
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

AURÉLIO LÚCIO DE MELO E SILVA JÚNIOR

**AS POTENCIALIDADES DA EXTRAÇÃO AUTOMATIZADA DE OBJETOS
ORIUNDOS DE PERFILAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO APLICADOS
NA ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA URBANA**



RECIFE
2017

AURÉLIO LÚCIO DE MELO E SILVA JÚNIOR

**AS POTENCIALIDADES DA EXTRAÇÃO AUTOMATIZADA DE OBJETOS
ORIUNDOS DE PERFILAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO APLICADOS
NA ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA URBANA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de Concentração: Cartografia e Sistemas de Geoinformação.

Orientadora: Prof^a Dr^a Ana Lúcia Bezerra Candeias

RECIFE

2017

Catálogo na fonte

Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586P

Silva Júnior, Aurélio Lúcio de Melo e.

As potencialidades da extração automatizada de objetos oriundos de perfilamento a laser aerotransportado aplicados na atualização cartográfica urbana / Aurélio Lúcio de Melo e Silva Júnior. – 2017.

56 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Prof^a Dr^a Ana Lúcia Bezerra Candeias.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia Cartográfica. 2. LIDAR. 3. Processamento de imagem. 4. Extração de bordas. 5. Sensoriamento remoto. 6. PEC-PCD. I. Candeias, Ana Lúcia Bezerra. (Orientadora). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-173

AURÉLIO LÚCIO DE MELO E SILVA JÚNIOR

**AS POTENCIALIDADES DA EXTRAÇÃO AUTOMATIZADA DE OBJETOS
ORIUNDOS DE PERFILAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO APLICADOS
NA ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA URBANA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovado em: 15/12/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Prof^a Dr^a Ana Lúcia Bezerra Candeias (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Sylvana Melo dos Santos (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Júnior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, meus pais e irmã pelo incentivo e minha esposa Amanda que esteve sempre presente nas horas mais difíceis.

À Prefeitura do Recife por ter cedido os dados utilizados nessa dissertação.

Ao Gerente Geral de Informação (Geoprocessamento) da Prefeitura do Recife, Tarcísio da Fonte Neves, pelo seu apoio e compreensão em vários momentos dessa caminhada.

À Maria Luