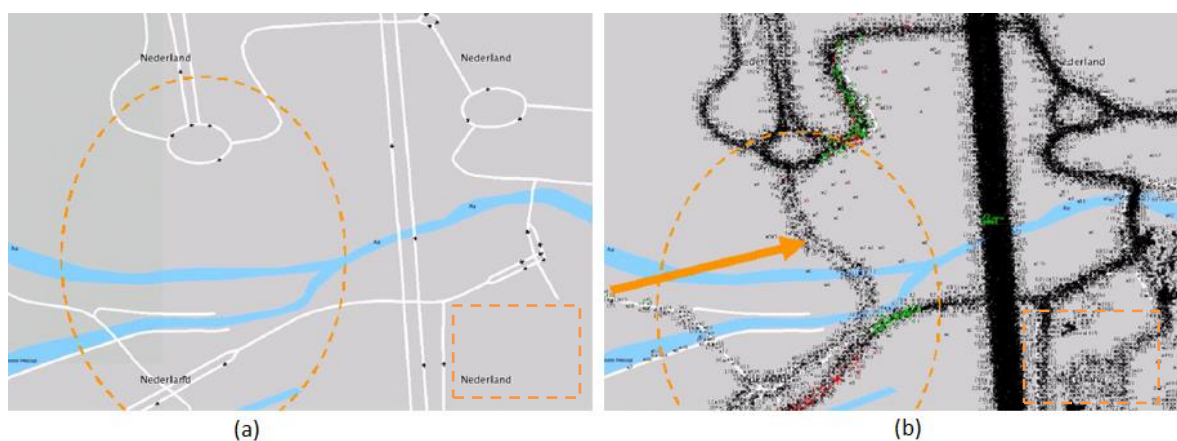
O mapeamento colaborativo a partir de trajetórias GNSS para extração de rodovias se tornou tão visado nos últimos anos que Ahmed *et al.* (2015) elaboraram um site (<http://mapconstruction.org/>) e um *e-book* com a iniciativa de reunir trabalhos com essa

¹ HARVEY, F. To volunteer or to contribute locational information? Towards truth in labeling for crowdsourced geographic information. In: *Crowdsourcing Geographic Knowledge*. Netherlands, 2013.

temática, bem como convidar pesquisadores para contribuir com novos métodos e resultados. Assim, o repositório reúne algoritmos para extração de rodovias e métodos para avaliação dos resultados. Além disso, também é disponibilizado um conjunto de *datasets* de diferentes localidades, como Atenas, Berlim e Chicago, para que pesquisadores possam testar seus algoritmos.

Heipke (2010) apresenta um exemplo de utilização de trajetórias GNSS para atualização de mapas. A Figura 3a apresenta um mapa com feições hidrográficas (rios) e viárias (ruas, estradas e rodovias), seguido pela projeção de um conjunto de trajetórias sobre o mesmo (Figura 3b), onde é possível perceber a presença de um fluxo de deslocamento de usuários por um acesso não representado na Figura 3a. Logo, a partir desses dados podem-se aplicar métodos para atualização da base cartográfica da região.

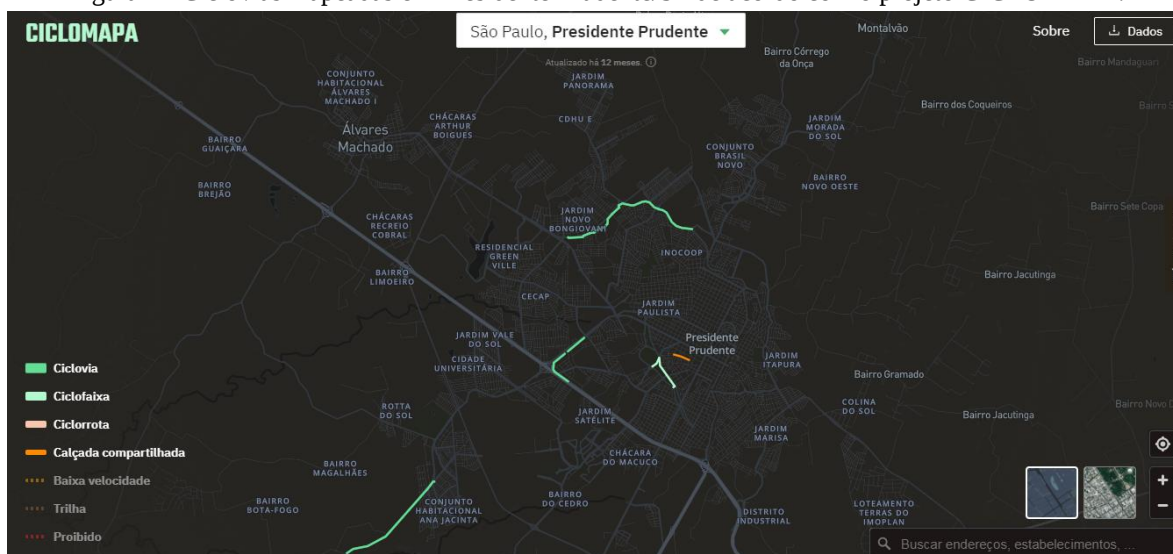
Figura 3 - Exemplo de utilização de dados disponibilizados por mapeamento colaborativo: (a) base cartográfica desatualizada; e (b) detecção de novos segmentos de rodovia.



Fonte: Adaptado de Heipke (2010).

No Brasil existem algumas iniciativas de mapeamento colaborativo. Em 2019 o Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP) e a União de Ciclistas do Brasil (UCB) desenvolveram o projeto Ciclomapa, sendo este uma plataforma de mapeamento colaborativo, que utiliza a base cartográfica do *OpenStreetMap*, cujo intuito é facilitar e incentivar o acesso à infraestrutura cicloviária das cidades brasileiras (Figura 4). Nesta plataforma é possível editar, corrigir e adicionar dados relacionados à infraestrutura cicloviária, a partir do conhecimento do usuário. Esses dados contemplam a parte geométrica, bem como os atributos, como a classificação do tipo de ciclovia (ITDP BRASIL, 2020).

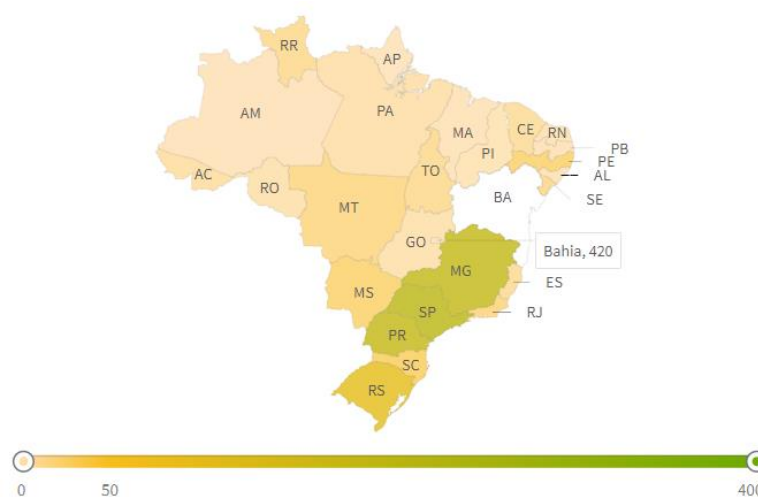
Figura 4 - Ciclovias mapeadas em Presidente Prudente/SP de acordo com o projeto CICLOMAPA.



Fonte: <https://ciclomapa.org.br/?lat=-22.113613&lng=-51.4151198&z=11.69>

Outra iniciativa brasileira de mapeamento colaborativo, em aplicações na área de transportes, é o projeto *Tracksource* (TRACKSOURCE, 2020). A finalidade deste projeto é construir e distribuir, gratuitamente, mapas da malha viária brasileira (rodovias, estradas rurais e vias urbanas) para uso em receptores GPS de navegação Garmin[®] e compatíveis, bem como em *smartphones*, *tablets* e computadores com navegador 7Ways ou Navitel (TRACKSOURCE, 2020). Este projeto foi criado em 2002, porém é originário de uma ideia de 1996, quando um grupo de usuários utilizou a *internet* para compartilhar trajetórias GPS e pontos de interesse para abastecer os receptores GPS de navegação daquela época, visto que os mapas disponibilizados pelos fabricantes eram imprecisos e poucos detalhados (TRACKSOURCE, 2020).

Figura 5 - Quantidade de mapas produzidos pelo projeto *Tracksource* por Estado.



Fonte: http://www.tracksource.org.br/desenv/tabela_mapsets.php

O projeto *Tracksource* se encontra ativo até o momento, e novos voluntários são convidados a colaborar de diferentes maneiras: por meio do envio de dados para melhoria dos mapas; sendo um desenvolvedor dos mapas; através de doações voluntárias; ou sendo um parceiro (TRACKSOURCE, 2020). A Figura 5 apresenta a quantidade de mapas produzidos por Estado, no território brasileiro.

Além dos projetos brasileiros para o mapeamento da malha viária de forma colaborativa, diversos trabalhos foram e vem sendo desenvolvidos no Brasil em diferentes contextos. Stevanato *et al.* (2018) utilizaram o mapeamento colaborativo para detectar problemas urbanos (lixo, sinalização, calçamento, pavimentação, etc.) no entorno de uma escola da rede pública, sendo os colaboradores os próprios alunos. Ferreira *et al.* (2017) mapearam creches e abrigos infantis no município de Recife-PE, a partir de dados geográficos disponibilizados de forma colaborativa. Paulovski e Colavite (2020) avaliaram aplicativos de mapeamento colaborativo, desenvolvidos para a representação espacial dos casos de dengue.

Segundo Machado e Camboim (2019) a integração entre mapeamento colaborativo, a partir da VGI, com o mapeamento de referência oficial é uma alternativa interessante para gestão e planejamento urbano dos municípios brasileiros, visto que poucos possuem uma base cartográfica em grande escala produzida por métodos convencionais. Além disso, a informação geográfica produzida por cidadãos locais possui grande valor, pois os mesmos têm conhecimento da dinâmica espacial do lugar onde vivem, além de oferecer um grande volume de dados atualizados frequentemente (MACHADO e CAMBOIM, 2019).

2.2. Posicionamento GNSS em dispositivos móveis

De modo geral o posicionamento GNSS é responsável pela determinação de coordenadas tridimensionais cartesianas (X, Y, Z) de um objeto sobre a superfície física em relação a um referencial específico (MONICO, 2008). Basicamente, o posicionamento por GNSS consiste na medida de distâncias entre a antena do receptor do usuário e no mínimo quatro satélites, e conhecendo as coordenadas dos satélites é possível calcular as coordenadas da antena do receptor do usuário (MONICO, 2008).

Além disso, conforme o método aplicado, o mesmo pode ser classificado como: posicionamento absoluto (autônomo ou por ponto simples), quando as coordenadas estão diretamente associadas ao geocentro; e posicionamento relativo, quando as coordenadas

são determinadas a partir de um referencial materializado por um ou mais vértices de posição conhecida (MONICO, 2008).

O método de posicionamento por ponto é caracterizado pela utilização da observável pseudodistância e efemérides transmitidas. Além disso, ressalta-se que os erros envolvidos no posicionamento por ponto não são modelados, sendo os principais a refração troposférica e ionosférica, e o multicaminho.

No entanto, quando se trata especificamente de posicionamento GNSS com dispositivos móveis, como os *smartphones*, algumas peculiaridades devem ser observadas, sendo essas descritas a seguir, especificamente para modelos de sistema operacional Android.

Segundo Lima (2018) a necessidade de determinar a posição geográfica a partir de equipamentos de baixo custo tem contribuído para o desenvolvimento dos *chips* de GNSS para *smartphones* ao longo dos últimos anos, dada às necessidades de se deslocar de um local para outro. No entanto, deve-se ressaltar que a acurácia atingida é inferior à obtida com receptores geodésicos convencionais.

O diferencial do posicionamento a partir de dispositivos móveis, em relação ao posicionamento com equipamentos convencionais é o A-GNSS (*Assisted GNSS*), uma técnica cujo objetivo é a melhora no desempenho dos *chips* GNSS contidos em dispositivos móveis, através do fornecimento da informação, no caso efemérides e correções, por canais alternativos de comunicação, como rede móvel e conexão *wireless* (como exemplo, o protocolo *WiFi*), além de receber e processar os sinais dos satélites (DIGGELEN², 2009 *apud* LIMA, 2018). Essa melhora está associada à acurácia, ao tempo de processamento, à economia de bateria, à determinação da posição em ambientes fechados ou com muitas obstruções e velocidade do posicionamento.

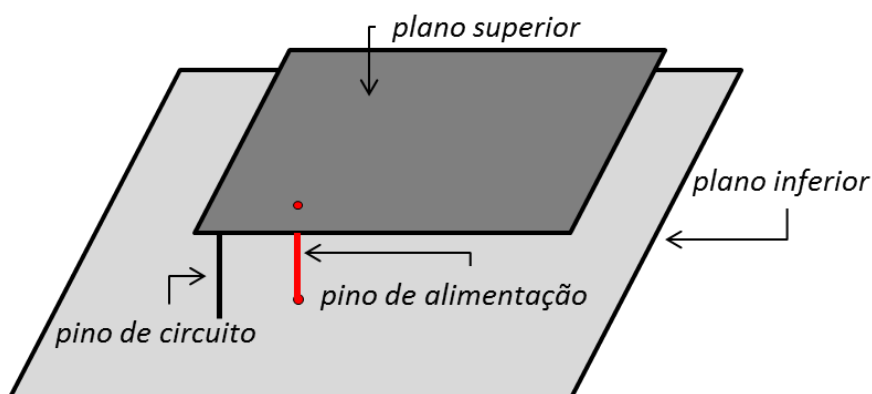
Ressalta-se que há *smartphones* que não possuem *chipset* GNSS para coleta do sinal da antena do satélite, neste caso, a determinação da posição ocorre externamente (por servidores) a partir das torres de telefonia, e a mesma é transmitida ao *smartphone* através da rede móvel e conexão *WiFi*, ou seja, a posição do dispositivo pode ser calculada internamente ou externamente.

Segundo a *European GNSS Agency* (GSA, 2018) um *chipset* com a arquitetura A-GNSS possui como principais componentes para a navegação a antena e o oscilador. O oscilador possui a função de controlar o tempo para o cálculo da posição (GSA, 2018). A antena embutida em um *smartphone* é de baixo custo, sendo geralmente do modelo PIFA

² VAN DIGGELEN, F. A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS. *Artech House*. Boston, 2009.

(*Planar Inverted-F Antenna*) (Figura 6), adequada para qualquer constelação na frequência L1 (GSA, 2018).

Figura 6 - Esquema de uma antena do modelo *Planar Inverted-F Antenna*.



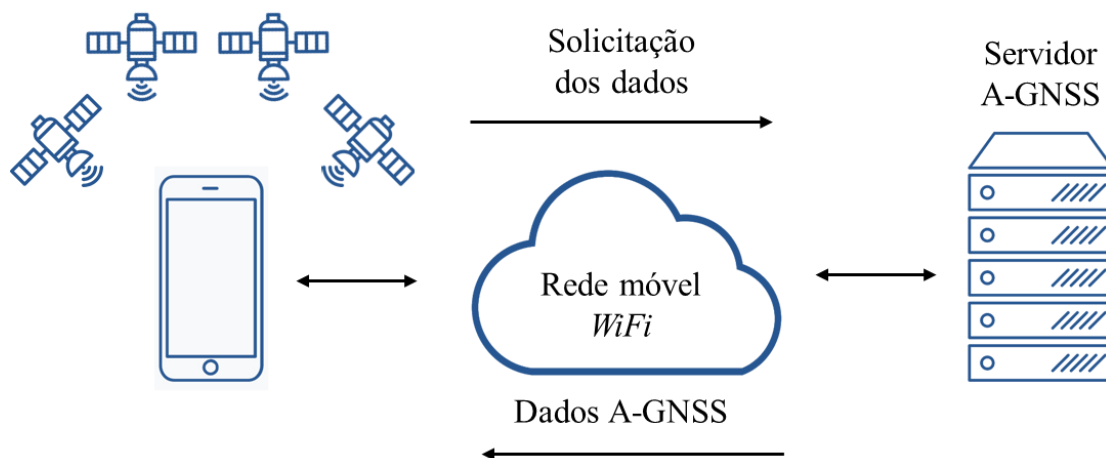
Fonte: Adaptado de u-blox (2019).

A principal motivação para se empregar a técnica A-GNSS em dispositivos móveis é reduzir o TTFF (*Time To First Fix*), ou seja, diminuir o tempo necessário para que a posição do receptor (*smartphone*) seja calculada por meio dos dados de órbita e relógio (efemérides) dos satélites visíveis, tarefa difícil em locais com muitas obstruções, como grandes centros urbanos e ambientes fechados (automóveis e residências) (GSA, 2018). O TTFF é reduzido, pois a largura de banda com o satélite é menor, ou seja, menor velocidade de comunicação quando comparado com outras fontes (rede móvel e *WiFi*), cuja largura de banda é maior.

A Figura 7 esquematiza o funcionamento da técnica A-GNSS. Basicamente, um servidor armazena as efemérides dos satélites visíveis, correção do erro do relógio e os parâmetros de modelos ionosféricos e, quando solicitado, essas informações são transmitidas ao mesmo por meio das torres de telefonia móvel e *WiFi*, de forma mais rápida que a convencional que seria o rastreamento direto do sinal dos satélites (GSA, 2018).

A acurácia final do posicionamento depende das configurações do dispositivo móvel, por exemplo, um dispositivo que é capaz de rastrear a observável pseudodistância em uma única frequência proporcionará uma acurácia de cerca de 10 m (MONICO, 2008), enquanto que um dispositivo capaz de rastrear em dupla frequência e coletando as observáveis pseudodistância e fase da onda portadora pode alcançar uma acurácia submétrica, após aplicação de todas as correções (GSA, 2018). Ressalta-se que neste trabalho os dispositivos utilizados se enquadram no primeiro caso.

Figura 7 - Esquema de funcionamento da técnica A-GNSS.



Fonte: Adaptado de GSA (2018).

2.2.1. Pré-análise

Com o intuito de avaliar a acurácia do método de posicionamento por ponto simples a partir de *smartphones*, efetuou-se uma pré-análise em um marco (EP01) de coordenadas conhecidas, sendo estas determinadas por meio do método de posicionamento relativo estático, utilizando como base estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) (Figura 8). Visto que o posicionamento por GNSS em *smartphones* segue os princípios da técnica A-GNSS, foram realizadas algumas análises de forma separada. Primeiramente, o rastreo das coordenadas foi executado apenas com o sensor GNSS do dispositivo. Em seguida, a posição foi determinada apenas com as informações provindas da rede móvel (4G) e *WiFi*. Por fim, as coordenadas do marco foram estimadas com a combinação do sensor GNSS, rede móvel e *WiFi*, ou seja, por meio da técnica A-GNSS.

Figura 8 - Marco geodésico EP01 com coordenadas conhecidas.



Fonte: O autor (2021).

Ressalta-se que entre os experimentos o dispositivo foi reiniciado e que em todas as análises o tempo de coleta foi de 1 minuto. A Tabela 1 apresenta as coordenadas verdadeiras, bem como as determinadas por meio de cada um dos rastreios. A Tabela 2 mostra as discrepâncias por componente, bem como a discrepância 3D.

Tabela 1 - Coordenadas de referência e coletadas com o *smartphone*.

Experimento	E (m)	N (m)	h (m)
Referência (RBMC)	457963,936	7553544,207	436,705
GNSS	457968,000	7553541,000	431,000
Rede móvel e Wi-Fi	457945,000	7553488,000	384,000
A-GNSS	457962,000	7553542,000	432,000

Fonte: O autor (2021).

Tabela 2 - Discrepâncias encontradas para cada uma das técnicas de rastreamento.

Experimento	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)	$\Delta 3D$ (m)
GNSS	4,064	-3,207	-5,705	7,704
Rede móvel e Wi-Fi	-18,936	-56,207	-52,705	79,345
A-GNSS	-1,936	-2,207	-4,705	5,546

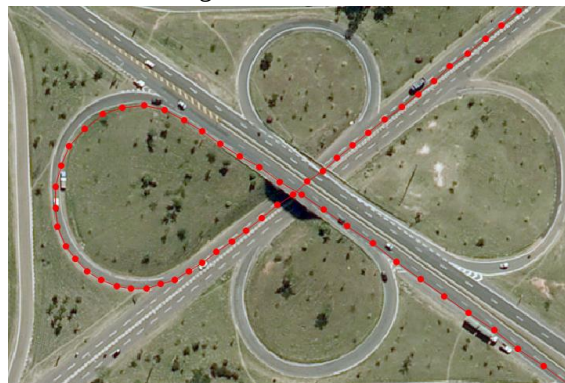
Fonte: O autor (2021).

A partir da Tabela 2 verifica-se que a acurácia obtida com o sensor GNSS do *smartphone* no método de posicionamento por ponto simples é coerente com o valor teórico de 10 m (MONICO, 2008). Observa-se que, quando a posição é determinada por meio da técnica A-GNSS se obtêm maior acurácia. Porém, diferentemente do método de posicionamento relativo, no posicionamento por ponto não se obtêm uma solução fixa e devido aos erros sistemáticos e aleatórios, em alguns casos o erro pode ser maior que o encontrado neste experimento isolado.

2.3. Trajetórias GNSS

Segundo Lee *et al.* (2008), uma trajetória GNSS (Figura 9) é composta por uma sequência de pontos, cujas coordenadas foram adquiridas ao longo de um determinado intervalo de tempo. Normalmente, os arquivos de trajetórias GNSS são disponibilizados no formato GPX (*GPS eXchange format*), e apresentam alguns atributos como: latitude, longitude e altitude geométrica dos pontos rastreados; instante da coleta; entre outras informações (Figura 10).

Figura 9 - Exemplo de trajetória GNSS, constituída pelos pontos em vermelho, sobreposta a uma ortofoto georreferenciada.



Fonte: O autor (2021).

O formato GPX se baseia no esquema XML (*eXensible Markup Language*), sendo utilizado para o armazenamento do pontos (*wpt Type*), rotas (*rte Type*) e trajetórias (*trk Type*). Apesar da sigla se referir especificamente ao sistema GPS, o formato também armazena as coordenadas calculadas a partir de outros sistemas, tais como: GLONASS, Galileo, BeiDou e sistemas de aumento; provavelmente a referência ao sistema GPS se deve a popularidade do mesmo no ano em que o formato foi criado, em 2002.

De acordo com Haklay (2010), uma trajetória GNSS apresenta acurácia posicional entre 6 e 10 m, quando adquirida de forma isolada. No entanto, espera-se que um conjunto denso de trajetórias tende a apresentar uma distribuição próxima da distribuição normal, sendo a média amostral representante de uma trajetória de alta qualidade posicional, se aproximando da média populacional. Logo, esta é a motivação em aplicar o método proposto para realizar a extração automática do eixo rodoviário, por meio da detecção de linhas.

Figura 10 - Exemplo de arquivo de trajetória GNSS no formato GPX.

```
<?xml version="1.0"?>
<gpx version="1.0" creator="Ultra GPS Logger" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema
<!-- segment: Presidente_Prudente category: Car -->
<trk>
<name><![CDATA[Presidente_Prudente]]></name>
<trkseg>
<trkpt lat="-22.12228" lon="-51.40727"><ele>436</ele><time>2018-12-04T23:41:54.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12227" lon="-51.40726"><ele>437</ele><time>2018-12-04T23:42:00.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12226" lon="-51.40726"><ele>438</ele><time>2018-12-04T23:42:10.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12226" lon="-51.40727"><ele>438</ele><time>2018-12-04T23:42:11.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12226" lon="-51.40729"><ele>438</ele><time>2018-12-04T23:42:13.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12226" lon="-51.40731"><ele>438</ele><time>2018-12-04T23:42:14.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12226" lon="-51.40732"><ele>439</ele><time>2018-12-04T23:42:15.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12227" lon="-51.40734"><ele>439</ele><time>2018-12-04T23:42:16.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12227" lon="-51.40735"><ele>439</ele><time>2018-12-04T23:42:17.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12228" lon="-51.40737"><ele>439</ele><time>2018-12-04T23:42:18.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12229" lon="-51.40738"><ele>439</ele><time>2018-12-04T23:42:19.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12231" lon="-51.40739"><ele>439</ele><time>2018-12-04T23:42:20.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12232" lon="-51.40740"><ele>439</ele><time>2018-12-04T23:42:21.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12234" lon="-51.40740"><ele>439</ele><time>2018-12-04T23:42:22.000Z</time>
<trkpt lat="-22.12236" lon="-51.40741"><ele>439</ele><time>2018-12-04T23:42:23.000Z</time>
```

Fonte: Aplicativo Ultra GPS Logger (2021).

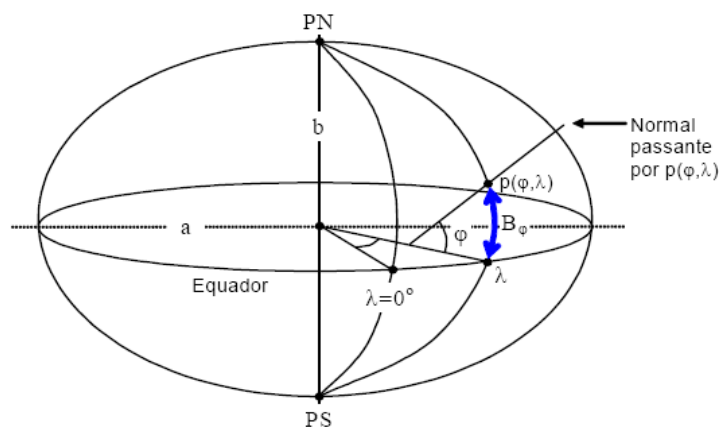
2.4. Transformações entre sistemas de coordenadas

2.4.1. Transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas na projeção UTM

Dentre os tipos de transformações de coordenadas, uma possibilidade é transformar as coordenadas curvilíneas ou geodésicas (φ, λ) , em coordenadas de uma projeção. Nesta pesquisa, optou-se por utilizar o sistema de projeção UTM, visto que é o sistema comumente empregado no levantamento sistemático brasileiro, além do fato que os dados de referência estão associados a esta projeção, evitando a necessidade de transformações adicionais entre sistemas de projeção.

A projeção UTM é um sistema modificado da projeção TM (Transversa de Mercator) (BLACHUT, 1979). A transformação não pode ser realizada diretamente, mas todo o processo é dividido em duas etapas: transformação das coordenadas geodésicas em TM, na qual é necessário calcular comprimento de arco de meridiano (Figura 11); e por fim a transformação das coordenadas TM em UTM (BLACHUT, 1979).

Figura 11 - Comprimento do arco de meridiano B_φ em um ponto genérico p de coordenadas geodésicas $p(\varphi, \lambda)$.



Fonte: Galo (2017).

Para o cálculo do comprimento de arco de meridiano (B_φ) entre um ponto de latitude φ e o Equador (Figura 11), considera-se a formulação apresentada por Blachut (1979) (Equação 1).

$$B_\varphi = A_0 c \varphi - A_1 c \sin \varphi \cos \varphi (1 + A_2 \sin^2 \varphi + A_4 \sin^4 \varphi + A_6 \sin^6 \varphi + A_8 \sin^8 \varphi) \quad (1)$$

em que: c é o raio polar de curvatura ($c = a^2/b$); a é o semieixo maior do elipsóide; e b é o semieixo menor do elipsóide.

Sendo e' a segunda excentricidade, calculada por $e'^2 = (a^2 - b^2) / b^2$, pode-se obter os coeficientes $A_0, A_1, A_2 \dots A_8$, por meio das Equações 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

$$A_0 = 1 - \frac{3}{4}e'^2 \left\{ 1 - \frac{15}{16}e'^2 \left[1 - \frac{35}{36}e'^2 \left(1 - \frac{63}{64}e'^2 \left(1 - \frac{99}{100}e'^2 \right) \right) \right] \right\} \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{3}{4}e'^2 \left\{ 1 - \frac{25}{16}e'^2 \left[1 - \frac{77}{60}e'^2 \left(1 - \frac{387}{704}e'^2 \left(1 - \frac{2123}{1860}e'^2 \right) \right) \right] \right\} \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{5}{8}e'^2 \left\{ 1 - \frac{139}{144}e'^2 \left[1 - \frac{1087}{1112}e'^2 \left(1 - \frac{513\,427}{521\,760}e'^2 \right) \right] \right\} \quad (4)$$

$$A_4 = \frac{35}{72}e'^4 \left\{ 1 - \frac{125}{64}e'^2 \left(1 - \frac{221\,069}{150\,000}e'^2 \right) \right\} \quad (5)$$

$$A_6 = \frac{105}{256}e'^6 \left(1 - \frac{1179}{400}e'^2 \right) \quad (6)$$

$$A_8 = \frac{231}{640}e'^8 \quad (7)$$

Para o cálculo das coordenadas na projeção TM de um ponto genérico $p(\varphi, \lambda)$, situado em um fuso cujo meridiano central seja λ_0 , utilizam-se as Equações 8 e 9.

$$x = B_\varphi + a_2\Delta\lambda^2 + a_4\Delta\lambda^4 + a_6\Delta\lambda^6 + \dots \quad (8)$$

$$y = a_1\Delta\lambda + a_3\Delta\lambda^3 + a_5\Delta\lambda^5 + \dots \quad (9)$$

em que: B_φ é o arco de meridiano que vai do equador ao ponto de latitude φ ; λ é a longitude do ponto de interesse; λ_0 é a longitude do meridiano central do fuso; $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$; e $a_1, a_2, \dots, a_6$ são os coeficientes determinados em função de φ e de parâmetros do elipsóide que podem ser calculados pelas Equações 10, 11, 12, 13, 14 e 15.

$$a_1 = c \left[\left(\frac{1}{\cos \varphi} \right)^2 + e'^2 \right]^{-1/2} \quad (10)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} a_1 \sin \varphi \quad (11)$$

$$a_3 = \frac{1}{6} a_1 (-1 + 2 \cos \varphi^2 + e'^2 \cos \varphi^4) \quad (12)$$

$$a_4 = \frac{1}{12} a_2 (-1 + 6 \cos \varphi^2 + 9 e'^2 \cos \varphi^4 + 4 e'^4 \cos \varphi^6) \quad (13)$$

$$a_5 = \frac{1}{120} a_1 (1 - 20 \cos \varphi^2 + (24 - 58e'^2) \cos \varphi^4 + 72 e'^2 \cos \varphi^6 + \dots) \quad (14)$$

$$a_6 = \frac{1}{360} a_2 (1 - 60 \cos \varphi^2 + 120 \cos \varphi^4 + \dots) \quad (15)$$

Considerando as Equações (8) e (9) do sistema TM, podem-se calcular as coordenadas UTM para o hemisfério norte e sul por meio das Equações 16 e 17, respectivamente.

$$N = 0,9996 x \quad E = 500.000 \text{ m} + 0,9996 y \quad (16)$$

$$N = 10.000.000 \text{ m} + 0,9996 x \quad E = 500.000 \text{ m} + 0,9996 y \quad (17)$$

em que 0,9996 é igual a $1 - \frac{1}{2500}$, que corresponde ao fator de escala (redução) no meridiano central (λ_0) do fuso UTM.

2.4.2. Transformação de coordenadas da projeção UTM em coordenadas do sistema imagem

Uma transformação geométrica composta por translação, reflexão e escala capaz de associar os pontos do sistema de coordenadas de terreno (N, E) com o sistema de coordenadas da imagem (coluna (C), linha (L)) será realizada (FAZAN, 2007). Para geração da imagem de frequência de trajetórias é necessário realizar os procedimentos descritos a seguir.

Primeiramente, deve-se definir a resolução da imagem, ou seja, a dimensão do pixel (GSD – *Ground Sample Distance*). Em seguida é necessário calcular a máxima variação espacial ocupada pela região que a imagem abrange (dE , dN) (Equações 18 e 19).

$$dE = E_{max} - E_{min} \quad (18)$$

$$dN = N_{max} - N_{min} \quad (19)$$

em que: E_{min} e E_{max} são os valores mínimo e máximo para a componente E, respectivamente; e N_{min} e N_{max} são os valores mínimo e máximo para a componente N, respectivamente.

Posteriormente deve-se determinar o número de linhas (h) e colunas (w) da imagem, por meio das Equações 20 e 21, e por fim calcular a posição dos elementos no sistema de coordenadas imagem (C, L), de modo que a origem do mesmo (0,0) corresponda ao centro do pixel superior esquerdo, utilizando as Equações 22 e 23.

$$h = \frac{dN}{GSD} \quad (20)$$

$$w = \frac{dE}{GSD} \quad (21)$$

$$C = \frac{E - E_{min}}{GSD} \quad (22)$$

$$L = \frac{N_{max} - N}{GSD} \quad (23)$$

Por fim, para melhor visualização da imagem é necessário realizar a normalização das frequências no intervalo $[0; 255]$, visto que será gerada uma imagem de 8 *bits*, pois pixels com menores valores frequências tendem a não serem detectados devido ao baixo contraste. Assim, a posição (C, L) calculada anteriormente, receberá o valor de brilho dado pela Equação 24.

$$ND = \frac{255}{F_{max} - F_{min}} (F - F_{min}) \quad (24)$$

em que: F é a frequência de pontos acumulada na posição (C, L); F_{min} e F_{max} são, respectivamente, as frequências mínima e máxima dentre todos os pixels que compõem a imagem gerada.

Vale ressaltar que a transformação geométrica apresentada nessa Subseção admite a transformação inversa, que será fundamental para comparar os dados advindos da extração subpixel com os dados de referência, para análise de qualidade dos resultados.

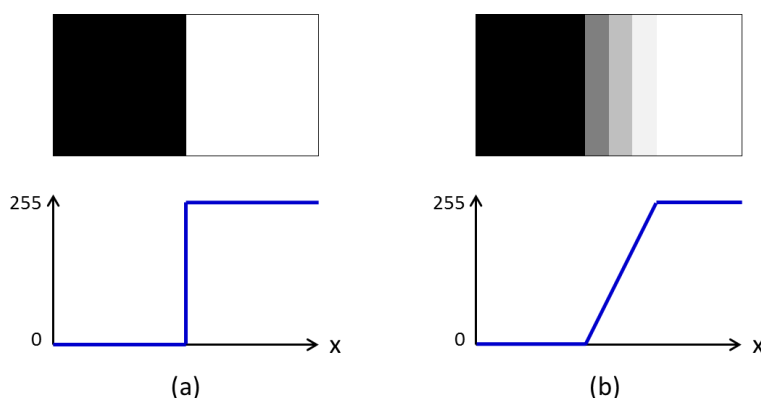
2.5. Detecção de bordas e linhas em imagens

A detecção automática de linhas e bordas em imagens digitais é um dos principais processos para a reconstrução de feições cartográficas para fins de mapeamento: rodovias, estradas, vias, rios, telhados, contornos de edifícios, entre outras.

Uma borda pode ser definida como o limite entre duas regiões com diferentes níveis de cinza, ou seja, áreas com características radiométricas distintas (GONZALEZ e

WOODS³, 2000 *apud* ISHIBASHI, 2008), sendo esse limite geralmente representado por um perfil do tipo degrau, com variação abrupta (Figura 12a) ou suave (Figura 12b) dos níveis de cinza, sendo o último mais comum devido ao borramento inerente ao processo de amostragem.

Figura 12 - Representação de bordas com perfil do tipo degrau: (a) variação abrupta dos níveis de cinza; e (b) variação suave dos níveis de cinza.



Fonte: O autor (2021).

De modo geral, a detecção de bordas em uma imagem pode ser realizada através da aplicação de máscaras direcionais, também conhecidas como filtro do tipo passa alta, bem como a partir da derivação espacial (primeira e segunda derivada parcial) (GONZALEZ e WOODS, 2000 *apud* ISHIBASHI, 2008). A Figura 13a apresenta uma borda formada pela suave transição entre uma região escura e uma região clara, que corresponde ao perfil ilustrado na Figura 13b.

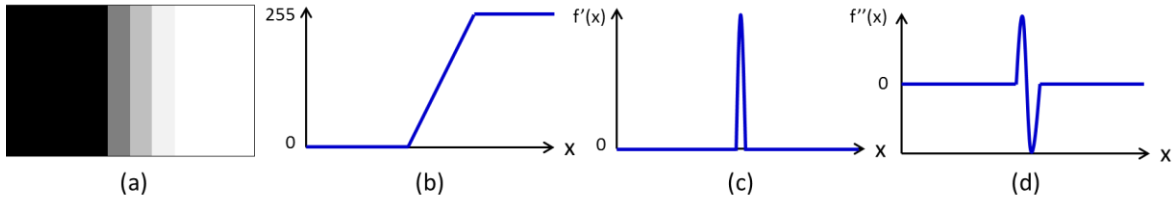
A partir da Figura 13c observa-se que a primeira derivada do perfil é nula nas regiões com nível de cinza constante, e na região de transição (borda) se caracteriza com um ponto de máximo (valor positivo). Ressalta-se que no exemplo apresentado a primeira derivada localiza um ponto de máximo, pois se trata de uma transição de uma região escura para uma região clara, se fosse ao contrário a primeira derivada identificaria um ponto de mínimo (valor negativo).

Em relação à segunda derivada do perfil, verifica-se que a mesma é positiva na região de transição escura, e negativa na região de transição clara, sendo nula nas demais regiões (Figura 13d). Logo, as bordas presentes em uma imagem podem ser detectadas por

³ GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Processamento de imagens digitais*. São Paulo, Editora Blucher, 2000.

meio dos pontos de máximo e mínimo da primeira derivada e os valores nulos da segunda derivada (GONZALEZ e WOODS, 2000 *apud* ISHIBASHI, 2008).

Figura 13 - Detecção de bordas através da técnica de derivação espacial: (a) Borda do tipo degrau com variação suave dos níveis de cinza; (b) Perfil representativo da borda; (c) Comportamento da primeira derivada; e (d) Comportamento da segunda derivada.



Fonte: O autor (2021).

Ao considerar uma imagem $Z(x, y)$, a primeira derivada em qualquer ponto (x, y) da mesma é obtida por meio do vetor gradiente (Equação 25), sendo sua magnitude dada pela Equação 26 e sua direção pela Equação 27, enquanto que a segunda derivada é determinada através do laplaciano (Equação 28), ou a partir da segunda derivada na direção do gradiente.

$$\nabla Z = \text{grad}(Z) = [G_x \ G_y]^T = \left[\frac{\partial Z}{\partial x} \quad \frac{\partial Z}{\partial y} \right]^T \quad (25)$$

em que: G_x e G_y são máscaras que quantificam o gradiente da imagem nas direções ortogonais x e y .

$$M(x, y) = \text{mag}(\nabla Z) = \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (26)$$

$$a(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (27)$$

$$\nabla^2 Z = \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \quad (28)$$

A seguir será apresentada uma breve revisão dos métodos de detecção de bordas e linhas em imagens digitais, sendo enfatizado o detector de linhas de Steger, visto que o mesmo foi selecionado para ser aplicado nesta pesquisa.

2.5.1. Detector de bordas de Sobel

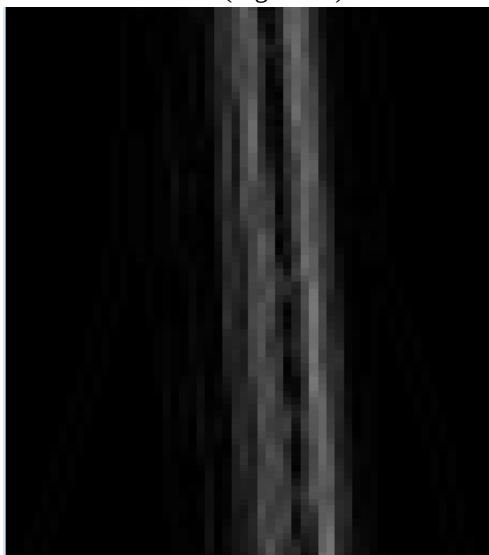
O detector de bordas de Sobel consiste na convolução da imagem com duas máscaras direcionais de dimensão 3 x 3, uma na direção x (Equação 29) e outra na direção y (Equação 30), detectando assim bordas na vertical e na horizontal, respectivamente. O detector de Sobel é uma forma de aproximar a operação de diferenciação, ou seja, a estimativa do vetor gradiente.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

A Figura 14 apresenta o resultado da aplicação do detector de bordas de Sobel sobre uma imagem de frequência de trajetórias GNSS (Figura 2d). A partir do resultado verifica-se que as bordas detectadas não são bem definidas, característica que ocorre devido à variação abrupta nas frequências determinadas na geração da imagem, bem como pela simplicidade do detector de Sobel, diferentemente do detector de linhas de Steger, que possui um núcleo gaussiano responsável por suavizar a imagem. Logo, o detector de Sobel não é adequado para aplicações que envolvam a utilização de imagens de frequência.

Figura 14 - Resultado da aplicação do detector de bordas de Sobel em uma imagem de frequência de trajetórias GNSS (Figura 2d).



Fonte: O autor (2021).

2.5.2. Detector de bordas de Canny

O detector de bordas de Canny (CANNY, 1986) foi desenvolvido com a finalidade de detectar o tipo de borda mais comum em imagens digitais, ou seja, bordas do tipo degrau. Além disso, o detector de Canny determina bordas com largura de um pixel, por meio do processo de afinamento de bordas denominado de supressão não máxima. O algoritmo se baseia em três critérios, sendo:

- Taxa de erro: responsável pela maximização da SNR (*Signal to Noise Ratio*), pois quanto maior for a SNR, maior a chance de se detectar as bordas verdadeiras;
- Localização: relacionado com a minimização da distância entre os pontos extraídos e suas respectivas posições verdadeiras; e
- Injunção de resposta múltipla: trata-se de uma injunção para que apenas uma borda seja detectada, onde há uma borda verdadeira.

Segundo Vale e Dal Poz (2002) o detector de bordas de Canny executa as seguintes etapas:

1. Leitura da imagem (I), na qual as bordas serão detectadas;
2. Criação de uma máscara gaussiana bidimensional (G) para suavização de I , obtendo assim I_s ;
3. Criação das máscaras direcionais G_x e G_y , para diferenciação da imagem suavizada nas direções x (linha) e y (coluna);
4. Convolução de I_s com G_x e G_y , obtendo, respectivamente, as imagens I_x e I_y ;
5. Cálculo da magnitude em cada pixel (x,y) por meio da Equação 31;

$$M(x, y) = \sqrt{I_x(x, y)^2 + I_y(x, y)^2} \quad (31)$$

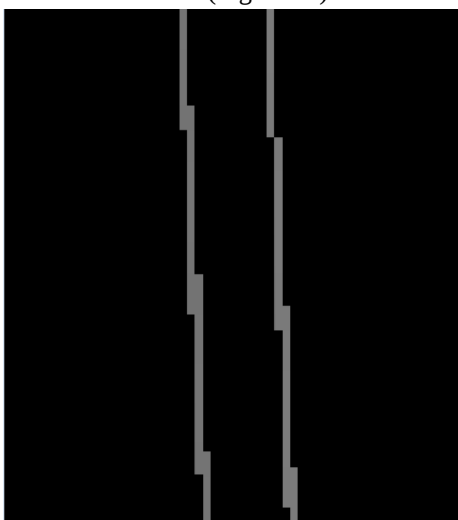
6. Afinamento das bordas por meio do algoritmo de supressão não máxima, que seleciona o pixel que possui o maior valor de magnitude do gradiente em uma seção perpendicular a borda; e

7. Aplicação do algoritmo de histerese (limiares τ_1 e τ_2), responsável por complementar as bordas fragmentadas, bem como minimizar a presença bordas geradas devido aos ruídos da imagem.

A Figura 15 apresenta o resultado da aplicação do detector de bordas de Canny sobre uma imagem de frequência de trajetórias GNSS (Figura 2d). Diferentemente do resultado obtido com o detector de Sobel (Figura 14), o detector de Canny determinou de forma bem definida as bordas da rodovia, com espessura de um *pixel*. Essa melhora na extração é esperada, dado os critérios empregados pelo algoritmo, conforme apresentado anteriormente.

Apesar das bordas serem detectadas de forma bem definida, se deve lembrar que em uma imagem de frequência a espessura da rodovia não corresponde aos limites reais da mesma, visto que se trata de uma estimativa. Portanto, as bordas detectadas podem não representar fielmente as bordas reais, presentes em uma imagem óptica. Assim, a melhor solução é considerar o eixo da rodovia, que corresponde ao pico do histograma transversal (Figura 1).

Figura 15 - Resultado da aplicação do detector de bordas de Canny em uma imagem de frequência de trajetórias GNSS (Figura 2d).



Fonte: O autor (2021).

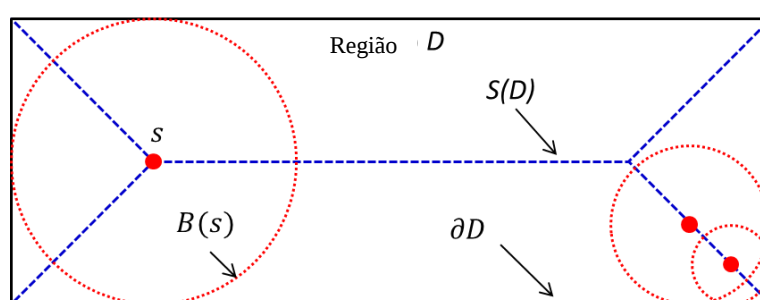
2.5.3. Esqueletização de regiões

A técnica de esqueletização de regiões é frequentemente utilizada para extração de feições alongadas, tal como rodovias (BIAGIONI e ERIKSSON, 2012). Segundo Mendes (2012) a esqueletização ou Transformada do Eixo Médio (TEM) é um procedimento que visa

determinar um conjunto de pontos no interior de um objeto, com a finalidade de representar o mesmo a partir de uma cadeia de *pixels* de largura unitária.

O eixo médio de uma região (D) corresponde ao conjunto dos centros (s) de círculos máximos inscritos na mesma ($B(s)$), sendo que estes círculos devem tangenciar em ao menos dois pontos distintos da forma (∂D) (MENDES, 2012; ZANIN, 2012). A Figura 16 apresenta o esqueleto ($S(D)$) da região, de acordo com o critério da TEM, proposta por Blum (1967).

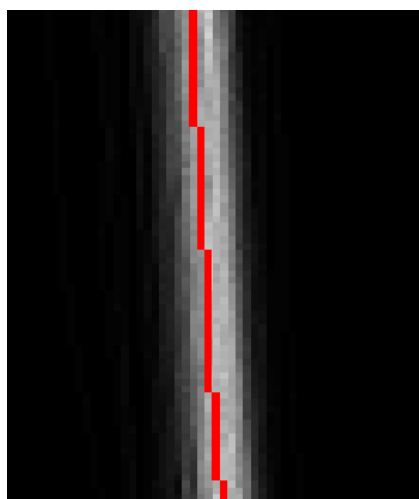
Figura 16 - Método de esqueletização de uma região pela Transformada do Eixo Médio.



Fonte: Adaptado de Zanin (2012).

A Figura 17 apresenta o resultado da aplicação da técnica de esqueletização pela Transformada do Eixo Médio sobre uma imagem de frequência de trajetórias GNSS (Figura 2d). Observa-se um resultado consistente, no entanto, essa metodologia já foi executada por Biagioni e Eriksson (2012), bem como por outros autores, sendo a mesma bem avaliada.

Figura 17 - Resultado da aplicação do método de esqueletização em uma imagem de frequência de trajetórias GNSS.



Fonte: O autor (2021).

2.5.4. Detector de linhas de Steger

O detector de linhas de Steger (STEGER, 1996; STEGER, 1997; STEGER, 1998; STEGER, 2000) é muito utilizado na área da Visão Computacional e Fotogrametria Digital, visto que pode ser aplicado em um dos mais importantes processos dessas áreas, sendo este a detecção de linhas, imprescindível para a extração de feições cartográficas lineares como rodovias, estradas e rios (STEGER, 1997; ZANIN *et al.*, 2007; MARTINS, 2017). Segundo Steger (1997) o algoritmo é capaz de extrair linhas com precisão subpixel, podendo alcançar até 1/50 do pixel (MVTec, 2020).

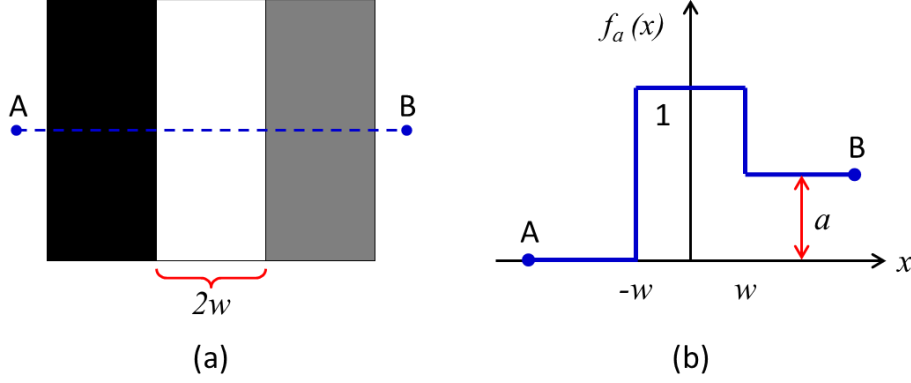
De acordo com Steger (1997) os métodos de detecção de linhas em imagens podem ser classificados em duas categorias. A primeira abordagem considera linhas como objetos de bordas paralelas, na qual a extração é realizada a partir de combinação de dois filtros de bordas, e a segunda abordagem considera a imagem como uma função $z(x, y)$, sendo as linhas extraídas a partir da localização dos pontos de máximo e de mínimo a partir da derivação dessa função (STEGER, 1997).

Zanin *et al.* (2007) realizaram um estudo do potencial de aplicação do detector de linhas de Steger no processo de extração de rodovias, utilizando-se de diferentes imagens. Ishibashi (2008) utilizou o detector de linhas de Steger para a extração de rodovias em imagens de diferentes resoluções, enfatizando a determinação automática dos limiares de histerese e do fator de escala gaussiano. Martins (2017) utilizou o detector de linhas de Steger em uma das etapas do processo de refinamento da malha rodoviária, com a finalidade de atualizar bases cartográficas.

O detector de linhas de Steger se baseia no modelo de linha ideal de espessura $2w$ e altura 1 , com bordas de mesma polaridade e diferentes contrastes (Figura 18a), possui um perfil do tipo barra (Figura 18b), conforme apresentado pela Equação 32, sendo $a \in [0, 1]$ (STEGER, 1998).

Para o caso unidimensional (1D) a detecção de linhas com o perfil dado pela Equação 32 em uma imagem $z(x)$ sem ruídos, ocorre por meio da determinação do ponto onde a primeira derivada de $z(x)$ se anula. Para detectar apenas as linhas mais salientes, deve-se utilizar o valor de magnitude da segunda derivada de $z(x)$ no ponto onde a primeira derivada de $z(x)$ assume o valor zero. As linhas mais salientes são aquelas que $z''(x) \ll 0$ e $z''(x) \gg 0$, para linhas claras e escuras, respectivamente (STEGER, 1998).

Figura 18 – Modelo de linha com diferentes contrastes: (a) Perfil AB perpendicular à linha ($2w, 1$); (b) Comportamento do perfil.



Fonte: Adaptado de Martins (2017).

$$f_a(x) = \begin{cases} 0, & x < -w \\ 1, & |x| \leq w \\ a, & x > w \end{cases} \quad (32)$$

No entanto, as imagens geralmente não são isentas de ruídos, o que torna o método descrito anteriormente insuficiente, sendo necessário estimar a primeira e a segunda derivada de $z(x)$ por meio da convolução da imagem com as derivadas do núcleo gaussiano, com desvio-padrão σ (Equações 33, 34 e 35), conduzindo a uma descrição através do espaço-escala do perfil linha, dado pelas Equações 36, 37 e 38 (STEGGER, 1998).

$$g_\sigma(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (33)$$

$$g'_\sigma(x) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (34)$$

$$g''_\sigma(x) = \frac{x^2 - \sigma^2}{\sqrt{2\pi}\sigma^5} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (35)$$

$$r_a(x; \sigma; w; a) = g_\sigma * f_a(x) = \phi_\sigma(x + w) + (a - 1)\phi_\sigma(x - w) \quad (36)$$

$$r'_a(x; \sigma; w; a) = g'_\sigma * f_a(x) = g'_\sigma(x + w) + (a - 1)g'_\sigma(x - w) \quad (37)$$

$$r''_a(x; \sigma; w; a) = g''_\sigma * f_a(x) = g''_\sigma(x + w) + (a - 1)g''_\sigma(x - w) \quad (38)$$

em que: $\phi_\sigma(x)$ é a integral do núcleo gaussiano, definida pela Equação 39 (STEGGER, 1998).

$$\phi_{\sigma}(x) = \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \quad (39)$$

Deste modo, a posição da linha é dada pelo ponto de máximo ou mínimo - para linhas claras e escuras, respectivamente - de $r_a(x; \sigma; w; a)$, onde $r'_a(x; \sigma; w; a) = 0$. Steger (1998) propõe uma maneira de estimar o desvio-padrão σ , dado pela solução de $\frac{\partial}{\partial \sigma}(r''_a(0; \sigma; w; a)) = 0$, com a finalidade de preservar a integridade das linhas de maior importância (Condição 40). No caso 1D a posição ideal (x) da linha é determinada pela Equação 41, onde $r'_a(x; \sigma; w; a) = 0$, a qual mostra claramente que a linha será extraída na posição correta ($x = 0$) somente se os contrastes laterais forem iguais, isto é, $a = 0$ (STEGGER, 1998).

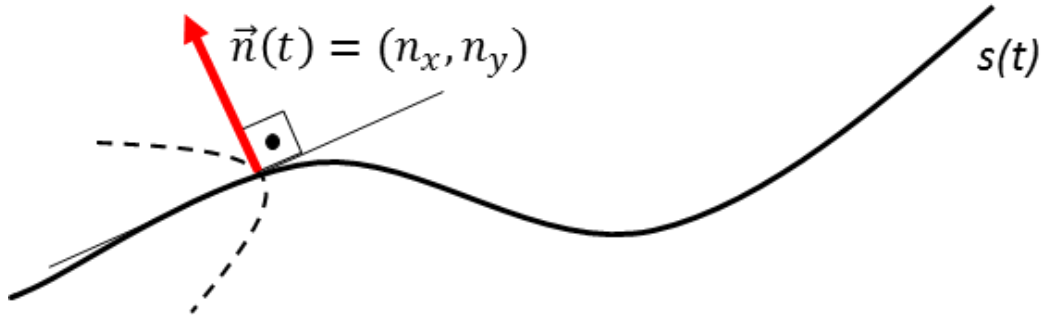
$$\sigma \geq \frac{w}{\sqrt{3}} \quad (40)$$

$$x = -\frac{\sigma^2}{2w} \ln(1 - a) \quad (41)$$

No entanto, a maioria das feições do tipo linha apresentam contrastes diferentes, ou seja, $a \neq 0$, conforme o modelo de linha assimétrico apresentado anteriormente, logo a linha será detectada na posição errada, seguindo uma tendência para o lado de menor gradiente (STEGGER, 1998).

Porém, a partir da Equação 41, supondo que sejam conhecidos os valores de w e a para cada um dos pontos da linha, é possível remover essa tendência por meio de uma solução por métodos numéricos, visto que as equações não podem ser resolvidas analiticamente (STEGGER, 1998). Esta correção é implementada no detector de linhas de Steger.

Para o caso bidimensional (2D), as linhas podem ser modeladas como uma curva paramétrica $s(t)$ (Figura 19), que na direção transversal possui um comportamento parecido ao perfil unidimensional referente à Equação 32 ($f_a(x)$). Logo, podem-se extrair pontos de linhas no espaço bidimensional utilizando a primeira derivada direcional na direção do vetor normal $\vec{n}(t)$. A direção de $\vec{n}(t)$ pode ser determinada por meio do autovetor correspondente ao autovalor de maior magnitude da matriz Hessiana (Equação 42) da imagem suavizada (STEGGER, 1998).

Figura 19 - Curva paramétrica $s(t)$.

Fonte: Adaptado de Mendes e Dal Poz (2011).

$$H(x, y) = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{pmatrix} \quad (42)$$

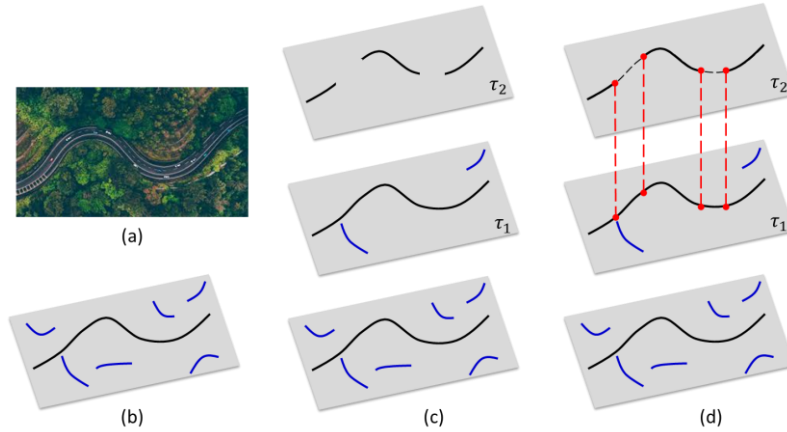
em que: r_{xx} e r_{yy} são as derivadas de segunda ordem em relação às direções x e y , respectivamente; e r_{xy} e r_{yx} são as derivadas mistas.

De modo geral, quando se trabalha com o detector de linhas de Steger, três parâmetros devem ser selecionados para execução do algoritmo, sendo estes: o fator de escala gaussiano (σ); e os limiares de histerese inferior (τ_1) e superior (τ_2).

A escolha do fator de escala gaussiano esta diretamente relacionada com a espessura (em pixels) da linha que se deseja extrair da imagem, sendo que o mesmo pode ser facilmente estimado por meio da Equação 40, para uma dada largura de rodovia. O valor calculado ou adotado para σ será utilizado para realizar a convolução da máscara gaussiana sobre a imagem, sendo que essa atua como um filtro do tipo passa-baixa, ou seja, responsável por suavizar a imagem de modo a eliminar pequenos ruídos que tendem a serem confundidos com as feições de interesse, no caso rodovias (ISHIBASHI, 2008).

Durante o processo de extração de linhas de uma imagem aérea, orbital (Figura 20a) ou de frequências, os limiares de histerese inferior e superior possuem a função de descartar partes de linhas de pequeno comprimento durante a extração (Figura 20b) (ISHIBASHI, 2008). O parâmetro τ_2 é responsável pela manutenção das linhas de maior importância, ou seja, as linhas físicas que representam feições do mundo real, contribuindo para minimizar as linhas que caracterizam ruídos do processo de extração (Figura 20c) (ISHIBASHI, 2008). O parâmetro τ_1 é responsável por complementar as linhas físicas detectadas pelo limiar de histerese superior, visto que as continuidades das mesmas são encontradas no plano inferior (Figura 20d) (ISHIBASHI, 2008).

Figura 20 - Limiares de histerese no processo de detecção de linhas por Steger: (a) Imagem aérea ou orbital de interesse; (b) Linhas extraídas de acordo com σ selecionado (na cor azul: fragmento de linhas espúrias; em preto: linha que representa a rodovia); (c) Segmentos de linhas retidas nos planos correspondentes aos limiares de histerese inferior (τ_1) e superior (τ_2); (d) Complementação dos segmentos no plano τ_2 por meio de busca no plano τ_1 .



Fonte: O autor (2021).

Segundo Ishibashi (2008), os limiares de histerese estão relacionados com a segunda derivada da imagem, logo são dependentes dos contrastes laterais e da largura da linha de interesse, sendo que quanto maior o valor de sigma, menor é o valor da segunda derivada, portanto valores menores para os parâmetros de histerese são necessários.

2.6. Análise de Qualidade

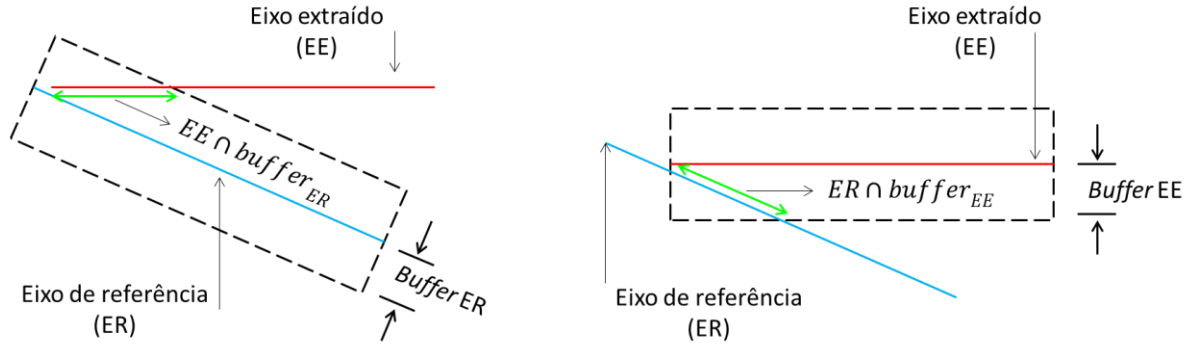
A análise de qualidade dos resultados será baseada em Wiedemann *et al.* (1998), especificamente por meio dos índices de completeza, correção e RMSE. Estes índices serão utilizados para avaliar a qualidade da extração automática dois eixos das vias.

Detalhadamente, a completeza quantifica a porcentagem de eixo rodoviário que foi extraído (EE) pelo método, enquanto que a correção estima o quanto do eixo rodoviário que foi extraído está correto, ambos em relação ao eixo de referência (ER). As Equações 43 e 44 possibilitam o cálculo dos índices de completeza e correção, respectivamente (WIEDEMANN, 1998). A Figura 21 ilustra esquematicamente a interpretação geométrica de cada um dos índices.

$$Completeza = \frac{\text{Comprimento } (ER \cap buffer_{EE})}{\text{Comprimento } (ER)} \in [0; 1] \quad (43)$$

$$Correção = \frac{\text{Comprimento } (EE \cap \text{buffer}_{ER})}{\text{Comprimento } (EE)} \in [0; 1] \quad (44)$$

Figura 21 - Esquematisação dos índices de completeza e correção para o eixo extraído de rodovias.



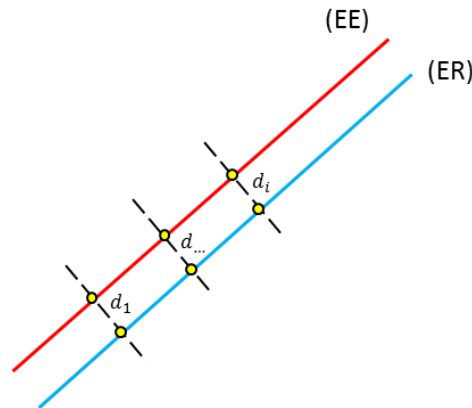
Fonte: Adaptado de Wiedemann *et al.* (1998).

O RMSE é uma medida de exatidão geométrica, ou seja, fornece a acurácia do eixo rodoviário extraído. Este indicador é calculado em função das distâncias entre o eixo de referência e o eixo extraído, sendo necessário realizar uma segmentação em ambos, possibilitando assim o cálculo das discrepâncias (Figura 22) (Equação 45).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (45)$$

em que: d_i é a distância perpendicular entre o eixo de referência e o eixo extraído; e n é o número total de pontos utilizados para segmentação, de forma perpendicular, dos eixos. Ressalta-se que neste trabalho a segmentação foi de um em um metro.

Figura 22 - Metodologia adotada para o cálculo do RMSE.



Fonte: O autor (2021).

Para a avaliação geométrica dos resultados Biagioni e Eriksson (2012) utilizaram as métricas *Recall* (Equação 46), *Precision* (Equação 47) e *F-score* (Equação 48) (LIU *et al.*, 2012). Assim, o experimento IV é avaliado em função dessas métricas, diferentemente dos experimentos I, II, e III. Ressalta-se que a métrica *Recall* indica a proporção dos eixos extraídos corretamente, enquanto que a métrica *Precision* possibilita avaliar a qualidade do que foi extraído. A métrica *F-score* é a média harmônica das métricas *Recall* e *Precision*, sendo esta capaz de resumir a qualidade geral da extração (LIU *et al.*, 2012).

$$Recall = \frac{TP}{\|Truth\|} \quad (46)$$

$$Precision = \frac{TP}{\|M\|} \quad (47)$$

$$F - score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (48)$$

em que: *TP* (*True Positive*) é o comprimento total da intersecção entre o eixo extraído com o *buffer* do eixo de referência; e $\|Truth\|$ e $\|M\|$ são, respectivamente, o comprimento do eixo de referência (ER) e do eixo extraído (EE).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

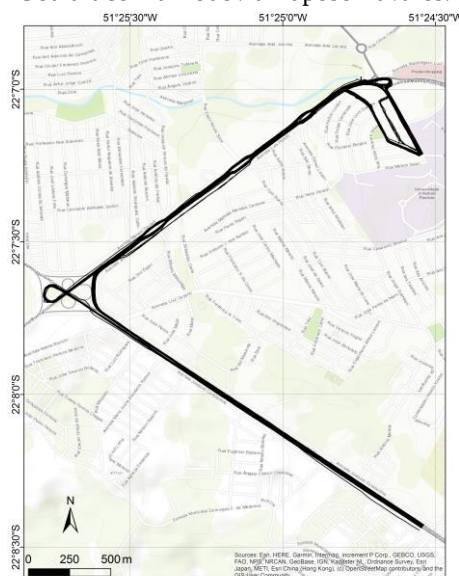
Nesta Seção é descrita a área de estudo, bem como os materiais utilizados para realização desta pesquisa, sendo estes divididos em dados (Subseção 3.1) e recursos de *software* e *hardware* (Subseção 3.2). Também é apresentada a metodologia aplicada na realização dos experimentos (Subseção 3.3).

3.1. Área de estudo e dados

Para a realização dos experimentos desse projeto, utilizou-se como dados principais arquivos de trajetórias GNSS no formato GPX, obtidos via coleta realizada pelo autor e colaboradores, através dos aplicativos para *smartphone* *Ultra GPS Logger* e *GPS Logger*.

No total foram coletadas e armazenadas 500 trajetórias GNSS durante dezembro de 2018 e março de 2020. A região recoberta pelos dados rastreados faz parte dos municípios de Presidente Prudente-SP, Regente Feijó-SP e Indiana-SP, o que corresponde a cerca de 70 km de rodovias (simples e duplas) e vias urbanas. Esse conjunto coletado foi subdividido em três áreas de estudo, culminando em três experimentos distintos. A área de estudo do primeiro experimento contém vias de faixas simples, dupla e tripla, em região urbana (próximo a FCT-UNESP) e não urbana (Figura 23).

Figura 23 - Trajetórias GNSS e área de estudo referente ao primeiro experimento: trecho da Avenida Manoel Goulart com a Rodovia Raposo Tavares.

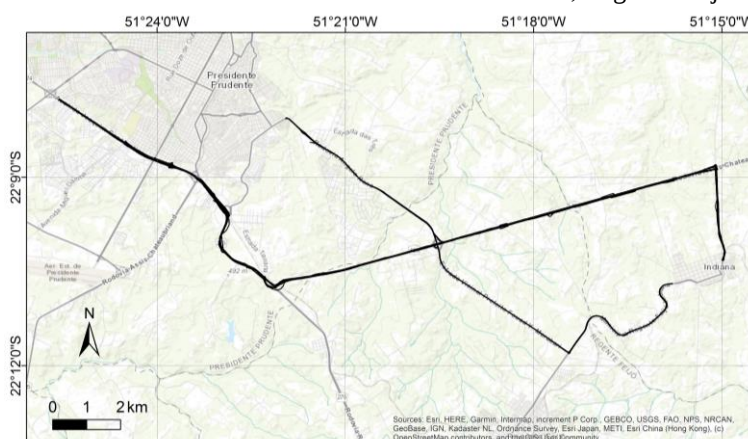


Fonte: O autor (2021).

As trajetórias foram adquiridas com o intervalo mínimo de coleta disponível pelos dispositivos, no caso 1 segundo, de modo a obter um melhor detalhamento geométrico das vias percorridas. Além disso, ressalta-se que a velocidade média do veículo durante a coleta foi de 90 km/h em áreas rurais e de 30 km/h em áreas urbanas.

O segundo subconjunto de trajetórias GNSS (Figura 24) é formado por rodovias de faixa simples e dupla, sendo essas responsáveis pelo acesso entre os municípios de Presidente Prudente, Regente Feijó e Indiana. A área de estudo do terceiro experimento contém as trajetórias rastreadas apenas na área urbana de Indiana-SP (Figura 25).

Figura 24 - Trajetórias GNSS e área de estudo referente ao segundo experimento: trechos de rodovias que permitem o acesso entre as cidades de Presidente Prudente, Regente Feijó e Indiana.



Fonte: O autor (2021).

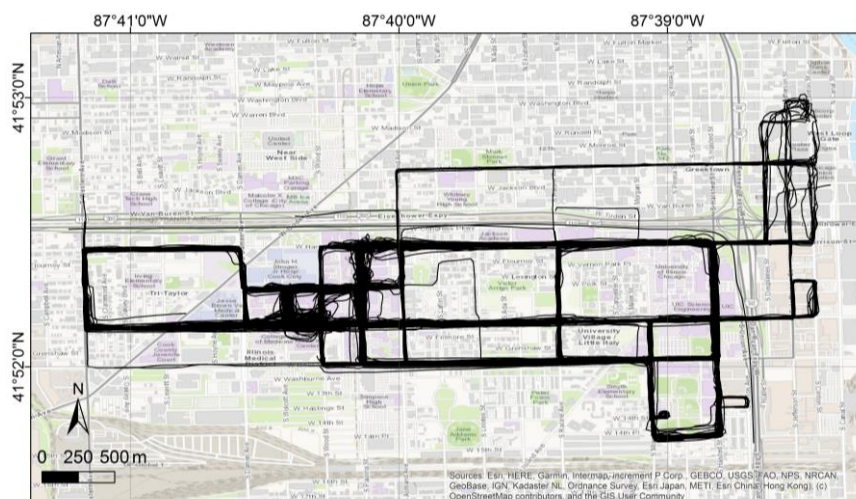
Figura 25 - Trajetórias GNSS e área de estudo referente ao terceiro experimento: área urbana do município de Indiana-SP.



Fonte: O autor (2021).

Além dos dados adquiridos, também foi utilizado um *dataset* de trajetórias GNSS disponibilizado pela Universidade de Illinois (Campus de Chicago), utilizado por Biagioni e Eriksson (2012), bem como em diversos trabalhos presente na literatura (HUANG *et al.*, 2018; XIE *et al.*, 2017; AHMED *et al.*, 2015) (Figura 26). As trajetórias GNSS foram coletadas a partir do receptor GPS de 13 ônibus universitários (Disponível para *download* em: <https://www.cs.uic.edu/bin/view/Bits/Software>). Além do conjunto de dados, são disponibilizados os dados de referência, sendo estes vetores originários do projeto *OpenStreetMap*.

Figura 26 - Trajetórias GNSS e área de estudo referente ao quarto experimento: *dataset* de trajetórias adquiridas a partir de ônibus escolares na cidade de Chicago, Illinois/EUA.



Fonte: O autor (2021).

O Quadro 1 resume as especificações dos conjuntos de dados utilizados para a realização dos experimentos presentes neste trabalho.

Quadro 1 - Resumo das especificações das áreas de estudo e dos conjuntos de dados utilizados.

Experimento	Nº de trajetórias	Nº de pontos originais	Comprimento (km)	Área (km²)	Velocidade média (km/h)	Taxa de coleta (s)
I	182	64.400	12,57	5,89	60	1,0
II	490	385.341	69,35	136,27	90	1,0
III	490	78.816	10,33	1,87	30	1,0
IV	889	118.364	34,76	9,42	33	3,6

Fonte: O autor (2021).

Para a geração dos dados de referência, referentes aos experimentos I, II e III, foram utilizadas fotografias aéreas com GSD de 0,45 m, obtidas a partir da câmara Ultracam em outubro de 2010. As fotografias, e os respectivos POE (Parâmetros de Orientação

Exterior), foram disponibilizados ao Departamento de Cartografia da FCT-UNESP pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC-SP, 2010).

3.2. Recursos de Hardware e Software

Para a realização dos experimentos foram utilizados os seguintes recursos de *hardware* e *software*:

- Computadores e componentes (Processo FAPESP nº 2013/13138-0): para a execução da metodologia que será descrita na próxima Subseção;
- *Smartphones* LG-K8, K11⁺ e SAMSUNG J2, cujas características são apresentadas no Quadro 2: utilizados para a coleta e armazenamento de trajetórias GNSS entre as cidades de Presidente Prudente-SP e Indiana-SP;

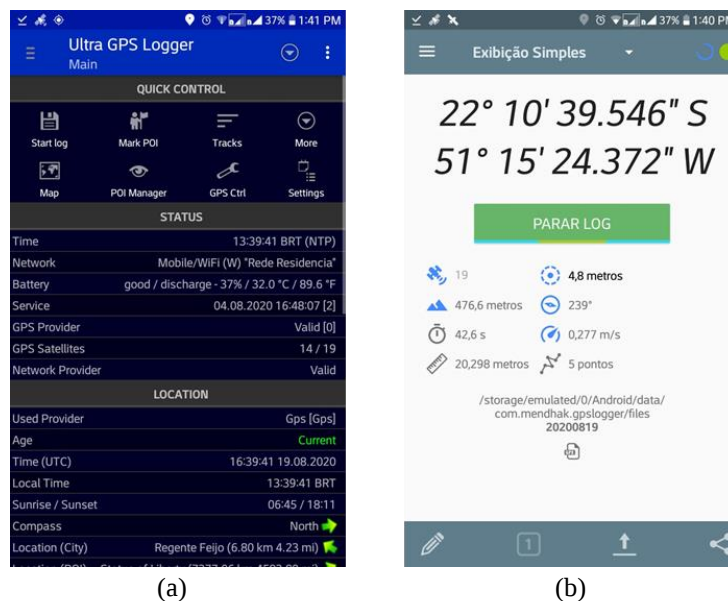
Quadro 2 - Especificações técnicas dos *smartphones* utilizados nas etapas de coleta e armazenamento das trajetórias GNSS, utilizadas nos experimentos I, II e III.

	LG K8 (K350)	LG K11 ⁺	SAMSUNG J2
			
Sistema Operacional	Android 6.0 (Marshmallow)	Android 7.1.2 (Nougat)	Android 5.1.1 (Lollipop)
Chipset	Mediatek MT6735	Mediatek MT6750	Exynos 3475 Quad
CPU	Quad-core 1.3 GHz	Octa-core 4x1.5 GHz	Quad-core 1.3 GHz
GPU	Mali-T720MP2	Mali-T860MP2	Mali-T720
Memória	8 GB / 1.5 GB RAM	16 GB / 2 GB RAM	8 GB / 1 GB RAM
GNSS	GPS e GLONASS	GPS e GLONASS	GPS e GLONASS
A-GNSS	Sim	Sim	Sim
Outros sensores	Acelerômetro e proximidade	Acelerômetro, proximidade, bússola e impressão digital	Acelerômetro e proximidade

Fonte: <https://www.gsmarena.com/>

- Aplicativos para *smartphone* Ultra GPS Logger (Figura 27a) e GPS Logger (Figura 27b): utilizados para o rastreamento das trajetórias GNSS e armazenamento no formato GPX;

Figura 27 - Aplicativos para *smartphone*: (a) Ultra GPS Logger; e (b) GPS Logger.



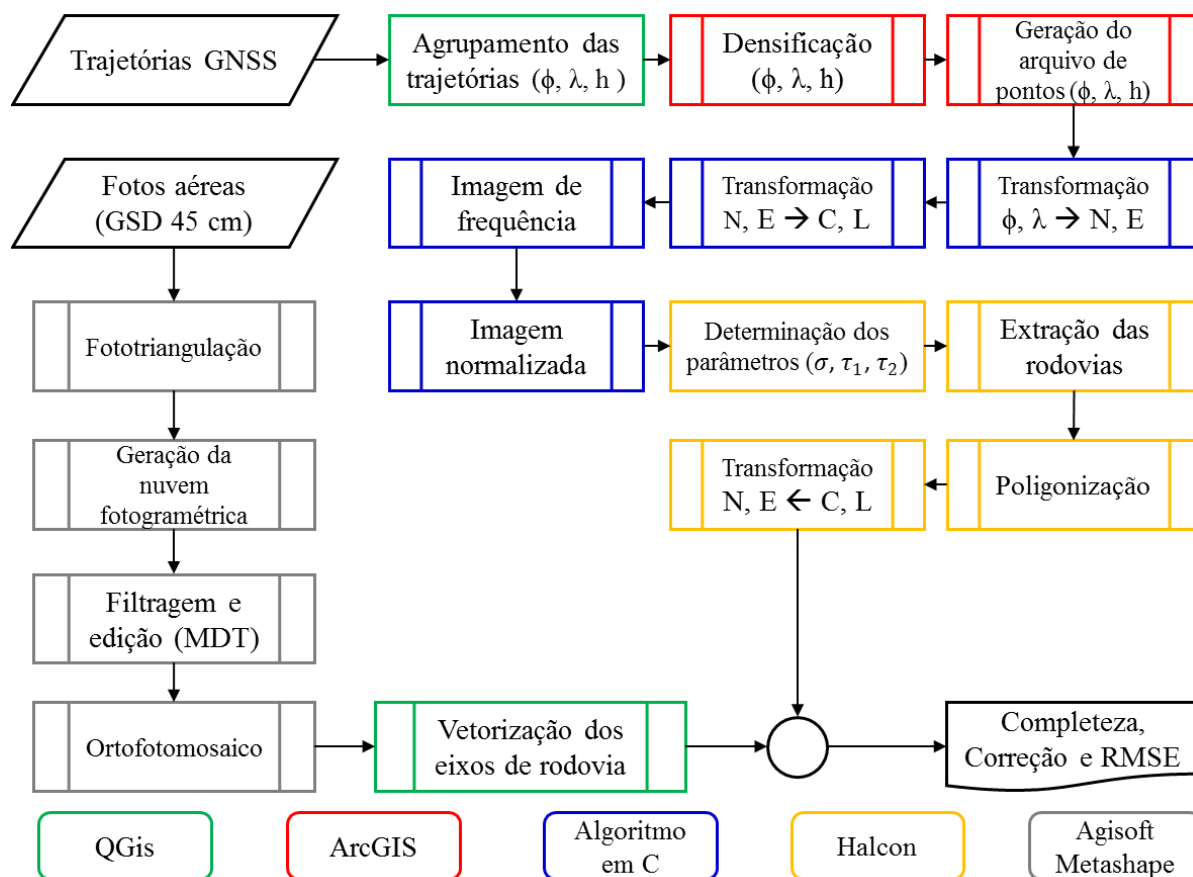
Fonte: O autor (2021).

- IDE (*Integrated Development Environment*) C/C++ Code Blocks: para a implementação dos algoritmos em linguagem C;
- Biblioteca de rotinas de visão computacional MVTec Halcon 12: para a aplicação do detector de linhas de Steger e Poligonização das linhas extraídas;
- Aplicativo Agisoft Metashape: empregado na etapa de processamento fotogramétrico (fototriangulação, nuvem de pontos fotogramétrica, MDT e ortofotomosaico);
- Aplicativo QGIS: para a manipulação dos arquivos, vetorização e análise quantitativa dos resultados por meio de consultas SQL (*Structured Query Language*); e
- Aplicativo ArcGIS: utilizado no processo de densificação das trajetórias GNSS antes da geração da imagem de frequência.

3.3. Metodologia

Para atingir os objetivos do projeto de pesquisa foi definida uma sequência de procedimentos, de modo a otimizar o desenvolvimento do trabalho. A Figura 28 apresenta as principais etapas do método proposto para extração do eixo viário a partir de um conjunto denso de trajetórias GNSS, seguida pelo detalhamento das mesmas.

Figura 28 - Etapas que compõem o método proposto para a realização da pesquisa, bem como os *softwares* utilizados em cada uma das etapas.



Fonte: O autor (2021).

3.3.1. Agrupamento e densificação das trajetórias GNSS

Em um primeiro momento, a partir das trajetórias GNSS adquiridas e armazenadas no formato GPX, efetuou-se o agrupamento das mesmas em um arquivo vetorial único (formato *shapefile*), por meio do aplicativo QGIS. Ressalta-se que esse agrupamento é realizado apenas para reduzir a quantidade de operações, visto que após o agrupamento, o arquivo gerado permite que as trajetórias continuem sendo identificadas individualmente.

Em seguida as trajetórias foram densificadas por meio do algoritmo *Geodetic Densify* implementado no *software* ArcGIS (ArcMAP). Essa etapa é de fundamental importância para o êxito do método, visto que os pontos de uma trajetória GNSS amostrados durante a coleta podem ficar muito distantes uns dos outros, principalmente em rodovias, devido à velocidade do veículo, mesmo quando o aplicativo é configurado para o intervalo mínimo de coleta, como sendo de 1 segundo para esse projeto. Caso o procedimento de

densificação não seja realizado, as frequências registradas poderão ser insuficientes para geração de uma imagem onde seja passível a identificação das rodovias, visto que as mesmas ficarão interrompidas.

Na Figura 29a é apresentada uma trajetória original, na qual é possível constatar uma distância de 26 metros entre dois pontos amostrados (intervalo de 1 segundo), e na Figura 29b, após o processo de densificação utilizando como parâmetro de entrada a distância de 1 metro (pontos em amarelo), onde é possível verificar a grande quantidade de informação posicional resgatada pelo processo de interpolação linear. Vale ressaltar que a distância escolhida para interpolação de novos pontos segue a dimensão do pixel selecionado para a geração da imagem de frequência.

Figura 29 - Etapa de densificação das trajetórias GNSS: (a) Exemplo de trajetória antes da densificação; e (b) Trajetória após a densificação, com os pontos interpolados em amarelo.



Fonte: O autor (2021).

3.3.2. Transformação de coordenadas e geração da imagem de frequência

Após o processo de densificação, as coordenadas geodésicas curvilíneas (ϕ , λ) e altitude geométrica (h) dos pontos originais e interpolados que compõem o conjunto total de trajetórias GNSS são exportadas para um arquivo ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*).

De posse do arquivo de texto, é utilizado o algoritmo computacional desenvolvido em Linguagem C (Figura 30) para execução das próximas quatro etapas do fluxograma apresentado. Resumidamente, o funcionamento do algoritmo (APÊNDICE A) consiste em:

- 1) Ler o arquivo que contem os parâmetros do elipsóide (achatamento e semieixo maior), o fuso e o hemisfério da projeção UTM no qual a região se localiza, bem como a resolução (GSD) da imagem a ser gerada;
- 2) Ler o arquivo gerado com as coordenadas de todos os pontos;
- 3) Alocar memória para os vetores e matrizes que serão utilizados;
- 4) Transformar coordenadas geodésicas em coordenadas no sistema de projeção UTM (ver Sub-subseção 2.4.1);
- 5) Encontrar o retângulo envolvente da região de interesse;
- 6) Determinar o número de linhas e colunas da imagem a ser gerada;
- 7) Transformar as coordenadas plano-retangulares (N, E) em coordenadas no sistema imagem (C, L) (ver Sub-subseção 2.4.2);
- 8) Gerar uma imagem (matriz) com os pixels inicializados com valor zero;
- 9) Determinar a frequência de pontos que sobrepõe cada um dos pixels que compõem a imagem, ou seja, contar o número de pontos dentro de cada um dos pixels da imagem gerada;
- 10) Salvar a imagem em formato PGM (*Portable Graymap Format*);
- 11) Normalizar a imagem gerada no intervalo de níveis de cinza [0-255] (Equação 24);
- 12) Salvar a imagem normalizada em formato PGM; e
- 13) Liberar espaço de memória alocado para as variáveis utilizadas.

A Figura 31 resume as etapas para geração da imagem de frequência, sendo que a partir das trajetórias GNSS (Figura 31a) é gerada uma matriz, na qual cada célula (pixel) recebe a quantidade de pontos de trajetórias que se enquadram dentro das mesmas (Figura 31b), gerando assim uma imagem de frequência (Figura 31c), sendo o processo finalizado com a normalização dessa imagem (Figura 31d).

Figura 30 - Tela de execução do algoritmo elaborado.

```

### PROGRAMA PARA A EXTRAÇÃO DE EIXO DE VIAS A PARTIR DE TRAJETÓRIAS GNSS ###

--> Leitura dos parâmetros de entrada:
a = 6378137,000 m
f = 0,003352811
Fuso = 22,0
Hemisfério = S
GSD = 1,00 m

--> Leitura do arquivo de pontos que constituem as trajetórias:
Número de linhas do arquivo: 9490116

--> Alocação de memória e cópia dos elementos do arquivo:
Latitude
Longitude
Altitude geométrica

--> Cálculo das coordenadas no sistema de projeção UTM

--> Limites da região
Sup. Esq. = (N_max = 7552822 m ; E_min = 456056 m)
Inf. Dir. = (N_min = 7545363 m ; E_max = 474325 m)

Máxima variação em N = 7459 m
Máxima variação em E = 18269 m
Número de linhas = 7459
Número de colunas = 18269

--> Alocação de memória e geração da imagem de frequência

--> Normalização da imagem de frequência [0 ; 255]
Frequência Mínima: 0
Frequência Máxima: 94

--> Liberação de memória

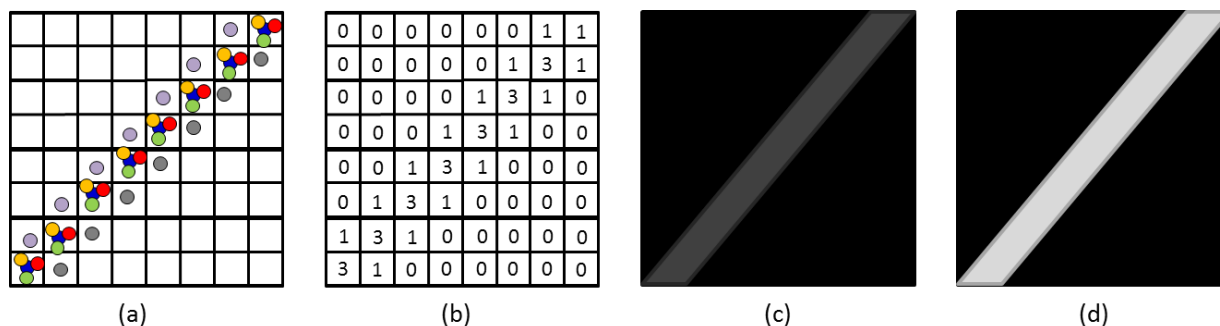
--> Processamento Finalizado!

Tempo de execução do programa: 196,462 segundos

```

Fonte: O autor (2021).

Figura 31 - Resumo das etapas para geração da imagem de frequência: (a) Trajetórias GNSS; (b) Determinação da frequência; (c) Imagem de frequência gerada; e (d) Imagem normalizada.



Fonte: O autor (2021).

3.3.3. Extração de rodovias com o detector de linhas de Steger

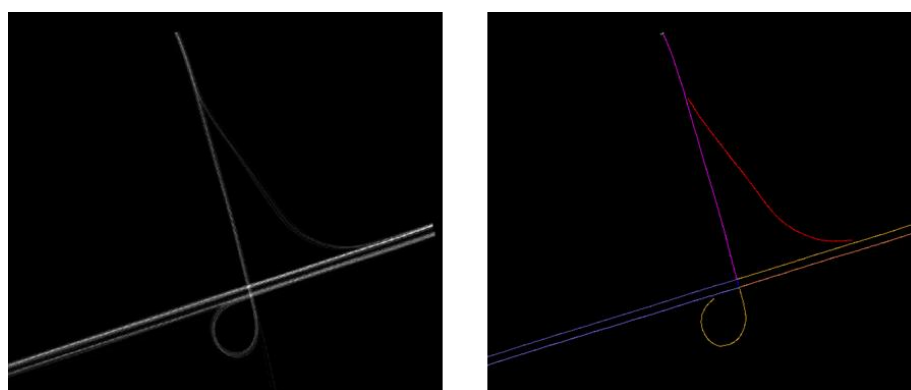
Com a imagem de frequência gerada, a próxima etapa consiste em extrair as rodovias utilizando o detector de linhas de Steger. Para realização dos procedimentos foram utilizadas as bibliotecas disponíveis no *software* Halcon, sendo as funções apresentadas a seguir em *itálico*.

Primeiramente, efetuou-se a leitura da imagem (*read_image*). Em seguida foi utilizado o detector de linhas de Steger (*lines_gauss*) para extração das vias (Figura 32). Os parâmetros de entrada do algoritmo (σ , τ_1 , τ_2) podem ser inseridos manualmente pelo usuário, com base na experiência ou tentativa e erro, lembrando que o fator de escala gaussiano pode ser determinado pela Equação 40, bem como podem ser estimados automaticamente pela função *calculate_lines_gauss_parameters*. A função *calculate_lines_gauss_parameters* (Equação 49), utiliza como parâmetros de entrada a largura da linha em pixels e o valor de contraste da linha que se deseja extrair (MVTec, 2020). No experimento I, os mesmos foram determinados das duas maneiras, e nos demais foram inseridos manualmente, a partir da experiência adquirida no primeiro experimento.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = -2 \begin{bmatrix} ContrastLow \\ ContrastHigh \end{bmatrix} \frac{w}{\sqrt{2\pi} \sigma^3} e^{-\frac{w^2}{2\sigma^2}} \quad (49)$$

em que: τ_1 e τ_2 são os limiares de histerese inferior e superior, respectivamente; w é $\frac{1}{2}$ da espessura da linha; σ é o fator de escala gaussiano; *ContrastHigh* recebe o valor de contraste inserido como parâmetro de entrada; e *ContrastLow* = $\frac{ContrastHigh}{3}$ (MVTec, 2020).

Figura 32 - Exemplo de extração de rodovias com o detector de linhas de Steger aplicado sobre uma imagem de frequência de trajetórias GNSS.



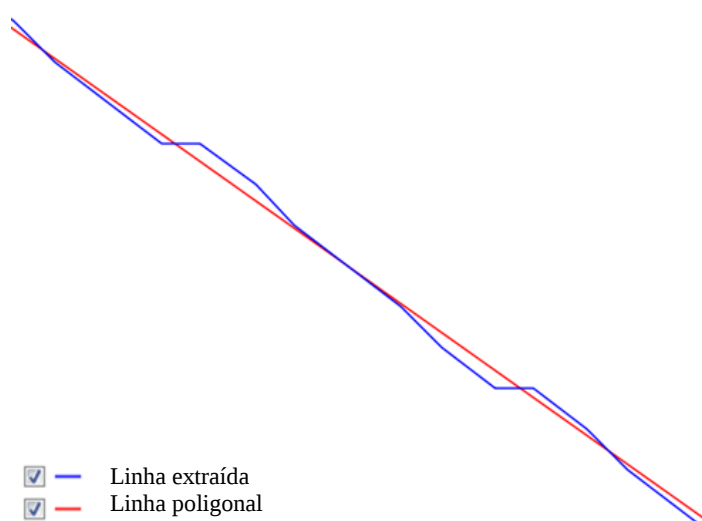
Fonte: O autor (2021).

O resultado após aplicação do detector de linhas de Steger consiste em uma lista de coordenadas (C, L) com precisão subpixel. Logo, é necessário realizar o georreferenciamento dos segmentos extraídos, ou seja, transformar coordenadas de imagem

(C, L) em coordenadas de terreno (N, E). Essa transformação pode ser executada no Halcon a partir da leitura de um arquivo no formato TFW (*Text File Word*) (*read_world_file*), sendo que este contém as coordenadas UTM do pixel superior esquerdo e a dimensão do pixel nas duas direções. Após a leitura do arquivo TFW é utilizada a função *affine_trans_contour_xld*, sendo essa nada menos que a forma inversa da transformação apresentada na Sub-subseção 2.4.2 (Equações 22 e 23).

Em seguida foi empregada a operação de poligonização (*gen_polygons_xld*) com o intuito de reduzir a quantidade de vértices extraídos a partir do algoritmo de Douglas Peucker, porém mantendo a consistência geométrica e topológica dos vetores, visto que se optou por trabalhar com os limiares de 0,5 e 1,0 pixel. A Figura 33 apresenta um segmento de linha extraído, antes e depois da operação de poligonização.

Figura 33 - Comparação entre o segmento de linha extraído e a linha poligonal gerada após a aplicação do operador de poligonização.



Fonte: O autor (2021).

Por fim, o resultado da extração já georreferenciado é exportado em formato DXF (*Drawing Exchange Format*) (*write_polygon_xld_dxf*), possibilitando assim sua visualização e manipulação em *softwares* do tipo GIS.

3.3.4. Geração de dados de referência e análise de qualidade

A última etapa da metodologia proposta consiste em realizar a análise dos resultados por meio dos índices completeza e correção, bem como o RMSE, para a análise da

acurácia posicional. Para realização da análise, obteve-se o eixo considerado como referência através do processo de vetorização sobre um ortofotomosaico georreferenciado.

Para a geração do ortofotomosaico utilizado, executou-se a seguinte sequência de procedimentos fotogramétricos no *software* Agisoft Metashape. Primeiramente, foram selecionadas 22 fotografias aéreas do bloco, e seus POE, que recobriam a região selecionada para a realização dos três primeiros experimentos. Em seguida essas fotografias foram fototrianguladas, sendo utilizados dez pontos de apoio e quinze pontos de verificação. A acurácia da fototriangulação por componente, a partir dos pontos de verificação, é apresentada na Tabela 3.

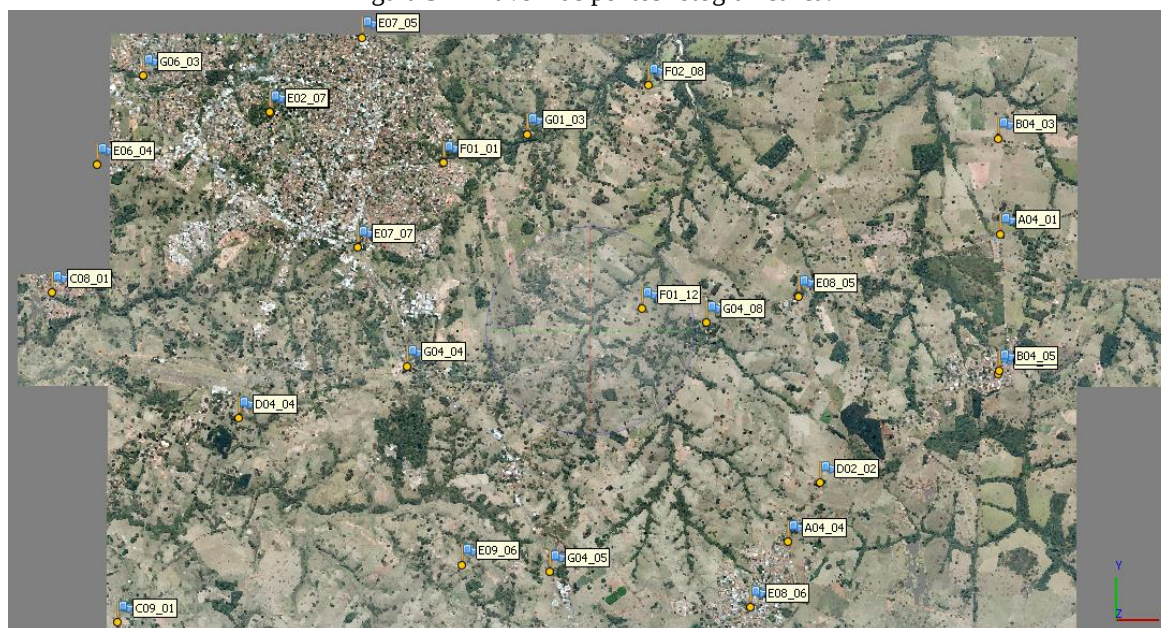
Tabela 3 - Resultado da Fototriangulação em termos de acurácia.

Pontos	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE XY (m)	RMSE Z (m)
Apoio (10)	0,029	0,037	0,047	0,056
Verificação (15)	0,268	0,204	0,336	0,971

Fonte: Relatório de processamento do *software* Agisoft Metashape (2021).

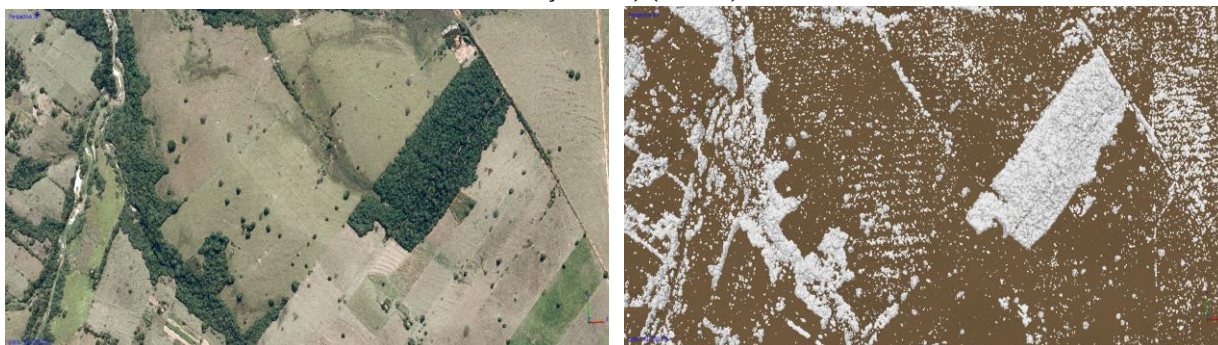
Após a orientação das imagens, foi gerada a nuvem de pontos fotogramétrica (Figura 34) (MDS – Modelo Digital de Superfície), seguida pela filtragem e edição (Figura 35), para obtenção do MDT (Modelo Digital de Terreno) (Figura 36). O processo foi finalizado com a geração do ortofotomosaico correspondente à região selecionada.

Figura 34 - Nuvem de pontos fotogramétrica.



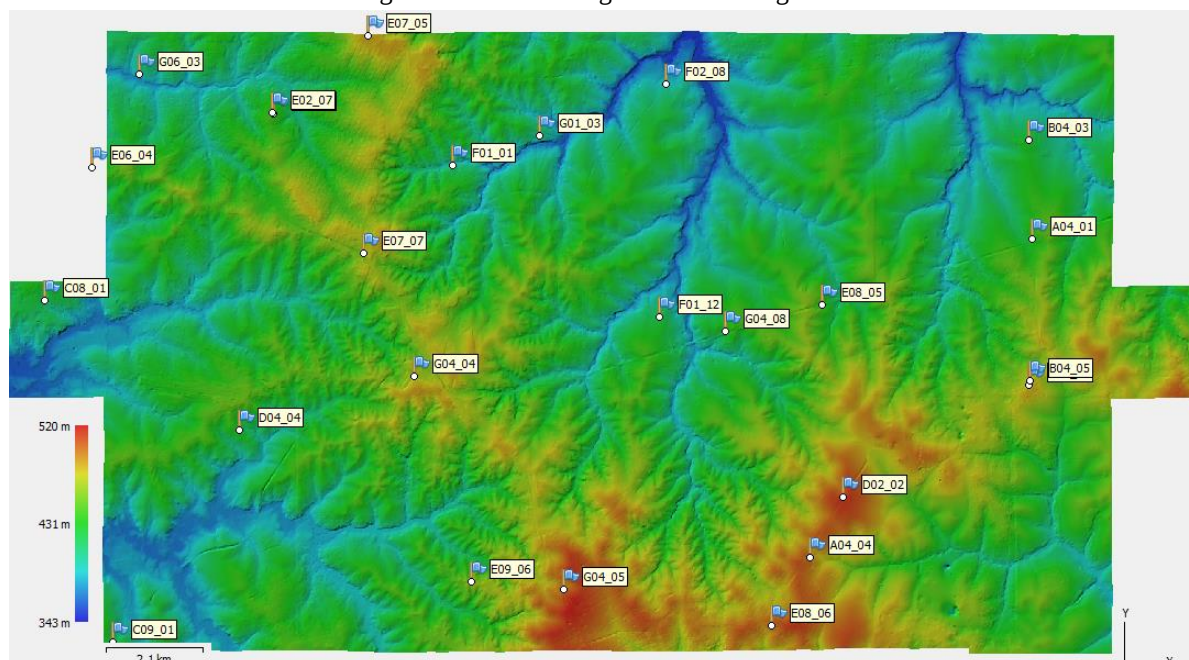
Fonte: O autor (2021).

Figura 35 - Resultado da filtragem para separação de pontos de terreno (marrom) de outras classes (vegetação, edificação, etc.) (branco).



Fonte: O autor (2021).

Figura 36 - Modelo Digital de Terreno gerado.



Fonte: O autor (2021).

A Figura 37 apresenta o ortofotomosaico georreferenciado, bem como o eixo de referência vetorizado, utilizado para a realização da análise de qualidade dos experimentos I, II e III. Ressalta-se que todas as vias que foram percorridas, ou seja, onde havia presença de trajetórias GNSS, foram vetorizadas, independentemente da densidade.

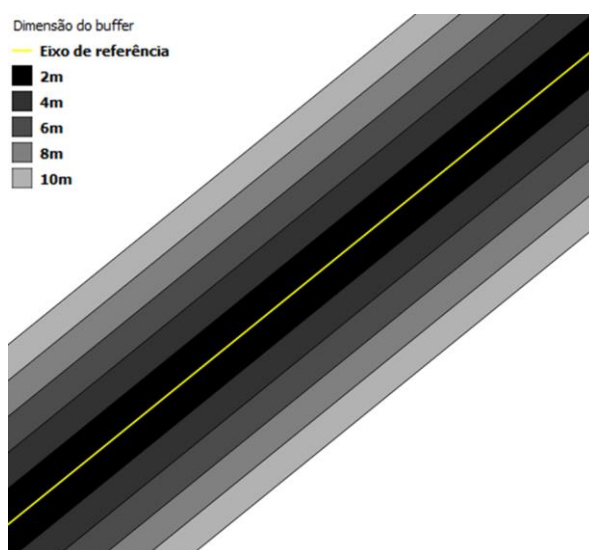
Com os eixos de referência vetorizados e com os eixos extraídos foram gerados *buffers* para os mesmos, por meio do aplicativo QGIS. A Figura 38 ilustra uma região do experimento I com *buffers* de 2, 4, 6, 8 e 10 m, selecionados para a análise dos índices. Essa metodologia de avaliação, com base em diferentes valores de *buffer*, foi baseada em Huang *et al.* (2018) e Biagioni e Eriksson (2012).

Figura 37 - Ortofotomosaico gerado para avaliação dos experimentos I, II e III, e eixos de referência vetorizados.



Fonte: O autor (2021).

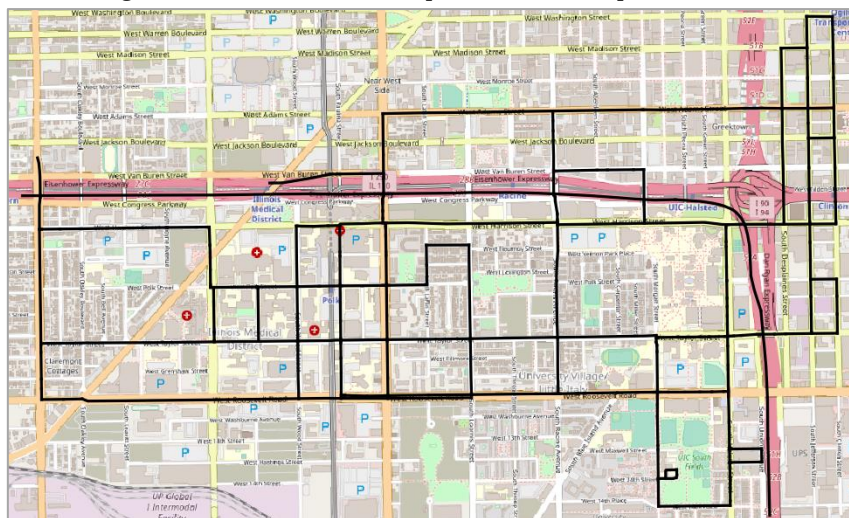
Figura 38 - Exemplo de segmento com os diferentes valores de *buffers* selecionados: 2 m, 4 m, 6 m, 8 m e 10 m.



Fonte: O autor (2021).

Conforme citado anteriormente, os dados de referência para avaliação do experimento IV foram disponibilizados juntamente com o conjunto de trajetórias GNSS que compõem o *dataset* de Chicago. A Figura 39 apresenta o eixo de referência, cuja fonte é o projeto *OpenStreetMap*. Ressalta-se que apenas as vias que haviam sido percorridas pelos veículos foram consideradas para análise, de modo análogo a Biagioni e Eriksson (2012) e Ahmed (2015). Além disso, no quarto experimento não será realizada a avaliação em termos de acurácia (RMSE), visto que os dados de referência disponibilizados não possuem um nível de exatidão geométrica adequado para esta análise.

Figura 39 - Eixo de referência para análise do experimento IV.



Fonte: O autor (2021).

Os elementos EE , ER , $ER \cap \text{buffer}_{EE}$ e $EE \cap \text{buffer}_{ER}$ para realização dos cálculos de completeza e correção foram obtidos via consultas SQL, realizadas no aplicativo QGIS (Figura 40), visto que todos os dados estavam georreferenciados e sendo manipulados em um aplicativo do tipo GIS. Deste modo, as consultas espaciais facilitaram as operações de intersecção, soma de segmentos, entre outras, otimizando assim o processo como um todo.

Figura 40 – Exemplo de consultas SQL realizadas no aplicativo QGIS.

```
// Comprimento do eixo de referência.
SELECT SUM(ST_LENGTH(geometry))
FROM eixo_referencia

//Comprimento das vias extraídas.
SELECT SUM(ST_LENGTH(geometry))
FROM teste_1

//Determinação das intersecções entre o eixo de referência e o buffer do eixo extraído.
SELECT SUM (ST_LENGTH (ST_INTERSECTION (er.geometry, b1.geometry) ))
FROM eixo_referencia er, buffer_t1_2m b1

//Determinação das intersecções entre o eixo extraído e o buffer do eixo de referência.
SELECT SUM (ST_LENGTH (ST_INTERSECTION (t1.geometry, ber.geometry) ))
FROM teste_1 t1, buffer_er_2m ber
```

Fonte: O autor (2021).

4. EXPERIMENTOS

Esta seção descreve as configurações dos experimentos realizados de acordo com a metodologia proposta na Seção 3. No primeiro experimento, Subseção 4.1, é avaliado o comportamento dos parâmetros do detector de linhas de Steger em imagens de frequência geradas a partir de trajetórias GNSS, bem como verificado se a imagem gerada apresenta um perfil transversal com comportamento similar à distribuição normal (Figura 1). O segundo experimento (Subseção 4.2) visa analisar uma aplicação prática de extração de rodovias para mapeamento. Na Subseção 4.3, o terceiro experimento verifica a possibilidade de emprego do método para detecção de vias em áreas urbanas. Por fim, na Subseção 4.4 o último experimento compara o método proposto com outros trabalhos presentes na literatura.

4.1. Experimento I - Análise dos parâmetros do detector de linhas de Steger

Conforme ilustrado na Figura 23, de todo conjunto de dados selecionou-se uma região para realização do experimento I. Essa região corresponde a uma área de 5,89 km², abrangendo 12,57 km de vias urbanas e não urbanas, percorridas por 182 trajetórias GNSS.

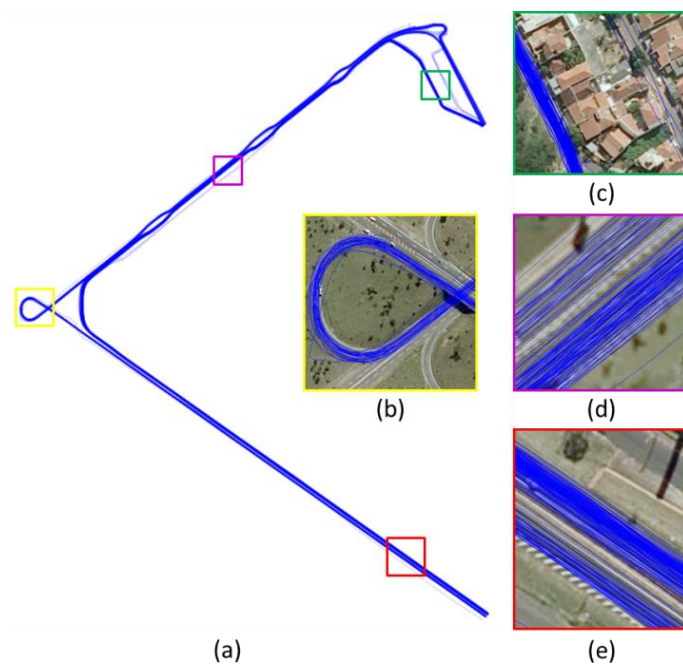
Essa área foi escolhida, pois apresenta grande variedade de casos que sintetizam o conjunto total de trajetórias, sendo estas: trajetórias GNSS espúrias (Figuras 41b, 41c e 41d); regiões com alta densidade e baixa densidade de trajetórias, inclusive próximas umas das outras (Figuras 41c, 41d e 41e); trechos de vias compostas por faixas simples (Figura 41c), duplas (Figura 41e) e triplas (Figura 41d); bem como vias urbanas (Figura 41c) e não urbanas (Figuras 41b, 41d e 41e); ou seja, uma variedade de casos passíveis de serem analisados, principalmente a influência dos mesmos sobre a metodologia proposta.

Conforme apresentado na Figura 29, realizou-se a densificação das trajetórias, de modo que os pontos interpolados distanciassem 1 m uns dos outros. Ressalta-se que antes da densificação 64.400 pontos formavam as trajetórias, sendo 890.159 após o procedimento, ou seja, um aumento de 13,8 vezes, que consiste em informação recuperada a partir dos pontos amostrados pelo processo de interpolação linear. Esse limiar foi escolhido em função da resolução da imagem (1 m).

A resolução da imagem de frequência (1 m) foi determinada a partir de experiências apresentadas em trabalhos de outros autores, e também com base na qualidade

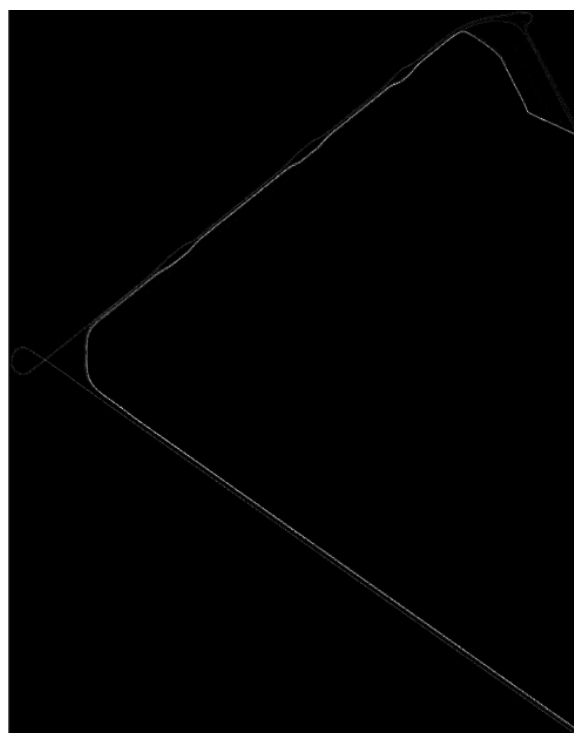
dos dados de referência, visto que o eixo de referência foi vetorizado sobre um ortofotomosaico com GSD de 0,45 m. A Figura 42 apresenta a imagem de frequência gerada.

Figura 41 - Detalhes da região selecionada para realização do experimento I.



Fonte: O autor (2021).

Figura 42 - Imagem de frequência gerada (resolução de 1 m), a partir dos dados de trajetória GNSS, referente ao primeiro experimento, por meio do algoritmo desenvolvido.



Fonte: O autor (2021).

De acordo com o fluxograma apresentado na Subseção 3.3 (Figura 28), após a geração da imagem de frequência foi efetuada a extração das rodovias. Para realizar a extração é necessário informar os parâmetros do detector de linhas de Steger, no caso o fator de escala gaussiano (σ) e os limiares de histerese inferior (τ_1) e superior (τ_2). Para avaliar a influência dos parâmetros do detector no processo de extração de rodovias foram realizados seis subexperimentos, com diferentes combinações de parâmetros (Tabela 4), sendo dois destes seis conjuntos estimados automaticamente pelo *software* Halcon (conjuntos 3 e 6).

Tabela 4 - Valores dos parâmetros do detector de linhas de Steger selecionados para cada um dos experimentos.

Subexperimento	σ [pixel]	τ_1	τ_2
1	3,46	0,01	1,00
2	3,46	0,50	3,00
3	3,46	0,04	0,12
4	2,31	0,01	1,00
5	2,31	0,50	3,00
6	2,31	0,09	0,28

Fonte: O autor (2021).

Em um primeiro momento efetuou-se uma análise visual da imagem gerada, sendo detectado que havia, predominantemente, rodovias com largura variando de 8 a 12 pixels. Assim, optou-se por trabalhar com esses dois valores para calcular o fator de escala gaussiano (Equação 40), gerando dois subconjuntos, sendo os experimentos 1, 2 e 3 para linhas com largura de 12 pixels e os experimentos 4, 5 e 6 para linhas de 8 pixels. Para os experimentos 1, 2, 4 e 5 os parâmetros de histerese foram baseados em análises realizadas por Ishibashi (2008), enquanto que para os experimentos 3 e 6, os mesmos foram determinados automaticamente.

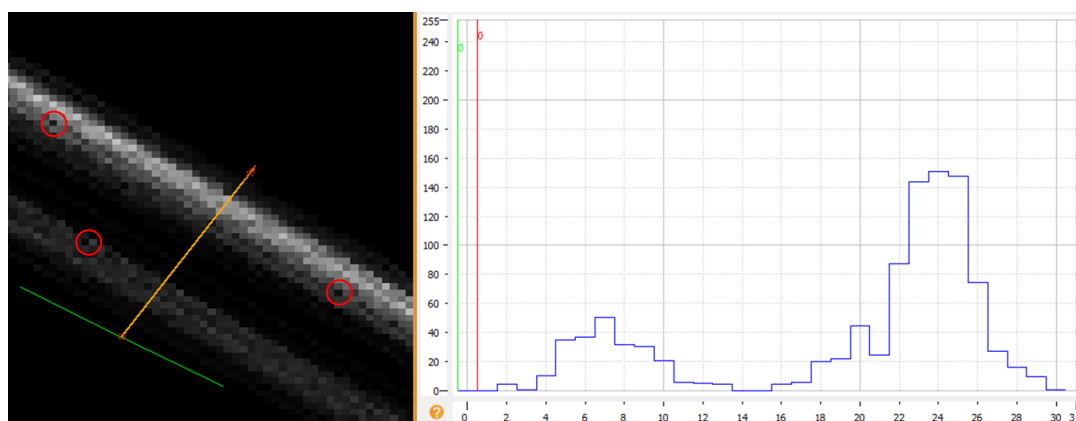
Nota-se que tanto de forma manual como automática, o valor de σ é o mesmo, pois o *software* utiliza a largura da linha para determiná-lo, enquanto que os limiares de histerese são determinados por um procedimento interno (Equação 49), que considera o valor de contraste da linha que se deseja extrair.

Foi construído um perfil perpendicular à rodovia, com o intuito de verificar se o comportamento do mesmo se aproxima de uma curva gaussiana (distribuição normal), conforme previsto e enfatizado na literatura. A Figura 43 nos mostra que o comportamento ocorreu de acordo com o esperado (o trecho analisado corresponde a Figura 41e). Por se tratar de uma via de faixa dupla, separada por um canteiro central é possível detectar uma distribuição bimodal.

Observa-se que em um dos sentidos das vias havia maior densidade de trajetórias, logo houve uma maior frequência e a distribuição ficou menos achatada, com um pico de frequência mais acentuado, o que na teoria caracteriza uma amostra como mais precisa. No sentido oposto, devido a uma menor densidade de trajetórias a distribuição gerada se apresentou mais larga e achatada, comportamento característico de uma amostra mais dispersa.

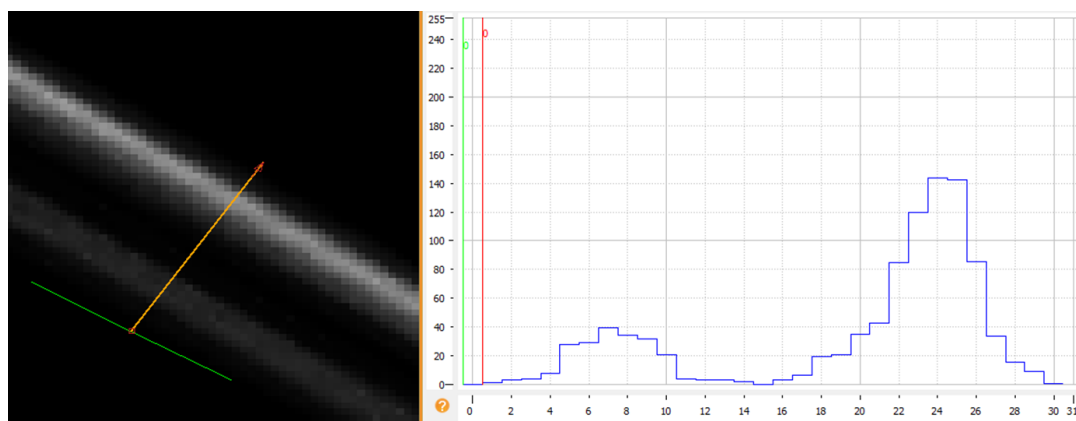
O perfil apresentado na Figura 43 foi extraído a partir da imagem original. De modo a analisar a influência do parâmetro σ , aplicou-se um filtro gaussiano com σ igual aos determinados para linhas de larguras de 8 e 12 pixels, Figuras 44 e 45, respectivamente, nas quais se verificou que os valores de σ adotados são suficientes para remover pequenas inconsistências da imagem de frequência, como pixels não amostrados ou buracos (círculos em vermelho na Figura 43). Portanto, não foi necessário realizar processamentos extras para o melhoramento da imagem.

Figura 43 - Perfil traçado sobre a imagem original.



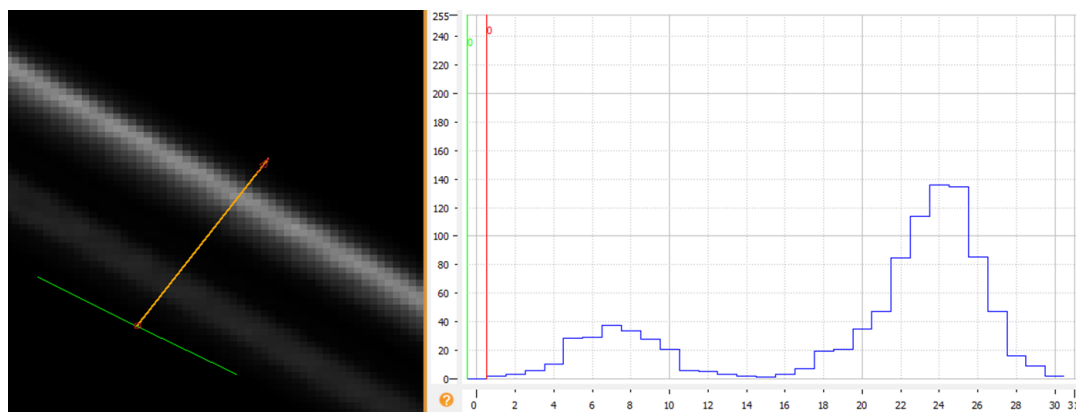
Fonte: O autor (2021).

Figura 44 - Perfil traçado sobre a imagem suavizada com σ igual a 2,31.



Fonte: O autor (2021).

Figura 45 - Perfil traçado sobre a imagem suavizada com σ igual a 3,46.



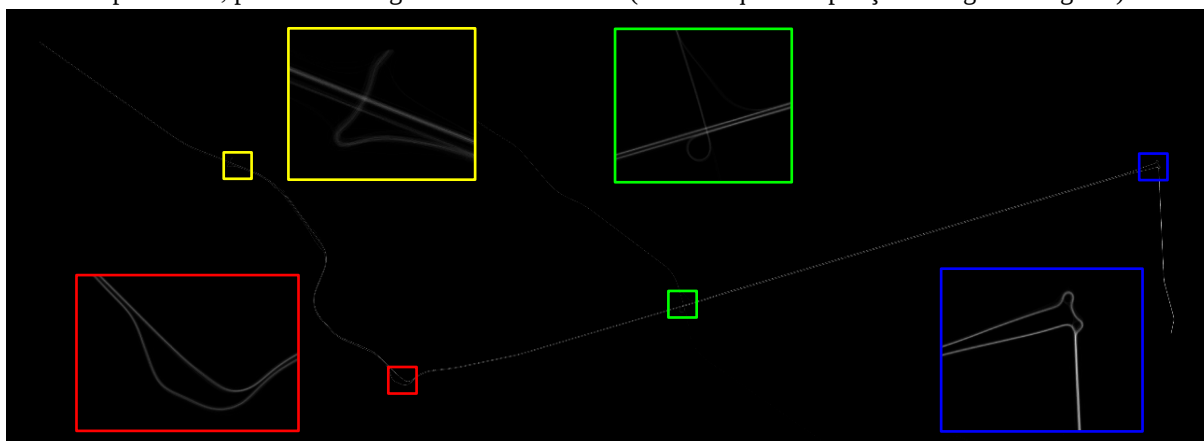
Fonte: O autor (2021).

4.2. Experimento II – Extração de rodovias de faixas simples e duplas

O experimento II foi conduzido de forma análoga ao experimento anterior, sendo o diferencial apenas a área de estudo, bem como o conjunto de trajetórias utilizado (Figura 24). Conforme apresentado no Quadro 1, nesse experimento foram utilizadas 490 trajetórias GNSS, sendo percorrido cerca de 70 km de rodovias em uma área de aproximadamente 136 km². Ressalta-se que a maioria dos trabalhos do gênero presentes na literatura adotam como objeto de estudo apenas vias presentes em áreas urbanas, logo, essa abordagem é mais um diferencial desse projeto.

Inicialmente, o conjunto de trajetórias continha 385.341 pontos, porém após o processo de densificação (limiar de 1 m), se obteve um total de 9.490.116 pontos, ou seja, um aumento de 24,6 vezes (2.362,78%). Desse modo, gerou-se a imagem de frequência com resolução de 1 m (Figura 46).

Figura 46 - Imagem de frequência gerada, a partir dos dados de trajetória GNSS, referente ao segundo experimento, por meio do algoritmo desenvolvido (em destaque a ampliação de algumas regiões).

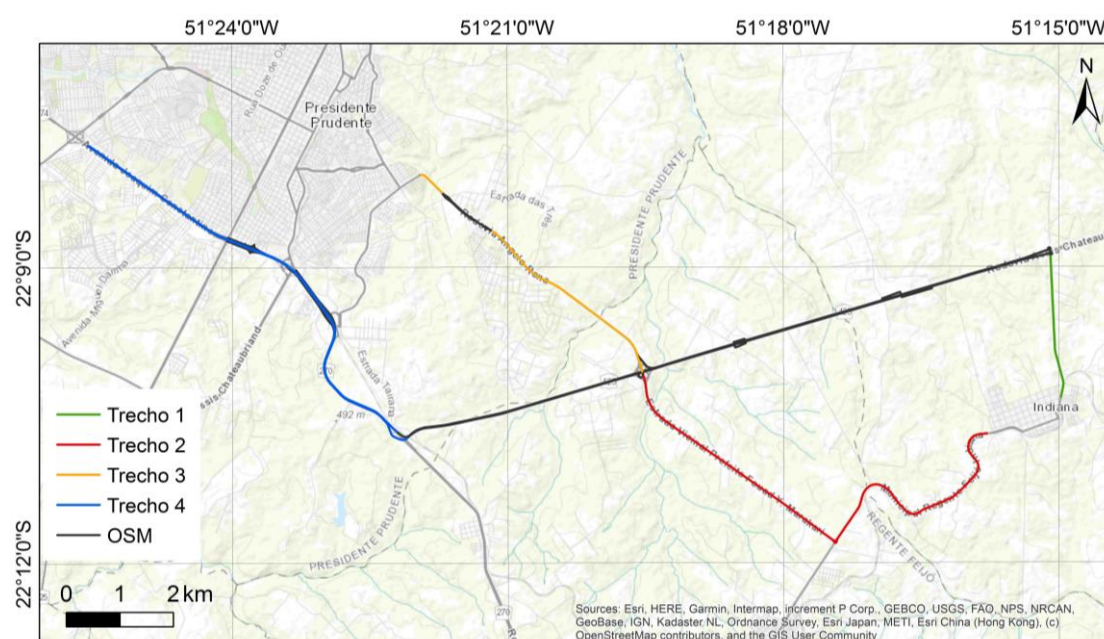


Fonte: O autor (2021).

Após a geração da imagem realizou-se a extração das rodovias com o detector de linhas de Steger. Diferentemente do experimento I no qual foram avaliados seis conjuntos de parâmetros, nesse experimento, bem como nos próximos dois, optou-se por trabalhar apenas com os parâmetros que forneceram a melhor extração, no entanto isso só foi possível devido à experiência adquirida a partir do experimento I. Assim, os parâmetros de entrada do detector de linhas de Steger para o experimento II foram: $\sigma = 2,55$; $\tau_1 = 0,01$; e $\tau_2 = 0,25$. Além desses, para a etapa de poligonização com o algoritmo de Douglas Peucker, utilizou-se um limiar $\alpha = 0,50$ pixel (0,50 m). O resultado obtido para o segundo experimento, e a discussão do mesmo, é apresentado na subseção 5.2.

Ressalta-se que para a análise da acurácia do experimento II, foi necessário realizar uma subdivisão dos eixos de referência por trechos, sendo: Trecho 1 (Rodovia Prefeito João Floriano Júnior); Trecho 2 (Rodovias Prefeito Elias Salomão e Prefeito Fouad Youssef Makari); Trecho 3 (Rodovia Ângelo Rena); e Trecho 4 (Rodovia Raposo Tavares) (Figura 47). Não foi utilizado o trecho OSM (que corresponde a Rodovia Assis Chateaubriand), pois o mesmo passou por um processo de duplicação entre 2015 e 2018, sendo que as imagens aéreas utilizadas para geração dos dados de referência foram adquiridas em 2010. Portanto, para analisar toda a extração em termos de completeza e correção, esse trecho foi extraído da base de dados do projeto *OpenStreetMap*. No entanto, o mesmo não foi analisado em termos de acurácia.

Figura 47 - Subdivisão dos eixos de referência do experimento II para a análise da acurácia da extração.



Fonte: O autor (2021).

O tempo de processamento para a execução de todo o fluxo de trabalho foi de 21,54 minutos. De forma detalhada: as etapas que envolveram processamentos nos *softwares* QGIS e ArcGIS somaram 17,56 minutos; o algoritmo desenvolvido em linguagem C precisou de 3,27 minutos para geração da imagem de frequência; e os processamentos executados no Halcon somaram 0,71 minutos.

4.3. Experimento III – Extração de vias urbanas

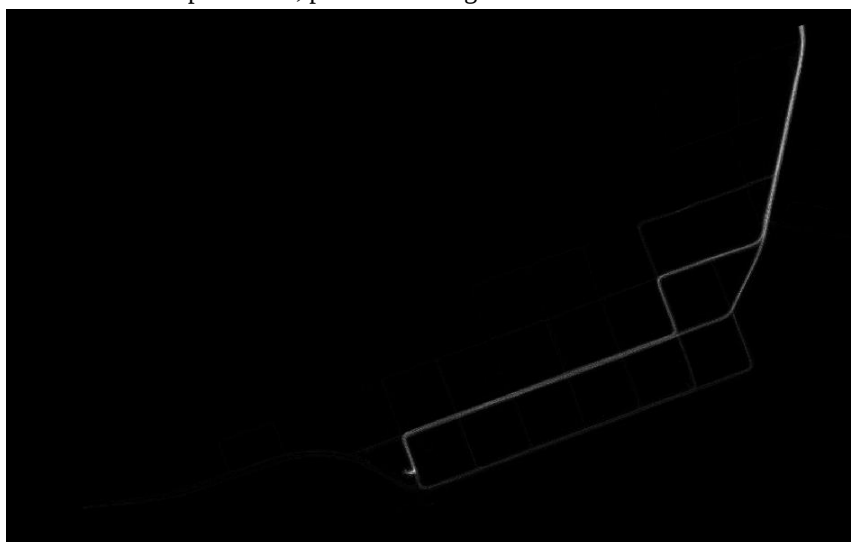
O experimento III utiliza apenas um recorte das trajetórias GNSS adquiridas, especificamente na área urbana do município de Indiana-SP (Figura 25). Inicialmente, as 490 trajetórias contribuíam com um total de 78.816 pontos, e após o processo de densificação (interpolação com limiar de 1 m) obteve-se 612.681 pontos, ou seja, um aumento que corresponde a 677,36. De modo análogo aos experimentos anteriores a imagem de frequência foi gerada com GSD de 1 m (Figura 48).

Os parâmetros de entrada do detector de linhas de Steger para o experimento III foram: $\sigma = 2,60$; $\tau_1 = 0,02$; e $\tau_2 = 0,15$. Além desses, para a etapa de poligonização com o algoritmo de Douglas Peucker, utilizou-se um limiar $\alpha = 1,00$ pixel (1,00 m). Analisando os dados utilizados no experimento (Figura 25) é possível observar a presença significativa de algumas trajetórias espúrias (que de fato é esperado em áreas urbanas), principalmente no local onde o rastreo era iniciado e finalizado. Essa flutuação ocorre, pois por menor que seja o tempo que o veículo fica parado, os pontos continuam sendo rastreados, e por se tratar de um local fechado (garagem) a qualidade do posicionamento GNSS é deteriorada.

Essas trajetórias espúrias contribuíram para a detecção de pequenos segmentos que originalmente não faziam parte das vias, portanto, foi necessário utilizar a função *select_contours_xld* para remover os mesmos, desde que possuísem comprimento inferior a 50 m (parâmetro de entrada da função). Ressalta-se que foram poucos os segmentos do tipo falso positivo, porém a remoção dos mesmos contribuiu para a melhoria do indicador correção. Outro problema encontrado nesse experimento está relacionado com a definição das intersecções entre vias, assim foi necessário utilizar a função *union_adjacent_contours_xld*, para conectar as linhas cujos pontos finais estivessem a uma distância menor que 50 m (parâmetro de entrada da função).

O resultado obtido para o terceiro experimento, e a discussão do mesmo, é apresentado na Subseção 5.3. Além disso, também é apresentada a extração das vias antes e depois da aplicação das funções *select_contours_xld* e *union_adjacent_contours_xld*.

Figura 48 - Imagem de frequência gerada, a partir dos dados de trajetória GNSS, referente ao terceiro experimento, por meio do algoritmo desenvolvido.



Fonte: O autor (2021).

O tempo de processamento para a realização do experimento III, de acordo com a Figura 28, foi de 84,0 segundos, bem mais rápido se comparado ao experimento II, visto que a quantidade de pontos e a área são menores. De forma detalhada: as etapas que envolveram processamentos nos *softwares* QGIS e ArcGIS somaram 72 segundos; o algoritmo desenvolvido em linguagem C precisou de 7,2 segundos para geração da imagem de frequência; e os processamentos executados no Halcon somaram 4,8 segundos.

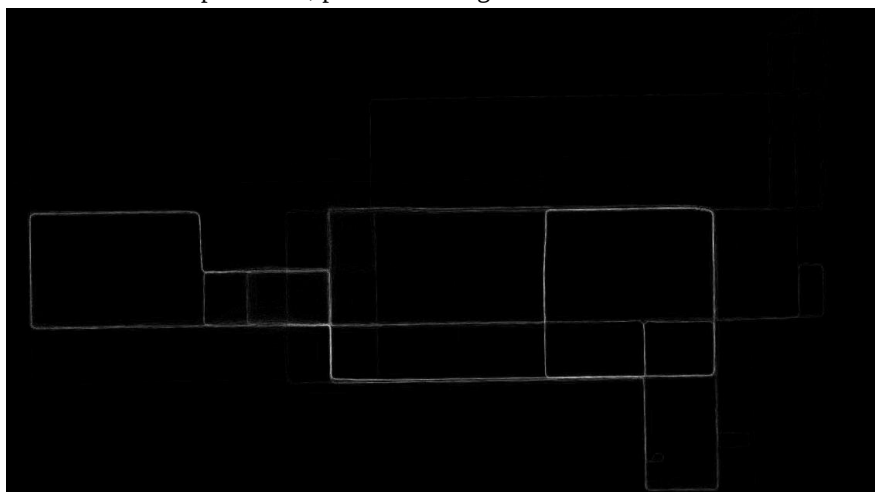
4.4. Experimento IV – Comparação de resultados

O experimento IV utiliza um *dataset* de trajetórias GNSS (Figura 26) avaliado em diversos trabalhos presentes na literatura (HUANG *et al.*, 2018; XIE *et al.*, 2017; AHMED *et al.*, 2015), bem como dados de referência (Figura 39). Antes do processo de densificação as 889 trajetórias somavam 118.364 pontos, sendo 2.912.048 pontos após a interpolação, ou seja, um aumento de 2.360,25%. De modo análogo aos experimentos anteriores, gerou-se uma imagem de frequência com GSD de 1 m (Figura 49).

Os parâmetros de entrada do detector de linhas de Steger para o experimento III foram: $\sigma = 3,50$; $\tau_1 = 0,01$; e $\tau_2 = 0,25$. Além desses, para a etapa de poligonização com o

algoritmo de Douglas Peucker, utilizou-se um limiar $\alpha = 0,50$ pixel (0,50 m). O resultado obtido para o quarto experimento, e a discussão do mesmo, é apresentado na Subseção 5.4.

Figura 49 - Imagem de frequência gerada, a partir dos dados de trajetória GNSS, referente ao quarto experimento, por meio do algoritmo desenvolvido.



Fonte: O autor (2021).

Conforme descrito anteriormente, o experimento IV foi realizado com o intuito de comparar o método proposto com outros trabalhos presentes na literatura, utilizando um *dataset* independente, como o de Chicago. Deste modo, foi utilizado o trabalho desenvolvido por Biagioni e Eriksson (2012) como referência. Nesse trabalho os autores avaliam o método proposto, bem como os métodos de mais três autores: Davies *et al.* (2006); Edelkamp e Schrodhl (2003); e Cao e Krumm (2009).

Resumidamente, o método de Edelkamp e Schrodhl (2003) utiliza a técnica de clusterização a partir do algoritmo *k-means*, enquanto que os métodos de Davies *et al.* (2006) e Biagioni e Eriksson (2012) executam a extração a partir de imagem binária e de intensidade, respectivamente, ambas obtidas após a aplicação da técnica *KDE* (*Kernel Density Estimation*). O algoritmo de Cao e Krumm (2009) se enquadra na classe *Trace Merging*, na qual as trajetórias GNSS são analisadas individualmente a partir de um critério de similaridade, uma de cada vez, para verificar se a mesma faz parte da rodovia.

O tempo de processamento para a realização do experimento IV, conforme a metodologia proposta na Subseção 3.3, foi de 5,81 minutos. De forma detalhada: as etapas que envolveram processamentos nos *softwares* QGIS e ArcGIS somaram 5,21 minutos; o algoritmo desenvolvido em linguagem C precisou de 30 segundos para geração da imagem de frequência; e os processamentos executados no Halcon somaram 6 segundos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos, após a realização dos experimentos descritos anteriormente.

5.1. Experimento I – Análise dos parâmetros do detector de linhas de Steger

A comparação entre os eixos resultantes da extração de cada uma das seis parametrizações com o eixo de referência permitiu obter os indicadores quantitativos completeza, correção e RMSE.

A Tabela 5 apresenta o comprimento total dos segmentos de rodovia extraídos a partir do detector de linhas Steger para cada um dos seis subexperimentos, bem como o comprimento do eixo de referência vetorizado a partir do ortofotomosaico georreferenciado.

Tabela 5 – Comprimento do eixo de referência vetorizado e dos eixos extraídos em cada subexperimento.

Eixo de Referência	Comprimento (m)	Eixo Extraído	Comprimento (m)
Vetorização manual	12.573,796	1	8.311,866
		2	4.861,942
		3	10.046,316
		4	11.027,698
		5	7.667,328
		6	12.304,135

Fonte: O autor (2021).

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para os índices de completeza e correção para os *buffers* de 2, 4, 6, 8 e 10 m, bem como o valor do RMSE em relação ao eixo de referência. A partir da Figura 50a verifica-se que para o *buffer* de 2 m resultou em um baixo valor de completeza, ou seja, houve a exclusão de um grande segmento de rodovia, o que é reforçado pela análise visual da extração (Figura 50b), sendo possível verificar que praticamente um segmento inteiro foi excluído, quando comparado com o eixo de referência apresentado na Figura 37.

A partir do *buffer* de 4 m, constata-se que o resultado atinge um valor máximo de completeza, em média 66%, bem como o valor de correção máxima, acima de 99%. Ou seja, pode-se concluir que para o primeiro conjunto de parâmetros (Tabela 4), têm-se 66% dos

eixos extraídos com boa qualidade, visto que não houve, praticamente, a inserção de nenhum ruído, baseado nos valores de correção obtidos.

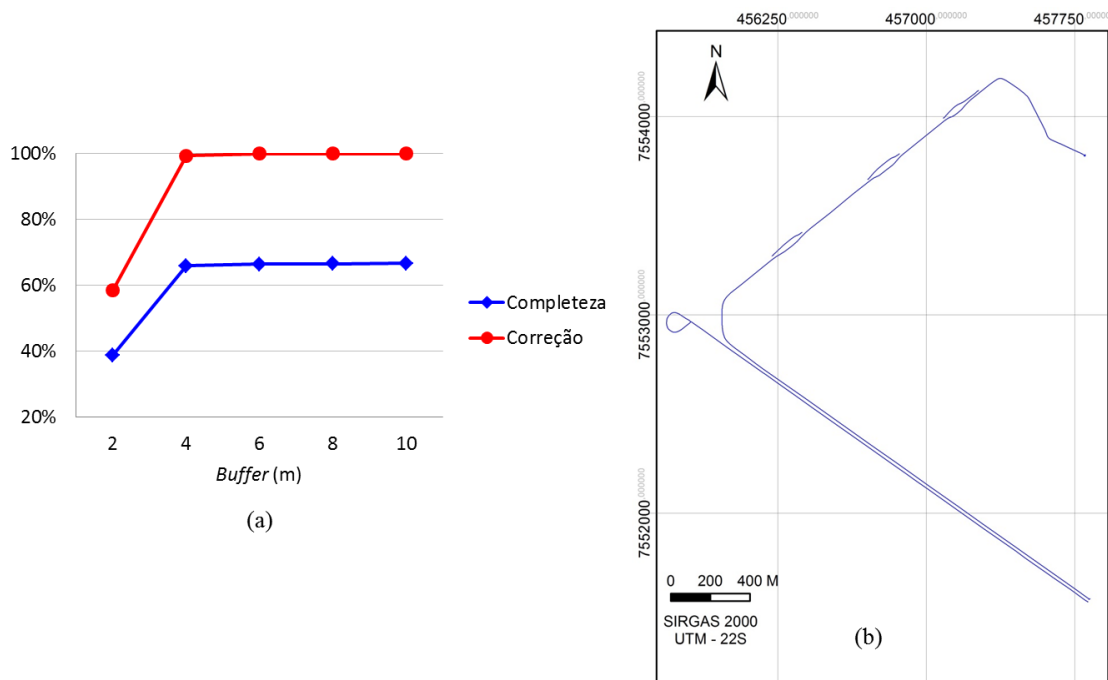
A exclusão do segmento de rodovia que culminou na completeza alcançada esta associada com a baixa densidade de trajetórias que definem o mesmo (Figura 41d). Ressalta-se que o segmento não extraído é uma via com três faixas e a mudança do veículo entre as faixas, implica em uma menor probabilidade de trafegar sempre sobre a mesma, adquirindo assim trajetórias esparsas, contribuindo para que as frequências sejam menores.

Tabela 6 – Resultados obtidos a partir do subexperimento 1 para os indicadores completeza, correção e RMSE.

Buffer (m)	(ER $\cap$ buffer EE) m	(EE $\cap$ buffer ER) m	Completeza	Correção	RMSE (m)
2	4.876,696	4.867,036	38,78%	58,56%	1,552
4	8.283,890	8.252,845	65,88%	99,29%	
6	8.349,837	8.307,637	66,41%	99,95%	
8	8.368,602	8.308,534	66,56%	99,96%	
10	8.387,552	8.308,534	66,71%	99,96%	

Fonte: O autor (2021).

Figura 50 – Visualização dos resultados do subexperimento 1: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.



Fonte: O autor (2021).

A partir dos resultados obtidos com o segundo conjunto de parâmetros (Tabela 4), verificou-se para todos os valores de *buffer* um baixo valor de completeza, em média 37% (Tabela 7).

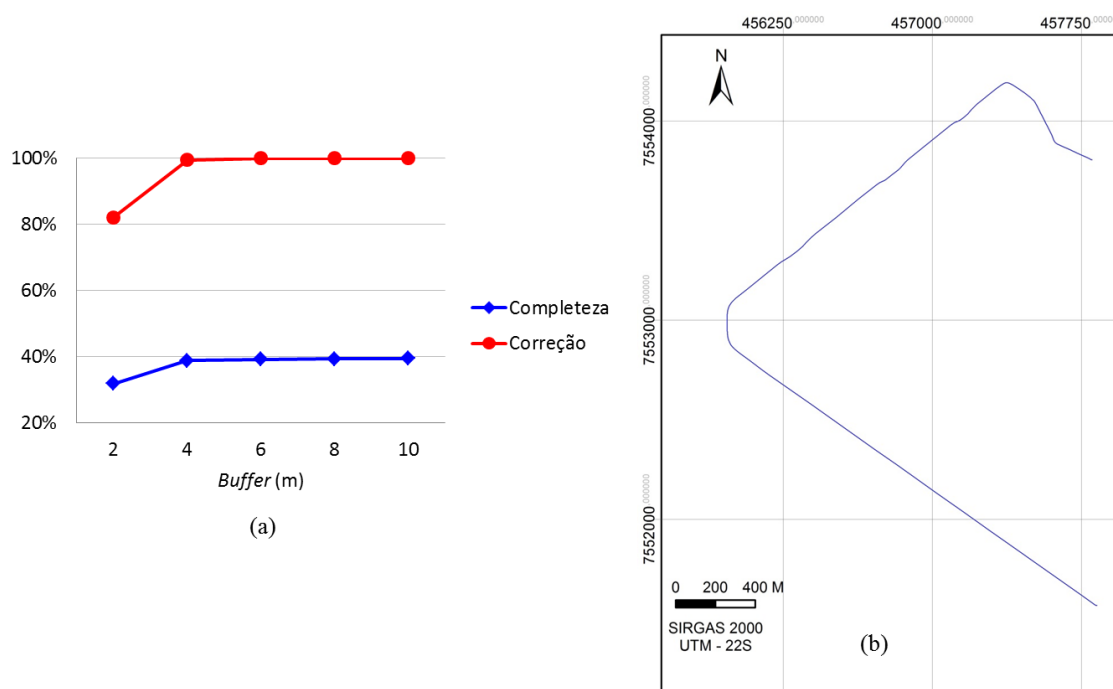
Tabela 7 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 2 para os indicadores completudeza, correção e RMSE.

Buffer (m)	$(ER \cap \text{buffer EE})$ m	$(EE \cap \text{buffer ER})$ m	Completeness	Correção	RMSE (m)
2	4.003,579	3.990,701	31,84%	82,08%	1,038
4	4.875,345	4.836,701	38,77%	99,48%	
6	4.918,349	4.861,323	39,12%	99,99%	
8	4.935,996	4.861,323	39,26%	99,99%	
10	4.953,084	4.861,323	39,39%	99,99%	

Fonte: O autor (2021).

A Figura 51b apresenta o motivo do alto nível de exclusão, na qual se verifica que grandes segmentos de vias foram excluídos, se mantendo apenas o segmento com maior densidade de trajetórias (Figuras 41c, 41d e 41e), onde a imagem registrou maior frequência (Figura 42). De forma análoga ao experimento anterior, o indicador correção atinge praticamente seu valor máximo a partir do *buffer* de 4 m, ou seja, demonstrando que a qualidade do eixo extraído pode ser considerada boa, havendo poucas inclusões de segmentos indesejáveis.

Figura 51 - Visualização dos resultados do subexperimento 2: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.



Fonte: O autor (2021).

No entanto, quando analisado os resultados obtidos para o *buffer* de 2 m, em relação ao primeiro subexperimento (Tabela 6), verifica-se uma superioridade em termos de correção, quando concomitantemente é observado um baixo valor de completudeza. Essa

superioridade ocorre, pois a segunda parametrização contribuiu para detecção apenas do segmento com maior densidade de trajetórias, provavelmente o segmento mais preciso, se analisarmos o comportamento dos perfis traçados perpendicularmente a rodovia (Figuras 43, 44 e 45).

Essa suposição é reforçada pelo valor de RMSE alcançado, ou seja, a acurácia da extração, visto que foi superior no segundo subexperimento (1,038 m) em relação ao primeiro (1,552 m), pois o mesmo detectou apenas o segmento mais preciso (maior densidade) que mais se aproxima geometricamente do eixo de referência (maior acurácia).

Os parâmetros do terceiro experimento foram determinados automaticamente pelo *software* (Tabela 4), sendo os resultados (Tabela 8) semelhantes aos resultados do primeiro (Tabela 6). A alteração dos limiares de histerese aumentou consideravelmente a quantidade de segmentos extraídos, atingindo valores de completeza superiores em todos os *buffers* em relação às duas análises anteriores (Figura 52a). Esse aumento se deve à detecção de segmentos que se encontram na área urbana, correspondente a região destacada na Figura 41c, como pode ser observado na Figura 52b. De modo análogo aos experimentos anteriores, os valores de correção atingem praticamente a qualidade máxima a partir do *buffer* de 4 m.

Tabela 8 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 3 para os indicadores completeza, correção e RMSE.

Buffer (m)	$(ER \cap \text{buffer } EE) \text{ m}$	$(EE \cap \text{buffer } ER) \text{ m}$	Completeza	Correção	RMSE (m)
2	5.805,972	5.800,069	46,18%	57,73%	1,520
4	9.780,004	9.758,928	77,78%	97,14%	
6	10.121,015	9.997,196	80,49%	99,51%	
8	10.285,572	10.037,160	81,80%	99,91%	
10	10.374,127	10.042,567	82,51%	99,96%	

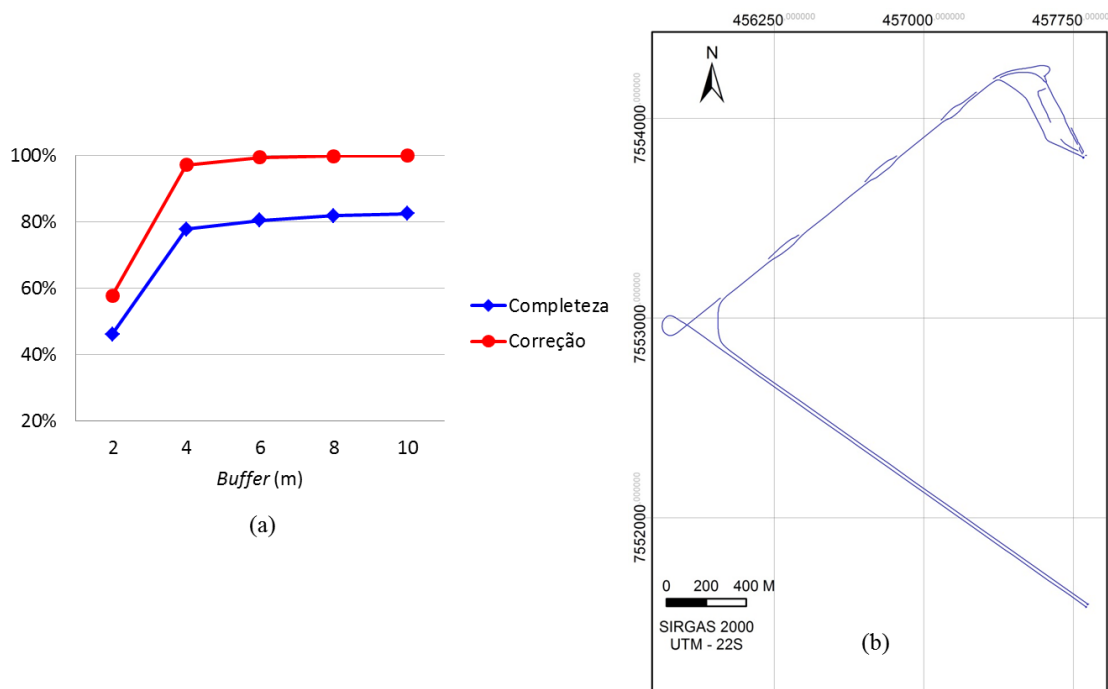
Fonte: O autor (2021).

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para o quarto conjunto de parâmetros testados. Em relação ao subexperimento 1, o valor do fator de escala gaussiano foi alterado de 3,46 para 2,31, sendo considerado para linhas com largura de 8 pixels, ou seja, capaz de detectar linhas mais finas. Os limiares de histerese foram mantidos iguais aos do primeiro subexperimento (Tabela 4).

A partir do gráfico presente na Figura 53a, verifica-se que os valores de completeza aumentaram significativamente, fato que pode ser explicado pela análise visual da extração (Figura 53b), na qual é observado que um grande segmento não detectado no

subexperimento 1 foi extraído com a utilização de um σ menor, bem como alguns segmentos de vias presentes na área urbana.

Figura 52 - Visualização dos resultados do subexperimento 3: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.



Fonte: O autor (2021).

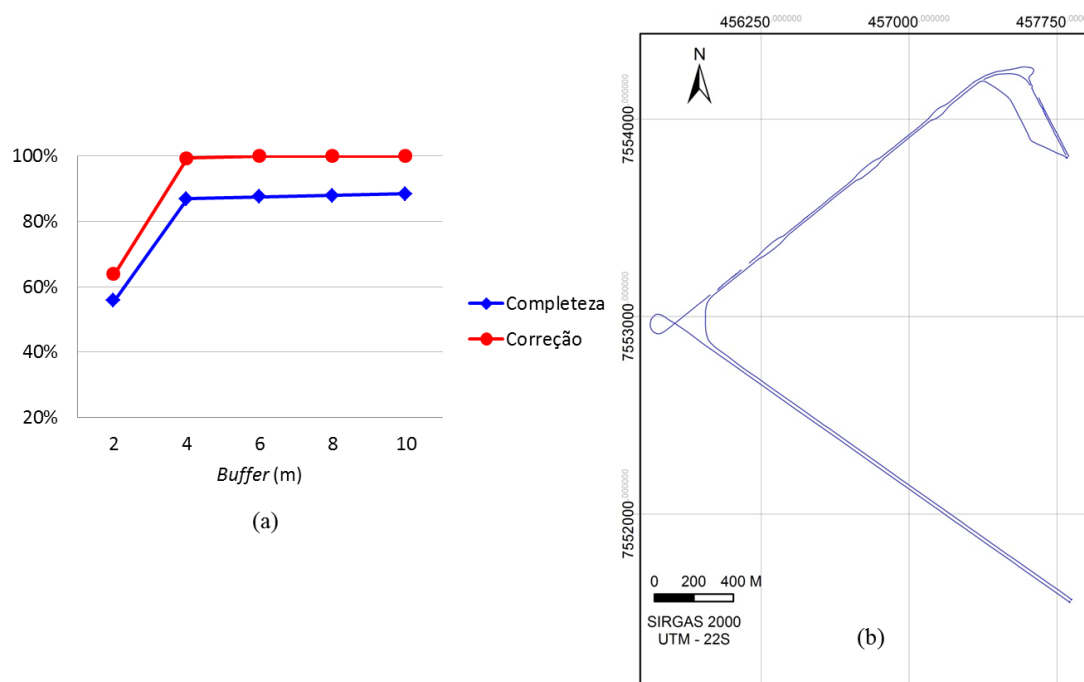
É interessante destacar que a partir do *buffer* de 4 m, os valores de correção se matem altos em todos os subexperimentos. Essa ocorrência se deve a utilização de uma imagem de frequência, gerada a partir de um conjunto de trajetórias GNSS que descrevem apenas as rodovias. Deste modo, apenas a feição de interesse é representada, facilitando a operação do extrator de linhas, visto que não há outros elementos lineares para serem detectados, diferentemente do que ocorre com imagens orbitais e/ou aéreas. Assim o índice de correção atinge valores da ordem de 99,9%.

Tabela 9 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 4 para os indicadores completudeza, correção e RMSE.

Buffer (m)	$(ER \cap \text{buffer EE})$ m	$(EE \cap \text{buffer ER})$ m	Completeness	Correção	RMSE (m)
2	7.007,966	7.041,940	55,73%	63,86%	1,418
4	10.925,058	10.960,253	86,89%	99,39%	
6	11.004,340	11.025,394	87,52%	99,98%	
8	11.045,566	11.025,992	87,85%	99,98%	
10	11.116,787	11.025,992	88,41%	99,98%	

Fonte: O autor (2021).

Figura 53 - Visualização dos resultados do subexperimento 4: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.



Fonte: O autor (2021).

A Tabela 10 apresenta os resultados alcançados para o subexperimento 5. A partir da Figura 54a é possível verificar baixos valores para o índice de completude, um pouco superior aos valores encontrados no segundo experimento (Tabela 7), o que é justificado pela detecção de um grande segmento (Figura 54b) não extraído na segunda parametrização.

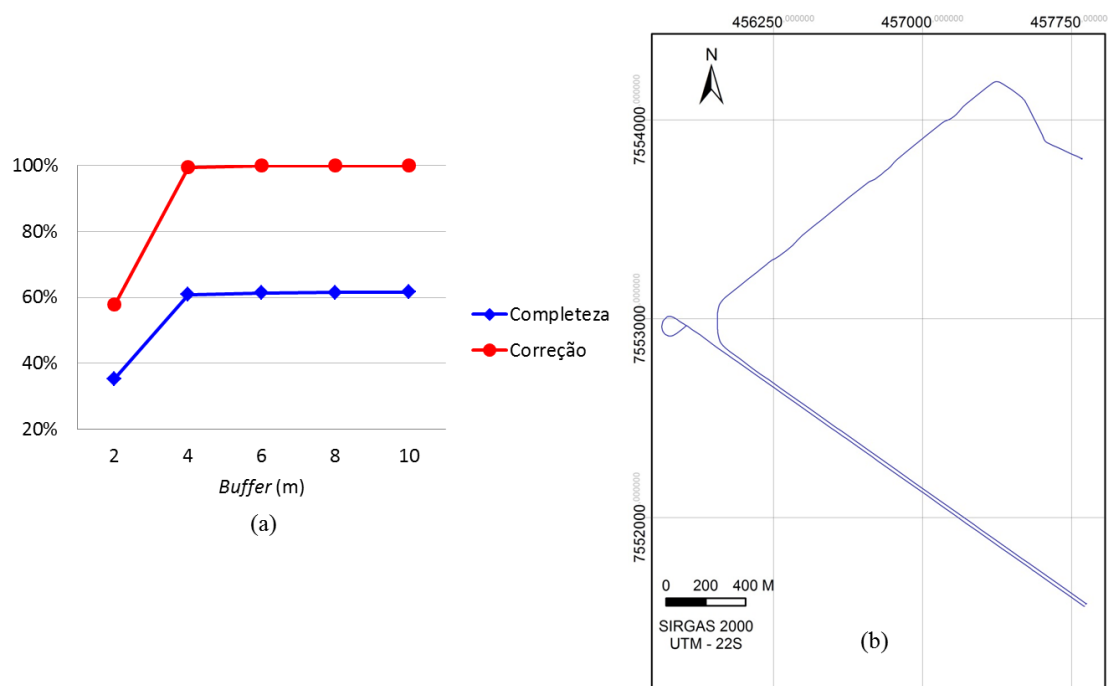
Tabela 10 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 5 para os indicadores de completude, correção e RMSE.

Buffer (m)	$(ER \cap \text{buffer } EE) \text{ m}$	$(EE \cap \text{buffer } ER) \text{ m}$	Completeness	Correção	RMSE (m)
2	4.440,574	4.430,043	35,32%	57,78%	1,497
4	7.650,227	7.623,041	60,84%	99,42%	
6	7.713,054	7.665,542	61,34%	99,98%	
8	7.733,630	7.665,542	61,51%	99,98%	
10	7.752,720	7.665,542	61,66%	99,98%	

Fonte: O autor (2021).

Com as análises quantitativas e qualitativas realizadas até o presente momento, constata-se que quando se utiliza valores altos para os limites de histerese, rodovias com menos trajetórias (menor frequência) não são detectadas. Isso ocorre porque ficam todas retidas no plano inferior de limiarização, sendo consideradas como ruídos indesejáveis, permanecendo apenas as linhas principais, respeitando a largura estipulada através do fator de escala gaussiano.

Figura 54 - Visualização dos resultados do subexperimento 5: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.



Fonte: O autor (2021).

Por fim, a última parametrização considerada foi responsável pelos maiores valores de completeza (Tabela 11), ou seja, a maioria dos segmentos foi detectada. Analisando a Figura 55b observa-se que as vias presentes na região urbana foram detectadas quase que por completo, além disso, um novo segmento foi extraído, sendo que o mesmo não havia sido detectado em nenhum dos experimentos anteriores.

A partir da Figura 55a, observa-se que os valores de correção se mantiveram altos, principalmente pelo motivo explicado anteriormente. No entanto, a partir do *buffer* de 4 m, notam-se valores um pouco abaixo dos encontrados nos experimentos anteriores. Essa pequena redução indica que houve a inserção de segmentos indesejáveis.

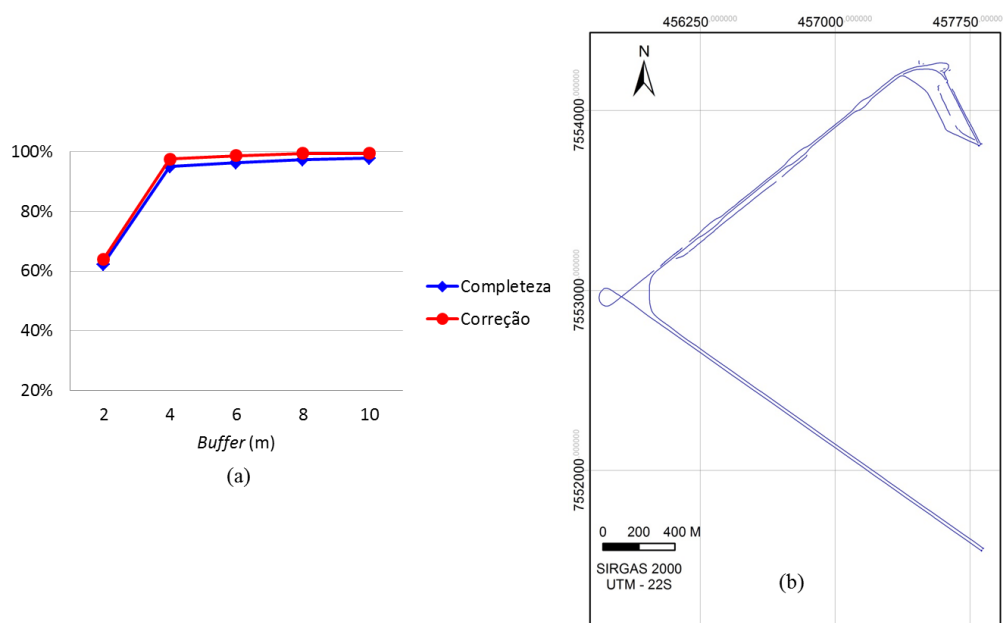
A Figura 55b apresenta um trecho da área urbana, na qual é possível verificar a presença de pequenos segmentos que, originalmente, não fazem parte do trajeto percorrido. Deve-se atentar que os mesmos se situam em uma região de rotatória, onde a velocidade do veículo diminui podendo haver até a parada do mesmo, devido à presença de semáforos. Quando o veículo para de se locomover, o dispositivo continua coletando com taxa de amostragem de 1 segundo, fazendo com que novos pontos sejam rastreados em diferentes posições devido aos erros inerentes ao método de posicionamento por ponto simples. Assim, as trajetórias descrevem segmentos espúrios.

Tabela 11 - Resultados obtidos a partir do subexperimento 6 para os indicadores completudeza, correção e RMSE.

Buffer (m)	$(ER \cap \text{buffer EE}) \text{ m}$	$(EE \cap \text{buffer ER}) \text{ m}$	Completez	Correção	RMSE (m)
2	7.818,186	7.866,285	62,18%	63,93%	1,392
4	11.955,222	12.003,003	95,08%	97,55%	
6	12.111,357	12.148,083	96,32%	98,73%	
8	12.228,804	12.236,423	97,26%	99,45%	
10	12.292,089	12.244,796	97,76%	99,52%	

Fonte: O autor (2021).

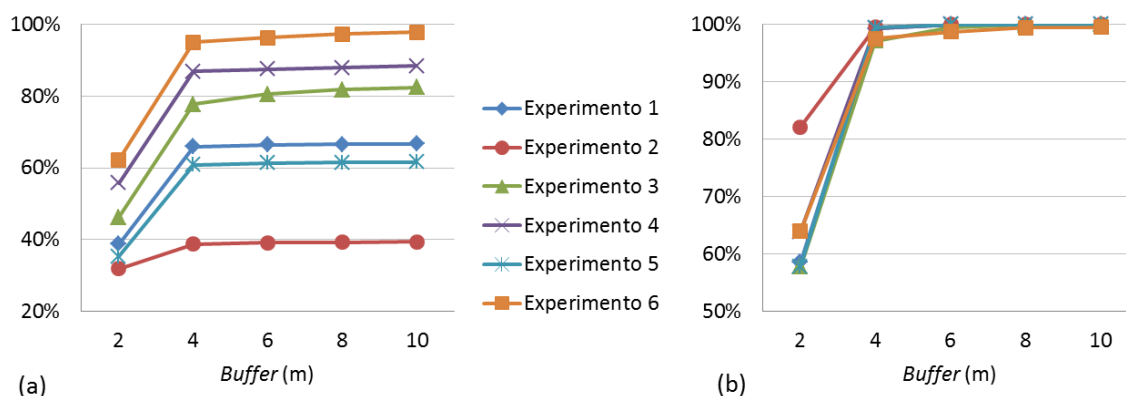
Figura 55 - Visualização dos resultados do subexperimento 6: (a) Análise quantitativa; e (b) Análise qualitativa.



Fonte: O autor (2021).

A Figura 56 resume os valores de completudeza e correção obtidos após a realização dos seis subexperimentos.

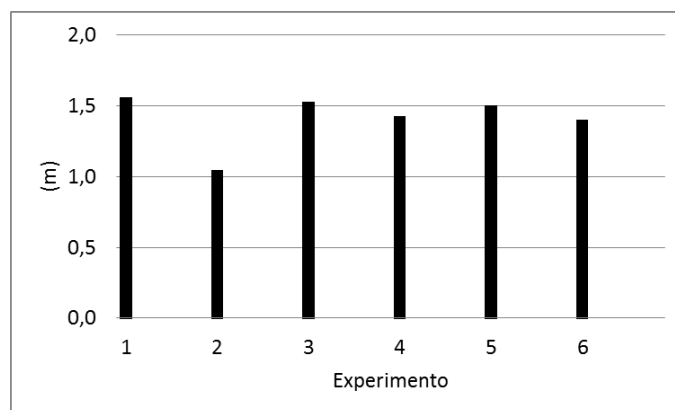
Figura 56 – Visualização dos indicadores de qualidade para os 6 subexperimentos: (a) Completudeza; e (b) Correção.



Fonte: O autor (2021).

Obteve-se uma acurácia de aproximadamente 1,50 m para os experimentos realizados (Figura 57), a não ser para o experimento 2, no qual foi extraído apenas o segmento com maior número de trajetórias GNSS, sendo assim o mais preciso, bem como o mais acurado.

Figura 57 – Acurácia geométrica (RMSE) obtida para cada um dos 6 subexperimentos realizados.



Fonte: O autor (2021).

Comparando os valores obtidos de RMSE com os limiares contidos no PEC-PCD) (ET-ADGV DEFESA F TER, 2016), constata-se que todos os experimentos se enquadram na classe A para a escala 1:10.000, o que permite concluir que os dados extraídos podem ser empregados em projetos de mapeamento de escala 1:10.000 e menores, visto que o Erro Padrão (EP) foi menor que 1,70 m (Figura 58).

Figura 58 - Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais.

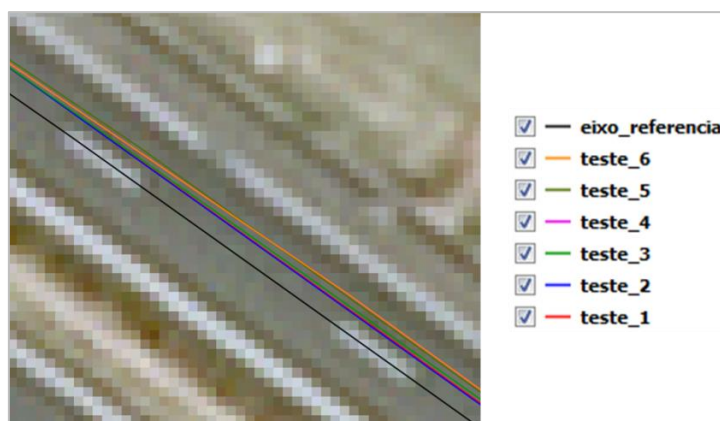
PEC - PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A ⁽²⁾	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
B ⁽¹⁾	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
C ⁽¹⁾	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
D ⁽¹⁾	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

(1) Valores determinados, ou adaptados, com base nos valores do PEC Planimétrico previstos no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984. (2) Produtos Cartográficos Digitais, baseado nos valores utilizados pelo “*Ordinance Survey*” e “*National Joint Utilities Group*” do Reino Unido, extraídos de ARIZA (2002, pág. 87, no qual Exatidão Cartográfica = 0,28 mm na escala do produto cartográfico e EP = 0,17 mm na escala do produto cartográfico). Fonte: ET-ADGV DEFESA F Ter (2016).

A partir da Figura 59 é possível notar um deslocamento entre o eixo de referência e os eixos extraídos, indicando uma certa tendência. Esse deslocamento pode ser explicado pela quantidade de tempo que o veículo se mantém na faixa da direita, faixa com a maior concentração de trajetórias.

Logo, é esperado que o pico da curva gaussiana ocorra na faixa da direita, estando, assim, compatível com a posição dos eixos detectados (Figura 59), sendo esse um dos possíveis motivos para a acurácia média de 1,4 m, além de outros fatores, como: regiões com baixa densidade, onde não se tem um perfil bem definido; bem como a presença de erros sistemáticos inerentes ao método de posicionamento por ponto.

Figura 59 – Influência de se manter a maior parte do tempo na faixa direita.



Fonte: O autor (2021).

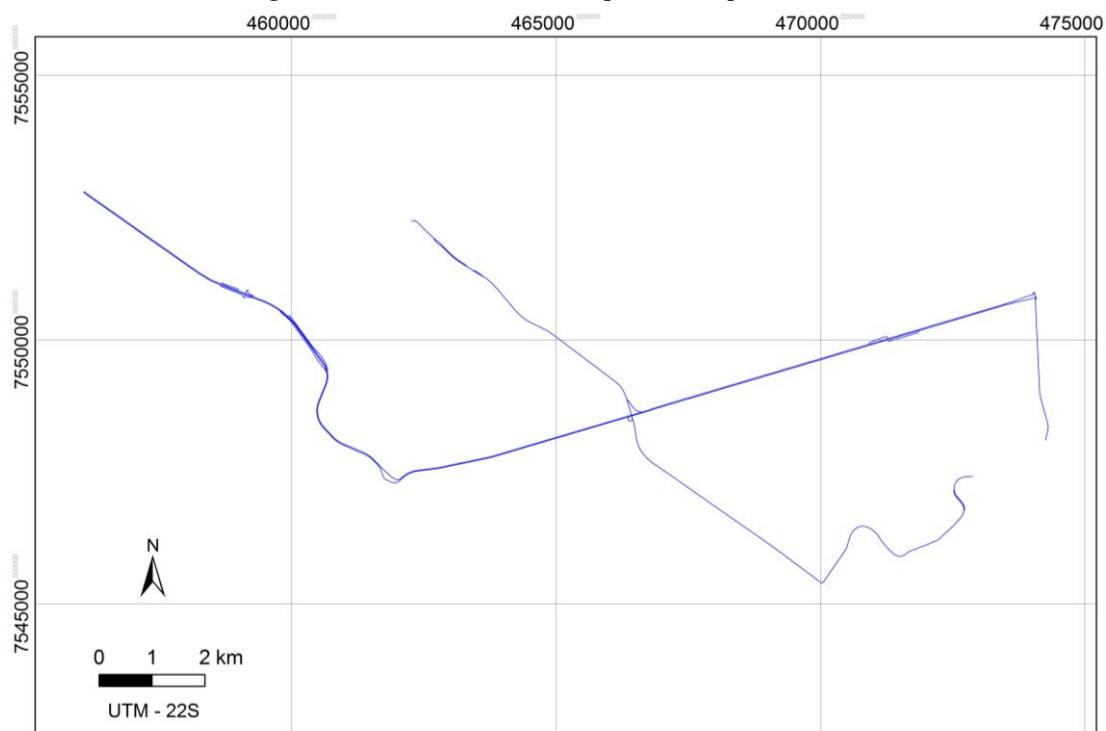
5.2. Experimento II – Extração de rodovias de faixas simples e duplas

A comparação entre o eixo resultante da extração (Figura 60) (comprimento de 68.088,842 m) com o eixo de referência (Figura 47) (comprimento de 69.351,197 m) permitiu obter os indicadores quantitativos completude, correção e RMSE.

Analizando qualitativamente a Figura 60, verifica-se que praticamente todos os segmentos foram extraídos, o que é reforçado pela Tabela 12 na qual são apresentados altos valores de completude e correção para os *buffers* de 4, 6, 8 e 10 m, sendo os mesmos representados na Figura 61. Constata-se que a partir do *buffer* de 8 m se obteve valores de completude acima de 98% e de correção superior a 99%.

Conforme descrito anteriormente o indicador completude quantifica o percentual das vias que foram detectadas, enquanto que o indicador correção avalia a qualidade do que foi extraído (nível de inclusão). Assim, pode-se concluir que pouquíssimos segmentos não foram extraídos (1,19%), e os que foram corretamente detectados apresentam ótima qualidade (99,88%).

Figura 60 – Rodovias extraídas a partir do experimento II.



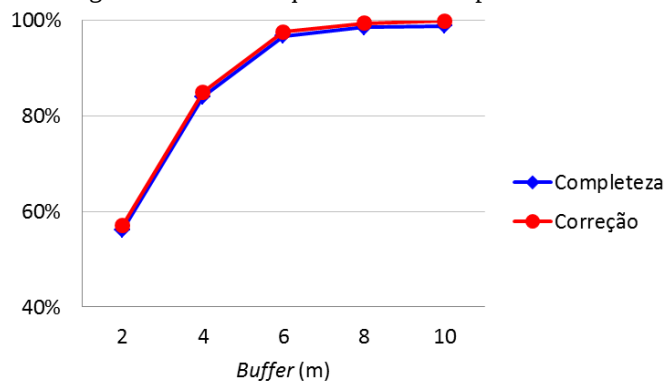
Fonte: O autor (2021).

Tabela 12 – Resultados obtidos a partir do experimento II para os indicadores completeza e correção.

Buffer (m)	$(ER \cap \text{buffer EE})$ m	$(EE \cap \text{buffer ER})$ m	Completeza	Correção
2	38926,759	38869,287	56,13%	57,09%
4	58259,508	57887,766	84,01%	85,02%
6	67074,447	66451,070	96,72%	97,59%
8	68372,098	67682,495	98,59%	99,40%
10	68525,156	68005,106	98,81%	99,88%

Fonte: O autor (2021).

Figura 61 – Análise quantitativa do experimento II.



Fonte: O autor (2021).

A Figura 62 destaca algumas regiões da extração, juntamente com o eixo de referência e as trajetórias GNSS, que ajudam a interpretar os valores de completeza e correção

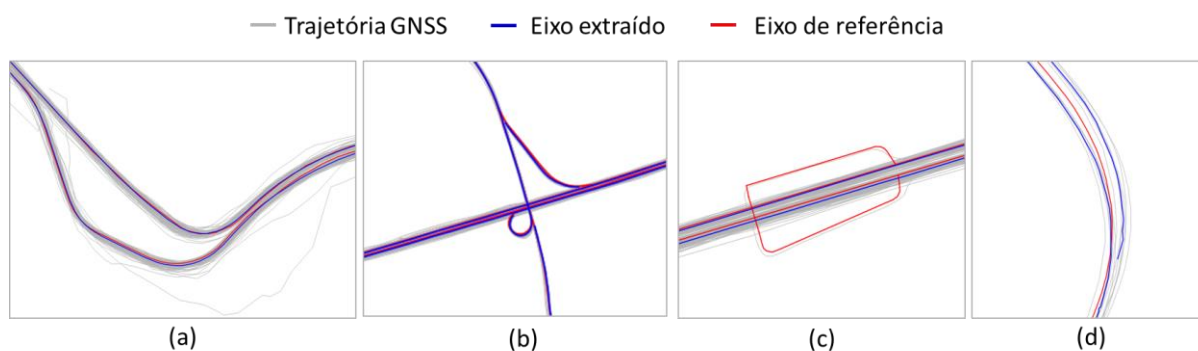
apresentados na Tabela 12. O alto valor de completeza alcançado se deve à alta densidade de trajetórias sobre as rodovias percorridas, sendo que há trechos com até 490 trajetórias (Figura 24). As Figuras 62a e 62b exemplificam casos de sucesso, mesmo com a presença de algumas trajetórias espúrias (Figura 62a) o eixo foi extraído de forma coerente, acompanhando o eixo de referência.

Além disso, regiões com geometria mais complexa (trevos, cruzamentos, rotatórias) foram bem reconstruídos (Figura 62b). Os valores de completeza só não foram melhores pois alguns segmentos não foram extraídos, em particular os trechos de rodovia que foram percorridos apenas uma ou duas vezes, como mostrado na Figura 62c. Em relação ao valor do indicador correção, o mesmo não atingiu o valor máximo (100%), pois houve a inserção de um segmento na extração (Figura 62d). Por se tratar de um trecho da rodovia do tipo simples, com menor fluxo, as trajetórias se acumularam em dois pontos distintos, o que fez com que dois picos se formassem e fossem extraídos, ficando incoerente com o eixo de referência.

Figura 62 - Exemplo de regiões com extração correta e regiões com erros na detecção (experimento II): (a)

Apesar de algumas trajetórias espúrias o eixo foi bem extraído devido à alta densidade de trajetórias; (b)

Extração correta em um trevo, destaque para a conexão de vias do tipo simples e duplas; (c) Segmento não detectado, visto que o retorno foi percorrido apenas uma vez, ou seja, baixa densidade; e (d) Inclusão de um segmento devido à baixa densidade de trajetórias GNSS na região.



Fonte: O autor (2021).

Conforme explicado na Subseção 4.2, a análise da acurácia a partir do RMSE, foi realizada por trechos (Figura 47). Após a segmentação do eixo extraído com espaçamento de 1 m para o cálculo das discrepâncias (d_i) em relação ao eixo de referência, obteve-se: a discrepância mínima (Min) e máxima (Max), a média, o desvio-padrão (precisão) e o RMSE (acurácia) (Tabela 13).

Tabela 13 – Valores mínimo, máximo, média, precisão e acurácia obtidos para o experimento II.

Trecho	Min (m)	Max (m)	Média (m)	Desvio-padrão (m)	RMSE (m)	nº pontos
1	0,0007	2,1003	0,4988	0,3897	0,6330	2664
2	0,0002	10,672	2,3938	2,3216	3,3346	10422
3	0,0004	3,0241	1,2347	0,7270	1,4328	4501
4	0,0005	5,6471	1,7518	1,0857	2,0610	17452

Fonte: O autor (2021).

A partir da Tabela 13, verifica-se que o trecho 1 foi o mais preciso, bem como o que apresentou maior acurácia geométrica. Esse resultado está diretamente relacionado com o tipo da rodovia bem como com o número de vezes que a mesma foi percorrida. O trecho 1 é uma rodovia vicinal de faixa simples, sendo também a mais trafegada, ou seja, maior densidade de trajetórias GNSS, como pode ser observado na Figura 63a. A Figura 64a apresenta um perfil perpendicular ao trecho 1 sobre a imagem de frequência, na qual fica claro o comportamento de acordo com a curva gaussiana, bem como as altas frequências registradas. Comparando a acurácia geométrica (0,633 m) com o PEC-PCD (Figura 58) verifica-se que a extração tem qualidade suficiente para atender projetos de mapeamento classe A na escala 1:5.000 ($EP = 0,85$ m) e menores.

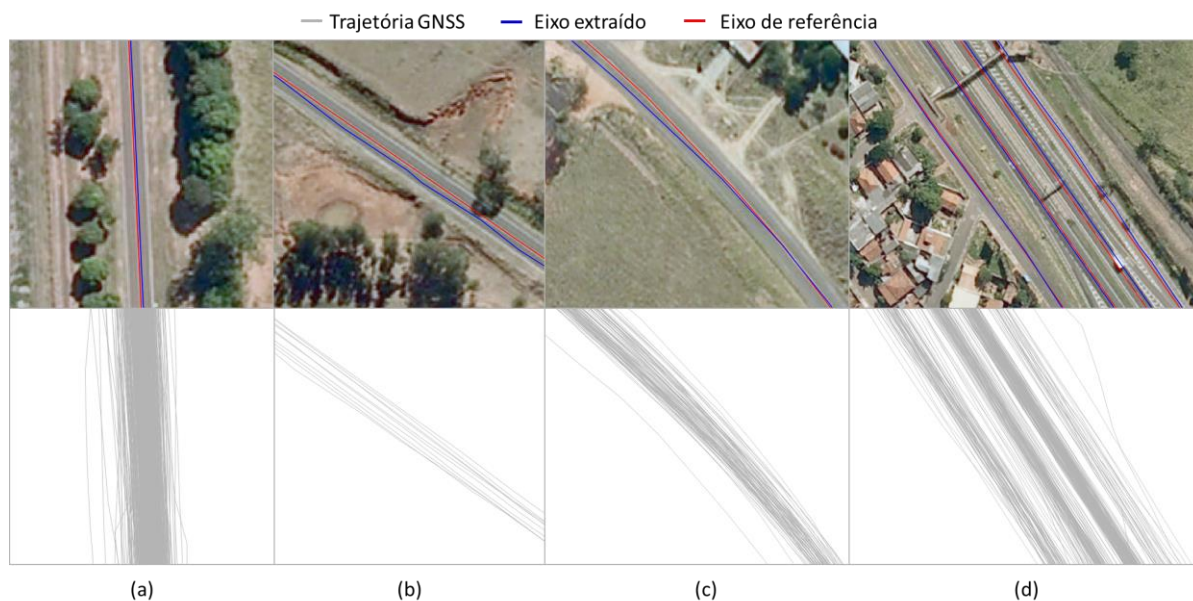
Os piores resultados em termos de precisão e acurácia foram obtidos no trecho 2, visto que apesar de ser um trecho de faixa simples, o mesmo foi percorrido poucas vezes, como pode ser observado na Figura 63b. Em relação aos valores do PEC-PCD a acurácia alcançada (3,33 m) possibilita o emprego da extração em projetos de mapeamento em escala 1:25.000 ($EP = 4,25$ m) e menores.

O trecho 3 apresentou acurácia semelhante ao experimento I (Subseção 5.1), ou seja, superior ao trecho 2 e inferior ao trecho 1. Analisando a Figura 63c é possível notar a presença de um número de trajetórias maior que no trecho 2 (Figura 63b), bem como uma menor densidade de trajetórias quando comparado ao trecho 1 (Figura 63a). Logo, pode-se afirmar que a acurácia geométrica da extração, assim como a precisão, está diretamente relacionado com o número de trajetórias GNSS coletadas sobre a rodovia. Confrontando a acurácia obtida (1,432 m) com o PEC-PCD, observa-se que a extração tem qualidade suficiente para atender projetos de mapeamento classe A na escala 1:10.000 ($EP = 1,70$ m).

Por fim, o trecho 4 apresentou acurácia de 2,06 m, podendo assim ser empregado em projetos de mapeamento em escala 1:25.000 e menores, de acordo com o PEC-PCD ($EP = 4,25$ m). Analisando a Figura 63d, constata-se a presença de segmentos de rodovia com diferentes densidades, o que não prejudicou a eficácia do método, visto que a rodovia

principal, bem como os acessos secundários foram detectados. O perfil apresentado na Figura 64b ajuda a compreender a análise anterior, pois é possível observar a presença de quatro picos (distribuição multimodal) com diferentes formas, sendo que um deles possui maior frequência em relação aos demais, o que caracteriza melhor precisão e acurácia.

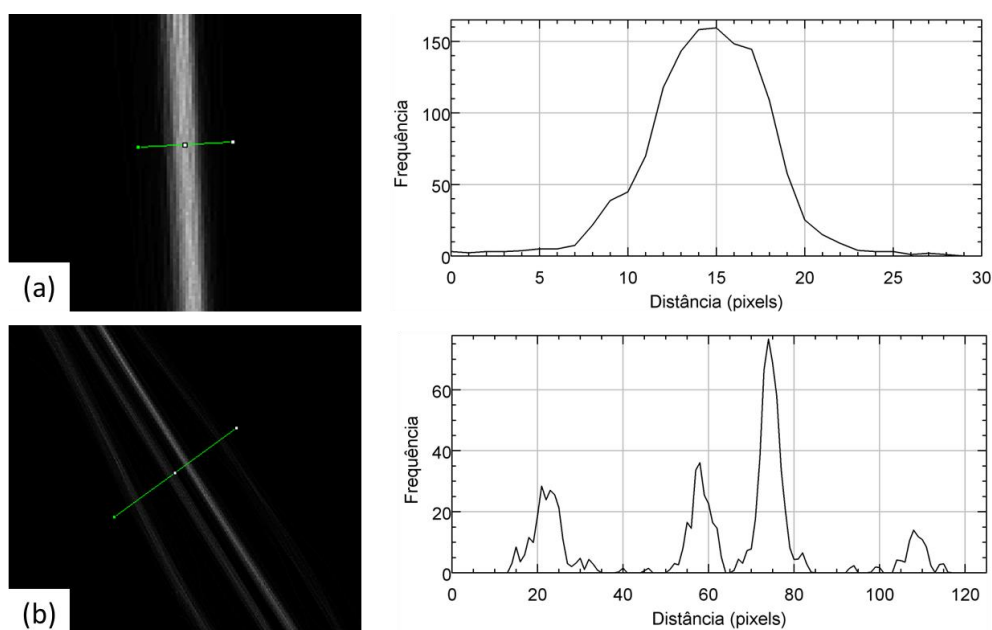
Figura 63 - Relação entre a acurácia, tipo de rodovia (faixa simples ou dupla) e a densidade de trajetórias GNSS: (a) Trecho 1; (b) Trecho 2; (c) Trecho 3; e (d) Trecho 4.



Fonte: O autor (2021).

Figura 64 - Análise do perfil traçado transversalmente as rodovias na imagem de frequência gerada: (a) Trecho da imagem de frequência correspondente à Figura 63a; e (b) Trecho da imagem de frequência correspondente à

Figura 63d.



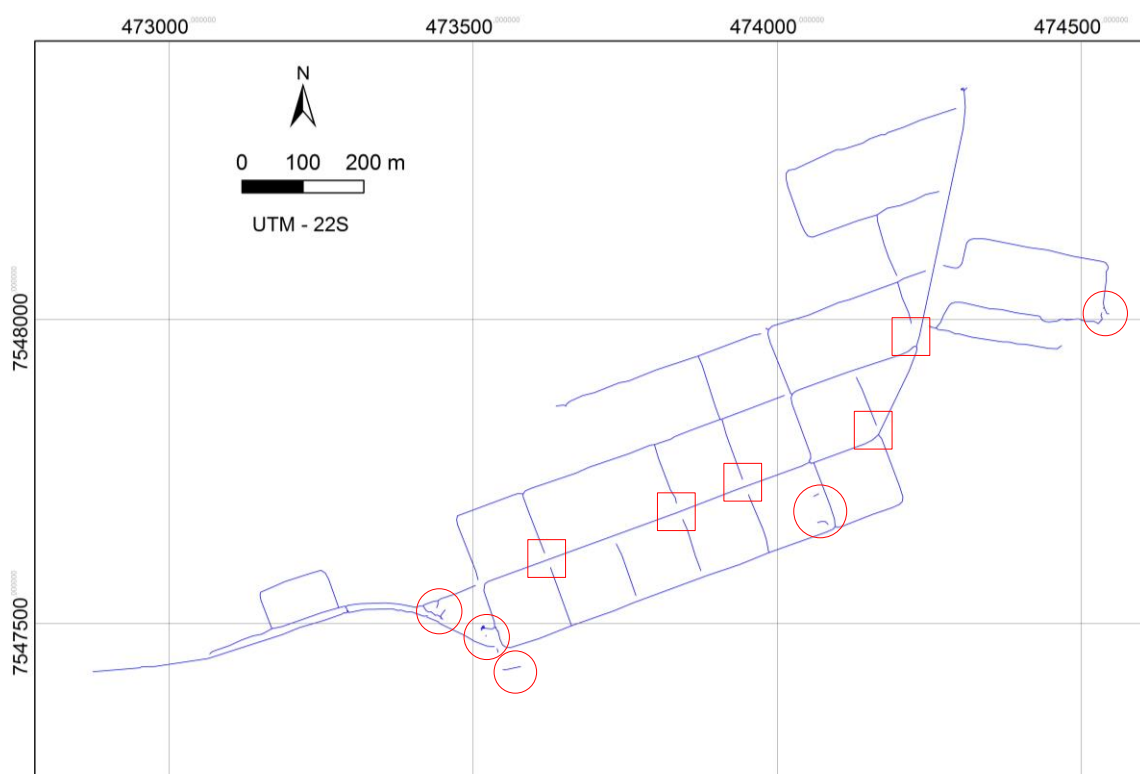
Fonte: O autor (2021).

5.3. Experimento III – Extração de vias urbanas

A Figura 65 apresenta as vias urbanas extraídas, na qual é possível verificar alguns segmentos espúrios (círculos em vermelho), bem como segmentos que não foram conectados em locais de cruzamento entre as vias (retângulos em vermelho). No entanto, após a aplicação das funções *select_contours_xld* e *union_adjacent_contours_xld*, todos os segmentos espúrios foram eliminados e grande parte das intersecções foi corrigida, como pode ser observado na Figura 66.

O comprimento total dos eixos extraídos (Figura 66) foi de 8.246,755 m, o que representa uma grande parte se comparado com o eixo de referência (10.325,387 m) (Figura 37).

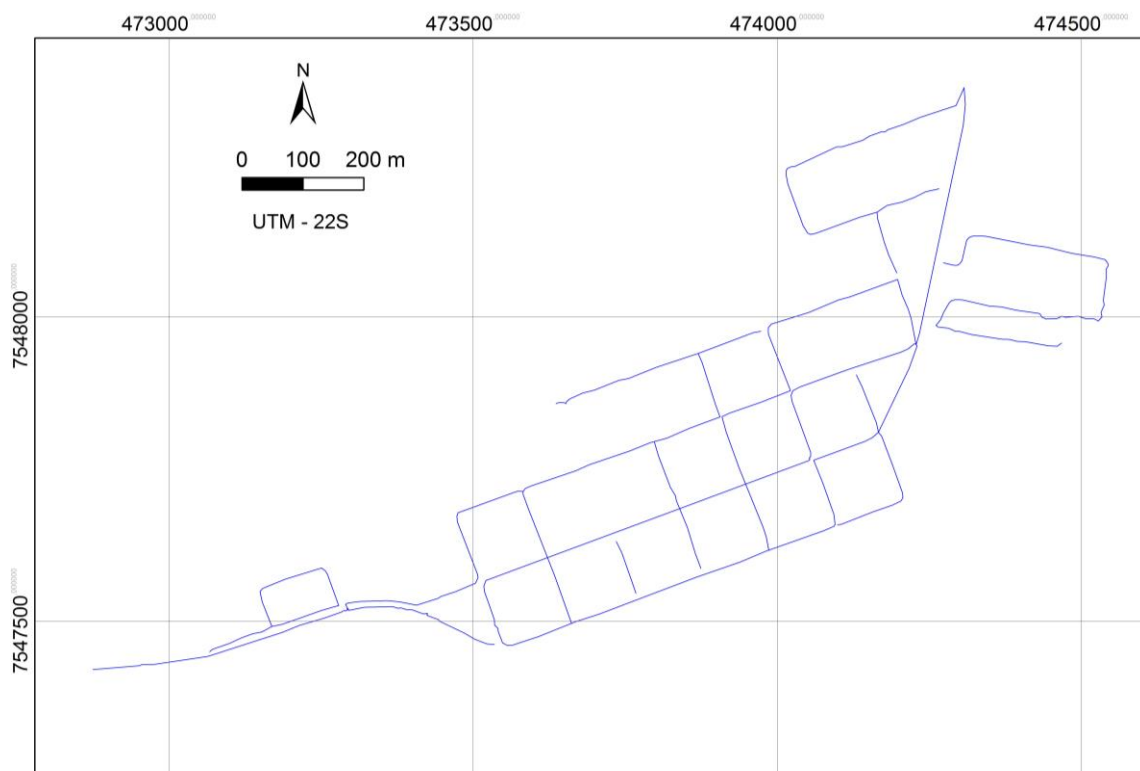
Figura 65 - Vias urbanas extraídas a partir do experimento III antes da aplicação das funções para eliminar segmentos espúrios e conectar as intersecções.



Fonte: O autor (2021).

A Tabela 14 apresenta os valores para as métricas completude e correção, sendo esses representados na Figura 67. Observa-se que a partir do *buffer* de 6 m se obtém ótimos valores para o indicador completude (acima de 80%), bem como para o indicador correção, que assume valores superiores a 99%.

Figura 66 - Vias urbanas extraídas a partir do experimento III após a aplicação das funções para eliminar segmentos espúrios e conectar as intersecções.



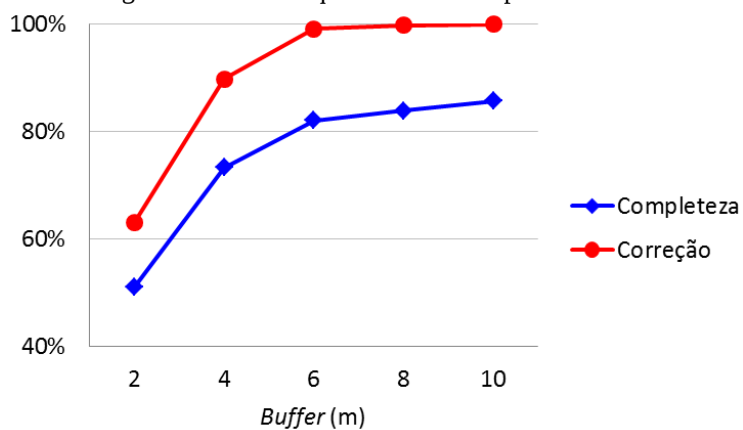
Fonte: O autor (2021).

Tabela 14 - Resultados obtidos a partir do experimento III para os indicadores completeza e correção.

Buffer (m)	$(ER \cap \text{buffer EE})$ m	$(EE \cap \text{buffer ER})$ m	Completeza	Correção
2	5.261,577	5.192,016	50,96%	62,96%
4	7.569,754	7.406,819	73,31%	89,81%
6	8.472,474	8.177,661	82,05%	99,16%
8	8.662,301	8.228,983	83,89%	99,78%
10	8.846,833	8.245,216	85,68%	99,98%

Fonte: O autor (2021).

Figura 67 - Análise quantitativa do experimento III.

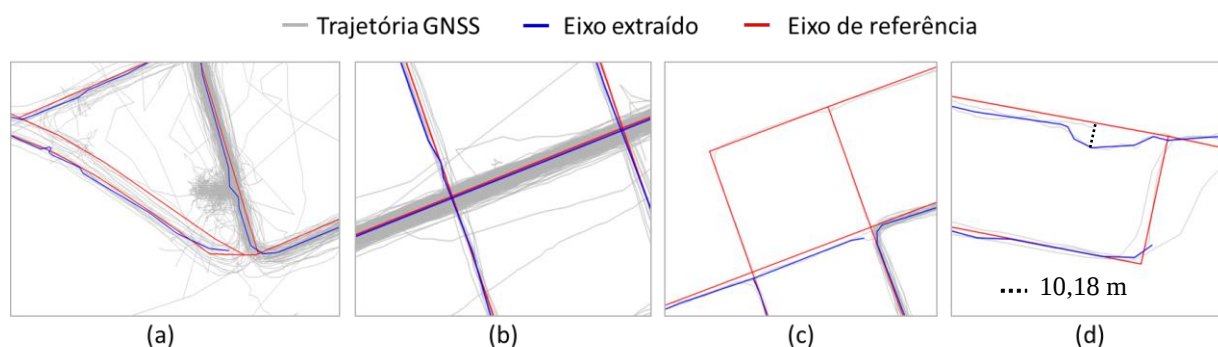


Fonte: O autor (2021).

O ótimo valor de correção encontrado se deve principalmente a realização da limpeza dos segmentos espúrios (falsos positivos) por meio da função *select_contours_xld*, visto que essa métrica quantifica o nível de inclusão. A Figura 68a reforça essa análise, na qual é possível verificar que apesar da grande concentração de trajetórias no local de início e término do rastreo GNSS com *smartphone*, apenas a via de interesse foi extraída.

A Figura 68b ajuda a compreender a importância da função de união, melhorando assim a extração nos pontos de intersecção entre vias, além disso, ao evitar as exclusões, a métrica completeza é beneficiada. O valor de completeza só não foi melhor, pois as vias que foram trafegadas apenas uma ou duas vezes não foram extraídas (Figura 68c).

Figura 68 - Exemplo de regiões com extração correta e regiões com erros na detecção (experimento III): (a) Vias bem detectadas apesar do elevado número de trajetórias GNSS espúrias, bem como a exclusão de uma via que foi percorrida poucas vezes; (b) Regiões de intersecção entre vias extraídas corretamente; (c) Vias que não foram detectadas devido à baixa densidade de trajetórias GNSS; e (d) Exemplo de via que foi detectada em uma região com poucas trajetórias, na qual o erro das mesmas impactou diretamente a qualidade geométrica da extração.



Fonte: O autor (2021).

A Tabela 15 apresenta os valores de precisão e acurácia do eixo reconstruído. Analisando o eixo extraído com o eixo de referência nota-se que a maioria das discrepâncias (d_i) foi menor que o valor de RMSE encontrado. No entanto houve a detecção de um segmento de via em uma região com poucas trajetórias (Figura 68d), sendo que este distanciava do eixo de referência em até 10,18 m (valor da discrepância máxima na Tabela 15), ou seja, a baixa densidade de trajetórias GNSS contribuiu para que a exatidão geométrica da extração fosse deteriorada.

Comparando a acurácia geométrica (2,385 m) com o PEC-PCD (Figura 58) verifica-se que a extração tem qualidade suficiente para atender projetos de mapeamento classe A na escala 1:25.000 ($EP = 4,25$ m) e menores.

Tabela 15 - Valores mínimo, máximo, média, precisão e acurácia obtidos para o experimento III.

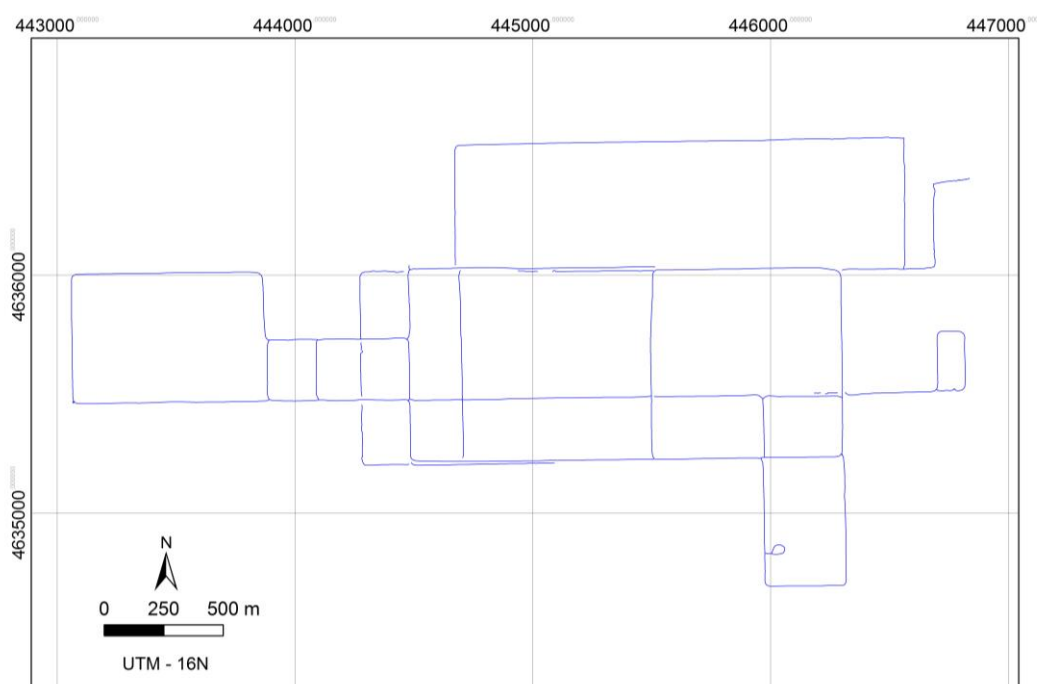
Min (m)	Max (m)	Média (m)	Desvio-padrão (m)	RMSE (m)	nº pontos
0,0008	10,188	1,9133	1,4252	2,3858	8429

Fonte: O autor (2021).

5.4. Experimento IV – Comparação de resultados

Conforme descrito na Subseção 4.4, o experimento 4.4 foi executado com o intuito de validar o potencial da metodologia proposta utilizando um *dataset* avaliado em outros trabalhos na literatura. Comparando qualitativamente o eixo extraído (Figura 69) com o eixo de referência (Figura 39), verifica-se que grande parte das vias urbanas foi extraída corretamente.

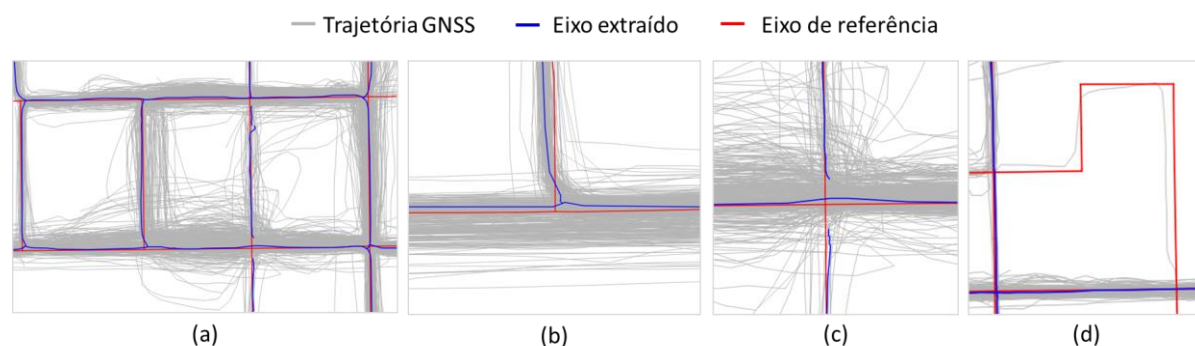
Figura 69 - Vias urbanas extraídas a partir do experimento IV.



Fonte: O autor (2021).

A Figura 70a mostra que a região com maior número de trajetórias espúrias (Figura 26) foi perfeitamente extraída, inclusive nas áreas de intersecção entre vias. As Figuras 70b e 70c apresentam, respectivamente, trechos em que as intersecções foram extraídas e conectadas corretamente, bem como onde a intersecção falhou. A Figura 70d, mostra um dos segmentos de via não detectado, simplesmente pelo fato do mesmo ter sido trafegado apenas uma vez.

Figura 70 - Exemplo de regiões com extração correta e regiões com erros na detecção (experimento IV): (a) Extração bem sucedida em uma região com várias trajetórias espúrias; (b) Intersecção extraída corretamente; (c) Problema na extração da intersecção; e (d) Trecho não detectado devido à baixa densidade de trajetórias.



Fonte: O autor (2021).

Em relação à análise quantitativa, a Tabela 16 apresenta os resultados para as métricas *recall*, *precision* e *F-score*, sendo estes visualizados na Figura 71. De modo geral, constata-se que a partir do *buffer* de 10 m os valores das métricas se estabilizam. É possível verificar altos valores para o indicador *precision*, atingido quase o valor ideal (1,00). Isso ocorre, pois essa métrica é igual ao indicador correção, ou seja, quantifica o nível de inclusão de segmentos, e de modo análogo aos experimentos anteriores ótimos resultados são encontrados, visto que a extração é realizada sobre uma imagem de frequência de trajetórias. No entanto, quando se analisa o indicador *recall*, observa-se que os valores são bem inferiores.

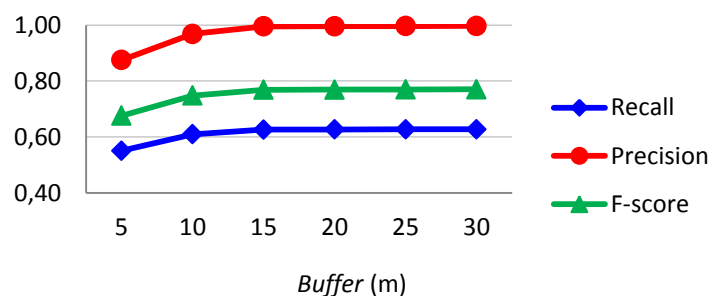
Logo a ausência de alguns segmentos extraídos em regiões com baixa densidade de trajetórias (Figura 70d) pode ser a principal causa da deterioração dos resultados obtidos, visto que essa métrica avalia proporção dos eixos extraídos corretamente, o que é reforçado quando confrontamos o comprimento do eixo extraído (21,88 km) com o comprimento do eixo de referência (34,76 km).

Tabela 16 - Resultados obtidos a partir do experimento IV para os indicadores *Recall*, *Precision* e *F-score*.

Buffer (m)	Comprimento ER (m)	Comprimento EE (m)	Recall	Precision	F-score
5	34.761,943	21.889,149	0,551	0,875	0,676
10			0,610	0,968	0,748
15			0,627	0,995	0,769
25			0,627	0,996	0,769
30			0,627	0,996	0,770

Fonte: O autor (2021).

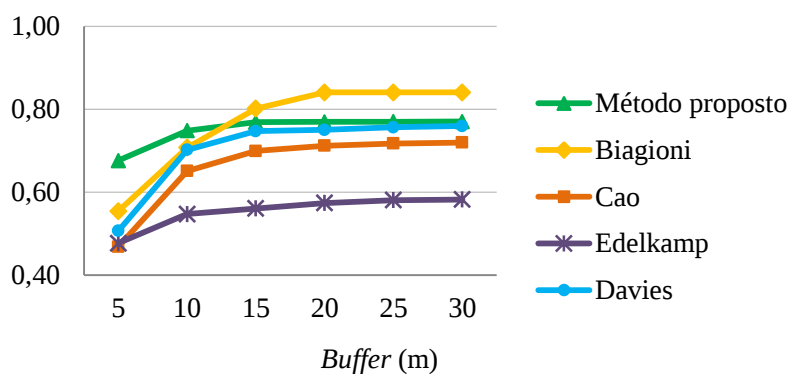
Figura 71 - Análise quantitativa do experimento IV.



Fonte: O autor (2021).

A partir do resultado obtido, foi possível comparar o método proposto com a análise realizada por Biagioni e Eriksson (2012). Observando a Figura 72, verifica-se que em termos de *F-score* o método proposto foi mais eficaz que os métodos de Cao, Edelkamp e Davies para todos os valores de *buffers* analisados (5, 10, 15, 20, 25 e 30 m). Se analisarmos apenas até o *buffer* de 10 m, conforme realizado nos experimentos I, II e III, os maiores valores de *F-score* são obtidos pelo método proposto, visto que os resultados obtidos por Biagioni passam a ser melhores para *buffers* acima de 13 m.

Uma análise interessante, é que os três melhores resultados (Método proposto, Davies e Biagioni) são obtidos pelos métodos que utilizam algum tipo de imagem (frequência, binária ou intensidade) gerada a partir das trajetórias GNSS como base para realizar a extração. Segundo Biagioni e Eriksson (2012) a conversão do conjunto de trajetórias GNSS em uma imagem traz uma série de benefícios, como a supressão de trajetórias espúrias e a determinação de um eixo preciso e acurado geometricamente, dependendo diretamente da quantidade de trajetórias. Essas vantagens foram observadas e apresentadas anteriormente, nos experimentos I, II e III.

Figura 72 - Comparação, em termos de *F-score*, entre o método proposto e os métodos apresentados no trabalho de Biagioni e Eriksson (2012).

Fonte: O autor (2021).

6. CONCLUSÕES

A partir da realização dos experimentos, constatou-se o alto potencial de utilização do detector de linhas de Steger para a extração de rodovias utilizando trajetórias GNSS densas. Conforme esperado, perfis traçados transversalmente às rodovias realmente apresentam comportamento similar à distribuição normal, sendo o pico da curva o ponto mais provável do eixo. Além disso, a forma do histograma permite inferir a precisão da extração, visto que regiões com mais trajetórias apresentam um histograma “afinado” (menor dispersão e maior precisão), enquanto que regiões com menos trajetórias são caracterizadas por um histograma “achatado” (maior dispersão e menor precisão).

O algoritmo elaborado para a transformação de coordenadas e geração da imagem de frequência foi de fundamental importância para a realização do método. Arquivos com elevado número de pontos foram processados e um bom desempenho computacional, em termos de tempo de processamento, foi observado. A limitação mais expressiva do método proposto se deve principalmente a geração da imagem em locais com baixa densidade de trajetórias, fato constatado pelas exclusões refletidas pelos valores do indicador completeza.

No entanto, reforçam-se as vantagens do método no que diz respeito à detecção apenas da feição de interesse, evitando oclusões, bem como a não extração de falsos positivos. A eficácia do mesmo é ressaltada pelos elevados valores de correção alcançados, acima de 98% para grande parte dos experimentos. Além disso, trata-se de um método de baixo custo, o qual se aproveita apenas do interesse e disponibilidade do usuário (indivíduo, empresa ou instituição) em adquirir as trajetórias GNSS e desenvolver uma aplicação para solucionar um determinado problema.

A realização de experimentos empregando diferentes combinações de parâmetros foi de fundamental importância para análise da influência dos mesmos sobre os resultados da extração. Além disso, a seleção de diferentes áreas de estudo, ambiente urbano e não urbano, contribuiu para identificar potenciais problemas. As análises a partir dos indicadores completeza e correção demonstraram que quanto maior o valor do fator de escala gaussiano, menor foram os limiares de histerese para que a maioria dos segmentos fosse extraída.

Em termos de exatidão geométrica, obteve-se uma acurácia média de 1,40 m para o primeiro experimento, considerando os seis subexperimentos. No segundo experimento obteve-se uma acurácia de 0,63 m, para um dos trechos analisados. O terceiro experimento foi

desenvolvido sobre uma região urbana, alcançando uma acurácia de 2,38 m. Os valores de precisão e acurácia estão relacionados à diferença de densidade em algumas regiões, bem como os erros envolvidos no posicionamento GNSS por ponto simples. No entanto, ressalta-se que uma trajetória isolada apresenta acurácia de aproximadamente 10 m.

A partir dos valores de RMSE obtidos para cada um dos três primeiros experimentos constatou-se que os eixos extraídos atendem a classe A para projetos de mapeamento nas escalas 1:5.000, 1:10.000 e 1:25.000, de acordo com o PEC-PCD. O último experimento (IV) permitiu entender a importância do método proposto, pois quando comparado com outros existentes na literatura, observou-se que o mesmo apresentou os melhores resultados para *buffers* de até 10 m. Portanto, os objetivos gerais e específicos propostos foram alcançados.

Em relação às recomendações para trabalhos futuros inúmeros aspectos podem ser abordados com base em um conjunto de trajetórias GNSS, entre estes, sugere-se a utilização da informação altimétrica (altitude geométrica ou elipsoidal) coletada, possibilitando assim a realização de uma extração tridimensional de rodovias. De modo análogo ao princípio adotado para a extração planimétrica, no qual perfis traçados transversalmente apresentam comportamento característico à distribuição estatística normal, espera-se que com uma grande quantidade de pontos com altitude geométrica conhecida seja possível estimar uma altitude média de alta qualidade. Uma possibilidade é ajustar uma superfície a partir desses pontos e juntamente com um modelo de ondulação geoidal, gerar um MDT.

Outra possibilidade é explorar os outros atributos também adquiridos e armazenados em conjunto com a informação posicional 3D das trajetórias GNSS, sendo estes: velocidade do veículo; tempo GPS; e informações sobre o posicionamento geodésico (HDOP (*Horizontal Dilution Of Precision*), VDOP (*Vertical Dilution Of Precision*), PDOP (*Position 3D Dilution Of Precision*)) e a constelação GNSS (número de satélites visíveis).

Com essas informações várias aplicações de SIG (Sistemas de Informação Geográfica) podem ser executadas, como exemplo: analisar regiões de redução de velocidade, podendo assim detectar cruzamento entre vias, semáforos e obstáculos em ambiente urbano, bem como alças de acesso, rotatórias e radares eletrônicos em rodovias; com a informação altimétrica é possível estimar a altura de pontes e viadutos, a partir de simples consultas espaciais; outra possível aplicação utilizando a altimetria é o cálculo da declividade, informação utilizada pelo setor de logística de várias empresas.

REFERÊNCIAS

- AHMED, M., KARAGIORGOU, S., PFOSER, D., & WENK, C. A comparison and evaluation of map construction algorithms using vehicle tracking data. *GeoInformatica*, 19(3), 601-632, 2015.
- BAJCSY, R., & TAVAKOLI, M. Computer recognition of roads from satellite picture. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 6, p. 76 – 84, 1976.
- BIAGIONI J., & ERIKSSON, J. Map inference in the face of noise and disparity. In: *SIG SPATIAL 2012 International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, Redondo Beach, CA, USA, p. 79–88, 2012.
- BIAGIONI, J., & ERIKSSON, J. Inferring road maps from GPS traces: Survey and comparative evaluation. *Transp. Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2291, Washington, p. 61-71, 2012.
- BLACHUT, T. J., CHRZANOWSKI, A., & SAASTAMOINEN, T. J. *Urban surveying and mapping*. Springer-Verlag, New York, 1979.
- CANNY, J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6), 679-698, 1986.
- CAO, L., & KRUMM, J. From GPS traces to a routable road map. *ACM GIS*, p. 3–12, 2009.
- CHEN, Y., & KRUMM, J. Probabilistic modeling of traffic lanes from GPS traces. In *Proceedings of the 18th SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems* (pp. 81-88), 2010.
- DAVIES, J. J., BERESFORD, A. R., & HOPPER, A. Scalable, distributed, real-time map generation. *IEEE Pervasive Computing archive*. V. 5(4), p. 47–54, 2006.
- EDELKAMP, S., & SCHRODL, S. Route planning and map inference with global positioning traces. In R. Klein, H.-W. Six, and L. Wegner, editors, *Computer Science in Perspective*, volume 2598 of LNCS, pages 128–151. Springer, 2003.

ET-ADGV-DefesaFter. *Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre*. Ministério da Defesa, Exército Brasileiro, Departamento de Ciência e Tecnologia. 2ª edição. 2016.

EZZAT, M., ATTIA, M., ELGOHARY, R., & KHALIFA, M. E. Extracting road turns and intersections from crowd source GPS tracks. In *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)* (pp. 0947-0951), 2017.

FAZAN, A. J. *Predição de sombras de edifícios sobre vias urbanas com base em um modelo digital de elevações e dados de imagens aéreas de alta-resolução*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente-SP. 2007.

FERREIRA, C., VENANCIO, W., & SA, L. Mapeamento colaborativo: identificação espacial de creches e abrigos no município de Recife. *Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositocarta, Rio de Janeiro - RJ*, p. 373-377, 2017.

FRANCIA, M., GALLINUCCI, E., & VITALI, F. Map-Matching on Big Data: a Distributed and Efficient Algorithm with a Hidden Markov Model. In *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)* (pp. 1238-1243). 2019.

GALO, M. Notas de aula de Cartografia II – Sistemas de Projeção derivados da Projeção Transversa de Mercator: conceitos básicos e formulação. *Departamento de Cartografia, FCT-UNESP*. Presidente Prudente, 2016/2017.

GSA. Using GNSS Raw Measurements on Android Devices. *Publications Office of the European Union*. 2018.

GSMarena. Mobile phone reviews, news and specifications. Disponível em: < <https://www.gsmarena.com/> >. Acesso em: 15/01/2021.

HAKLAY, M. How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. *Environment and planning. B, Planning & design* 37, p. 682-703, 2010.

HAKLAY, M., & WEBER, P. OpenStreetMap: User-generated street maps. *IEEE Pervasive Computing*, 7(4), 12-18. 2008.

HEIPKE, C. Crowdsourcing Geospatial Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, p. 550-557, 2010.

HUANG, J., DENG, M., TANG, J., HU, S., LIU, H., WARIYO, S., & HE, J. Automatic generation of road maps from low quality GPS trajectory data via structure learning. *IEEE Access*, 6, 71965-71975. 2018.

IGC-SP. Instituto Geográfico e Cartográfico de São Paulo. *Acervo aerofotogramétrico e cartográfico*. 2010.

ISHIBASHI, R. *Extração de segmentos de rodovias em imagens de resoluções variadas usando o princípio de bordas paralelas*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente-SP. 2008.

ITDP BRASIL. Tutorial: mapeamento colaborativo de infraestrutura cicloviária. Disponível em: <<https://itdpbrasil.org/tutorial-mapeamento-colaborativo-de-infraestrutura-ciclovitaria/>>. Acesso em: 28/10/2020.

JOSM. Java OpenStreetMap Editor. Disponível em: <<https://josm.openstreetmap.de/>>. Acesso em: 28/10/2020.

LEE, J. G., HAN, J., & LI, X. Trajectory outlier detection: a partition-and-detect framework. In: *Proceedings of the IEEE 24th International Conference on Data Engineering (ICDE '08)*, IEEE, Washington, DC, USA, p. 140–149, 2008.

LEE, J., & SEO, D. Crowdsourcing not all sourced by the crowd: An observation on the behavior of Wikipedia participants. *Technovation*, Volumes 55–56, p. 14-21, 2016.

LI, Y., XIANG, L., ZHANG, C., & WU, H. Fusing Taxi Trajectories and RS Images to Build Road Map via DCNN. *IEEE Access*, 7, 161487-161498, 2019.

LIMA, E. C. D. *Proposta de metodologia para melhora do posicionamento obtido através de receptores GPS de baixo custo*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo-SP. 2018.

LIU, X., BIAGIONI, J., ERIKSSON, J., WANG, Y., FORMAN, G., & ZHU, Y. Mining large-scale, sparse GPS traces for map inference: comparison of approaches. *In Proceedings of the 18th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, p. 669-677, 2012.

MACHADO, A. A., & CAMBOIM, S. P. Mapeamento colaborativo como fonte de dados para o planejamento urbano: desafios e potencialidades. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*. 2019.

MARKOVIĆ, N., SEKUŁA, P., VANDER LAAN, Z., ANDRIENKO, G., & ANDRIENKO, N. Applications of trajectory data from the perspective of a road transportation agency: Literature review and Maryland case study. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(5), 1858-1869, 2018.

MARTINS, E. F. O. *Atualização de malha rodoviária em área rural via integração de dados geoespaciais e snakes de rede*. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente-SP. 2017.

MENDES, T. S. G. *Detecção de regiões de via integrando dados de varredura a laser aerotransportado e imagens de alta resolução*. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente-SP. 2012.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Rodovias Federais. Disponível em:< <https://www.infraestrutura.gov.br/rodovias-brasileiras.html>>. Acesso em: 06/03/2020.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. Editora UNESP, São Paulo. 2008.

MUNOZ-ORGANERO, M., RUIZ-BLAQUEZ, R., & SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, L. Automatic detection of traffic lights, street crossings and urban roundabouts combining

outlier detection and deep learning classification techniques based on GPS traces while driving. *Computers, Environment and Urban Systems*, 68, 1-8, 2018.

MVTec. *Subpixel Edge & Line Extraction*. Disponível em: <<https://www.mvtec.com/services-support/technologies/subpixel/>>. Acesso em: 25/06/2020.

OLOO, F. Mapping rural road networks from global positioning system (GPS) trajectories of motorcycle taxis in sigomre area, Siaya county, Kenya. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8), 309, 2018.

PAULOVSKI, K. T., & COLAVITE, A. P. Mapeamento colaborativo: avaliação de aplicativos dedicados à representação geoespacial da Dengue. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium, Ituiutaba*, v. 11, n. 1, p. 70-84, 2020.

PU, M., MAO, J., DU, Y., SHEN, Y., & JIN, C. Road Intersection Detection Based on Direction Ratio Statistics Analysis. In *2019 20th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, pp. 288-297. 2019.

STEGER, C. Removing the Bias from Line Detection. In: *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Juan, p.116-122, 1997.

STEGER, C.. An Unbiased Detector of Curvilinear Structures. *IEEE: Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Washington, v. 20, n. 2, p.62-75, 1998.

STEGER, C.. Extracting Lines Using Differential Geometry and Gaussian Smoothing; In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vienna, v. 31, Part B3, p. 821-826, 1996.

STEGER, C.. Subpixel – Precise Extraction of Lines and Edges. *ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, v. 33, Part B3, p. 141-156, 2000.

STEVANATO, M. S., ATHAYDES, T. V. S., DONATO, L. D., & PAROLIN, M. P. O uso da cartografia e mapeamento colaborativo na análise de problemas urbanos. *Revista de Geografia, Meio Ambiente e Ensino*, 8(3), 215-224, 2018.

TANG, L., REN, C., LIU, Z., & LI, Q. A road map refinement method using Delaunay triangulation for big trace data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 45, 2017.

TOUYA, G., ANTONIOU, V., CHRISTOPHE, S., & SKOPELITI, A. Production of Topographic Maps with VGI: Quality Management and Automation. *Mapping and the Citizen Sensor*, 2017.

TRACKSOURCE. Projeto Tracksource: Mapas gratuitos para o Brasil. Disponível em < <http://tracksource.org.br/> >. Acesso em: 14/10/2020.

U-BLOX. GNSS antennas RF design considerations for u-blox GNSS receivers. Disponível em: < https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GNSS-Antennas_AppNote_%28UBX-15030289%29.pdf >. Acesso em: 27/07/2020.

VALE, G. M., & DAL POZ, A. P. Processo de detecção de bordas de Canny. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 2002.

WIEDEMANN, C., HEIPKE, C., MAYER, H., & JAMET, O. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. *Empirical Evaluation Techniques in Computer Vision*, p. 172–187, 1998.

WIKIPEDIA. Google Map Maker. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Google_Map_Maker>. Acesso em: 26/10/2020.

WU, T., XIANG, L., & GONG, J. Updating road networks by local renewal from GPS trajectories. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(9), 163, 2016.

WU, H., XU, Z., & WU, G. A Novel Method of Missing Road Generation in City Blocks Based on Big Mobile Navigation Trajectory Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 142, 2019.

XIE, X., LIAO, W., AGHAJAN, H., VEELAERT, P., & PHILIPS, W. Detecting road intersections from GPS traces using longest common subsequence algorithm. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(1), 1, 2017.

YANG, W., AI, T., & LU, W. A method for extracting road boundary information from crowdsourcing vehicle GPS trajectories. *Sensors*, 18(4), 1261. 2018.

YUAN, J., & CHERIYADAT, A. M. Image feature based GPS trace filtering for road network generation and road segmentation. *Machine Vision and Applications*, 27(1), 1-12, 2016.

ZANIN, R. B. *Extração automática de cruzamentos simples e complexos de rodovias em imagens digitais de alta resolução*. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente-SP. 2012.

ZANIN, R. B., ISHIBASHI, R., & DAL POZ, A. P. Detector de linha de Steger: potencial na extração de rodovias. In: *V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas*, p. 584-591, 2007.

ZHANG, L., THIEMANN, F., & SESTER, M. Integration of GPS traces with road map. In *Proceedings of the Third International Workshop on Computational Transportation Science* (pp. 17-22). 2010.

APÊNDICE A – ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA GERAÇÃO DA IMAGEM DE FREQUÊNCIA DE TRAJETÓRIAS GNSS

Biblioteca: Arquivo “*trajetória_gps.c*”

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <string.h>

#include "trajetorias_gps.h"

double *geod2utm_e (double a, double f, double lon0, double
*lat_rad, double *lon_rad, double *e_utm, int n_linha, char
hemisf[2]){
    int i;
    double b, rpc, ee, a1, a3, a5, y_tm, dlon;
    b = a*(1-f);
    ee = (a*a - b*b)/(b*b);
    rpc = (a*a)/b;
    //TM
    for(i=0; i<n_linha; i++){
        a1 = rpc*( 1.0 / sqrt( (( 1.0/cos(lat_rad[i])) )*(
1.0/cos(lat_rad[i])) )) + ee ));
        a3 = (1.0/6.0)*a1*(-1.0 + 2.0*pow(cos(lat_rad[i]), 2) +
ee*pow(cos(lat_rad[i]), 4));
        a5 = (1.0/120.0)*a1*(1.0 - 20.0*pow(cos(lat_rad[i]), 2) +
(24.0-58.0*ee)*pow(cos(lat_rad[i]), 4) +
72.0*ee*pow(cos(lat_rad[i]), 6));

        dlon = lon_rad[i] - lon0;
        y_tm = a1*(dlon) + a3*pow(dlon, 3) + a5*pow(dlon, 5);
        //UTM
        if((strcmp (hemisf, "N") == 0) || (strcmp (hemisf,
"n") == 0)){
            e_utm[i] = 500000.0 + 0.9996*y_tm;}
        if((strcmp (hemisf, "S") == 0) || (strcmp (hemisf,
"s") == 0)){
            e_utm[i] = 500000.0 + 0.9996*y_tm;}
    }
    return (e_utm);
}
```

```

double *geod2utm_n (double a, double f, double lon0, double
*lat_rad, double *lon_rad, double *n_utm, int n_linha, char
hemisf[2]){
    int i;
    double
A0a,A0b,A0c,A0d,A0e,A0,A1a,A1b,A1c,A1d,A1e,A1,A2a,A2b,A2c,A2d,
A2,A4a,A4b,A4c,A4,A6a,A6b,A6,A8;
    double b, rpc, ee, e4, e6, e8, B, a1, a2, a4, a6, dlon,
x_tm;
    b = a*(1-f);
    ee = (a*a - b*b)/(b*b);
    e4 = pow(ee,2); e6 = pow(ee,3); e8 = pow(ee,4); rpc =
(a*a)/b;
    A0a = 3.0*ee/4.0; A0b = 15.0*ee/16.0; A0c = 35.0*ee/36.0;
A0d = 63.0*ee/64.0; A0e = 99.0*ee/100.0;
    A0 = 1.0 - A0a*(1.0 - A0b*(1.0 - A0c*(1.0 - A0d*(1.0 -
A0e)))));
    A1a = 3.0*ee/4.0; A1b = 25.0*ee/16.0; A1c = 77.0*ee/60.0;
A1d = 837.0*ee/704.0; A1e = 2123.0*ee/1860.0;
    A1 = A1a*(1.0 - A1b*(1.0 - A1c*(1.0 - A1d*(1.0 - A1e)))));
    A2a = 5.0*ee/8.0; A2b = 139.0*ee/144.0; A2c =
1087.0*ee/1112.0; A2d = 513427.0*ee/521760.0;
    A2 = A2a*(1.0 - A2b*(1.0 - A2c*(1.0 - A2d)));
    A4a = 35.0*e4/72.0; A4b = 125.0*ee/64.0; A4c =
221069.0*ee/150000.0;
    A4 = A4a*(1.0 - A4b*(1.0 - A4c));
    A6a = 105.0*e6/256.0; A6b = 1179.0*ee/400.0;
    A6 = A6a*(1.0 - A6b);
    A8 = 231.0*e8/640.0;
    //TM
    for(i=0; i<n_linha; i++){
        B = A0*rpc*lat_rad[i] -
A1*rpc*sin(lat_rad[i])*cos(lat_rad[i])*(1.0 +
A2*pow(sin(lat_rad[i]),2) + A4*pow(sin(lat_rad[i]),4) +
A6*pow(sin(lat_rad[i]),6) + A8*pow(sin(lat_rad[i]),8));
        a1 = rpc*( 1.0 / sqrt( (( 1.0/cos(lat_rad[i]) )*(
1.0/cos(lat_rad[i]) )) + ee ));
        a2 = 0.5*a1*sin(lat_rad[i]);
        a4 = (1.0/12.0)*a2*(-1.0 + 6.0*pow(cos(lat_rad[i]), 2) +
9.0*ee*pow(cos(lat_rad[i]), 4) + 4.0*e4*pow(cos(lat_rad[i]),
6));
        a6 = (1.0/360.0)*a2*(1.0 - 60.0*pow(cos(lat_rad[i]), 2) +
120.0*pow(cos(lat_rad[i]), 4));

```

```

    dlon = lon_rad[i] - lon0;
    x_tm = B + a2*pow(dlon,2) + a4*pow(dlon, 4) + a6*pow(dlon,
6);
    //UTM
    if((strcmp (hemisf, "N") == 0) || (strcmp (hemisf,
"n") == 0)){
        n_utm[i] = 0.9996*x_tm;}
    if((strcmp (hemisf, "S") == 0) || (strcmp (hemisf,
"s") == 0)){
        n_utm[i] = 10000000.0 + 0.9996*x_tm;}
    }
    return (n_utm);
}

double *aloca_v (int i){
    double *p;
    p = (double *)calloc(i, sizeof(double));
    return (p);
}

int **aloca_m(int l, int c){
    int i;
    int **pm;
    pm = (int **) calloc(l, sizeof (int *));
    for(i=0; i<l; i++){
        pm[i] = (int *) calloc(c, sizeof(int));
    }
    return (pm);
}

int **det_freq (int n_linha, int n_max_i, int e_min_i, double
gsd, double *n_utm, double *e_utm, int **img){
    int i, lin=0, col=0;
    for(i=0; i<n_linha; i++){
        lin = (int)((n_max_i - n_utm[i])/gsd);
        col = (int)((e_utm[i] - e_min_i)/gsd);
        img[lin][col] = img[lin][col] + 1;
    }
    return (img);
}

void libera_m(int l, int **pm){
    int i;
    for (i=0; i<l; i++){

```

```

        free(pm[i]);
    }
    free(pm);
}

```

Biblioteca: Arquivo “*trajetória_gps.h*”

```

#ifndef TRAJETORIAS_GPS_H_INCLUDED
#define TRAJETORIAS_GPS_H_INCLUDED
double *geod2utm_e (double, double, double, double *, double
*, double *, int, char *);
double *geod2utm_n (double, double, double, double *, double
*, double *, int, char *);
double *aloca_v (int);
int **aloca_m (int, int);
int **det_freq(int, int, int, double, double *, double *, int
**);
void libera_m (int, int **);
#endif // TRAJETORIAS_GPS_H_INCLUDED

```

Código

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <locale.h>
#include <float.h>
#include <limits.h>
#include <time.h>
#include "trajetorias_gps.h"
#define PI 3.14159265359
#define g2r 3.14159265359/180.0

void verificar_arq (FILE *arquivo){
    if(arquivo==NULL){
        printf("Erro na leitura ou na escrita do arquivo,
favor verificar!\n");
        system("pause");
        exit(1);
    }
}

int main()
{

```

```

clock_t tempo;
tempo = clock();

int e_max_i, e_min_i, n_max_i, n_min_i, nL, nC, dE, dN,
al_l, al_c;
int n_linha=0, flag=0, i, j, **img;
char cl, hem[2];
double h, lat_d, lon_d, *hgeom, *lat_rad, *lon_rad, *n_utm,
*e_utm, Fuso, gsd, lon0;
double a, ff, f, e_max=DBL_MIN, e_min=DBL_MAX,
n_max=DBL_MIN, n_min=DBL_MAX;

setlocale(LC_ALL, "Portuguese");
FILE *arq, *imagem;
printf("### PROGRAMA PARA GERAÇÃO DE IMAGEM DE FREQUÊNCIA
A PARTIR DE TRAJETÓRIAS GNSS ###\n\n");

//Parâmetros dos Sistemas de Referência e Projeção
arq = fopen("parametros.txt", "r");
verificar_arq(arq);
fscanf(arq, "%lf \n", &a);
fscanf(arq, "%lf \n", &ff);
fscanf(arq, "%lf %s\n", &Fuso, hem);
fscanf(arq, "%lf \n", &gsd);
lon0 = (6*Fuso - 183)*g2r;
f = 1/ff;
fclose(arq);
printf("--> Leitura dos parâmetros de entrada:\n a =
%0.3lf m\n f = %0.9lf\n Fuso = %0.1lf\n Hemisfério = %s\n GSD
= %0.2lf m\n", a, f, Fuso, hem, gsd);

//Extração das coordenadas dos pontos
arq = fopen("indiana_area_urb_1m.txt", "r");
verificar_arq(arq);

//Contando a quantidade de linhas do arquivo para alocação
de memória
while(!feof(arq)){
    cl = getc(arq);
    if(cl == '\n'){
        if(flag==0){
            n_linha++;
            flag = 1;}
    }else{

```

```

        if(flag==1)
            flag=0;}
    }
    printf("\n--> Leitura do arquivo de pontos que constituem
as trajetórias:\n Número de linhas do arquivo: %i\n",
n_linha);
    rewind(arq);

    //Alocação de memória
    printf("\n--> Alocação de memória e cópia dos elementos do
arquivo:\n Latitude\n Longitude\n Altitude geométrica\n");
    hgeom = aloca_v(n_linha);
    lat_rad = aloca_v(n_linha);
    lon_rad = aloca_v(n_linha);
    n_utm = aloca_v(n_linha);
    e_utm = aloca_v(n_linha);

    for(i=0; i<n_linha; i++){
        fscanf(arq, "%lf %lf %lf\n",&lon_d, &lat_d, &h);
        lat_rad[i] = lat_d*g2r;
        lon_rad[i] = lon_d*g2r;
        hgeom[i] = h;
    }
    fclose(arq);
    free(hgeom);

    //Coordenadas UTM
    printf("\n--> Cálculo das coordenadas no sistema de
projeção UTM\n");
    e_utm =
geod2utm_e(a,f,lon0,lat_rad,lon_rad,e_utm,n_linha,hem);
    n_utm =
geod2utm_n(a,f,lon0,lat_rad,lon_rad,n_utm,n_linha,hem);
    free(lat_rad);
    free(lon_rad);

    //Encontrando os limites da região
    for(i=0; i<n_linha; i++){
        if(n_utm[i] > n_max){
            n_max = n_utm[i];}
        if(e_utm[i] > e_max){
            e_max = e_utm[i];}
        if(n_utm[i] < n_min){
            n_min = n_utm[i];}
    }

```

```

        if(e_utm[i] < e_min){
            e_min = e_utm[i];}
    }

    //Casting para se trabalhar com um retângulo envolvente
    inteiro
    e_max_i = ((int)e_max) + 1.0;
    e_min_i = ((int)e_min) - 1.0;
    n_max_i = ((int)n_max) + 1.0;
    n_min_i = ((int)n_min) - 1.0;
    printf("\n--> Limites da região\n Sup. Esq. = (N_max = %d
m ; E_min = %d m)\n", n_max_i, e_min_i);
    printf(" Inf. Dir. = (N_min = %d m ; E_max = %d m)\n\n",
n_min_i, e_max_i);

    //Encontrando a máxima variação espacial
    dE = e_max_i - e_min_i;
    dN = n_max_i - n_min_i;
    printf(" Máxima variação em N = %d m\n Máxima variação em
E = %d m\n", dN, dE);

    //Número de linhas e de colunas da imagem que será gerada
    nL = (int)ceil((((double)dN)/gsd));
    nC = (int)ceil((((double)dE)/gsd));
    printf(" Número de linhas = %d\n Número de colunas =
%d\n", nL, nC);
    al_c = nC;
    al_l = nL;

    //Alocação de memória para a imagem de frequência
    printf("\n--> Alocação de memória e geração da imagem de
frequência\n");
    img = aloca_m (al_l, al_c);

    //Determinação da frequência por célula
    img = det_freq(n_linha, n_max_i, e_min_i, gsd, n_utm,
e_utm, img);
    free(e_utm);
    free(n_utm);

    //Gerando imagem em PGM
    imagem = fopen("imagem.pgm", "w");
    verificar_arq(imagem);
    fprintf(imagem, "P2\n");

```

```

fprintf(imagem, "%d %d\n", nC, nL);
fprintf(imagem, "255\n");
for(i=0; i<nL; i++){
    for(j=0; j<nC; j++){
        fprintf(imagem, "%d ",img[i][j]);
    }
    fprintf(imagem, "\n");
}
fclose(imagem);

//Normalizando a imagem considerando o intervalo [0 - 255]
int aux, nd_max = INT_MIN, nd_min = INT_MAX, **img_orig,
**img_norm, larg, altura, valmax;
char nmagico[3];

imagem = fopen("imagem.pgm", "r");
verificar_arq(imagem);
fscanf(imagem,"%s",nmagico);
fscanf(imagem,"%i %i",&larg,&altura);
fscanf(imagem,"%i",&valmax);
img_orig = aloca_m(altura, larg);
img_norm = aloca_m(altura, larg);
for(i=0;i<altura;i++) {
    for(j=0;j<larg;j++) {
        fscanf(imagem,"%d",&aux);
        img_orig[i][j] = aux;
        img_norm[i][j] = aux;
        if(aux < nd_min) {
            nd_min=aux;}
        if(aux > nd_max) {
            nd_max=aux;}
    }
}
fclose(imagem);

printf("\n--> Normalização da imagem de frequência [0 ;
255]\n");
printf(" Frequência Mínima: %d\n",nd_min);
printf(" Frequência MáximA: %d\n",nd_max);
imagem = fopen("imagem_normalizada.pgm", "w");
verificar_arq(imagem);
fprintf(imagem,"%s\n%i
%i\n%i\n",nmagico,larg,altura,valmax);
for(i=0;i<altura;i++) {

```

```

        for(j=0;j<larg;j++) {
            img_norm[i][j] = (((float)255 / (float)(nd_max
- nd_min))*(img_orig[i][j] - nd_min)) + 0.5;
            fprintf(imagem, "%d ",img_norm[i][j]);
        }
        fprintf(imagem, "\n");
    }
    fclose(imagem);

    printf("\n--> Liberação de memória\n");
    libera_m (al_l, img);
    libera_m (al_l, img_norm);
    libera_m (al_l, img_orig);

    printf("\n--> Processamento Finalizado!\n\n");
    tempo = clock() - tempo;
    printf("Tempo de execução do programa: %0.3lf segundos\n",
((double)tempo)/((CLOCKS_PER_SEC)));
    getchar();
    return 0;
}

```

Formato dos arquivos de entrada

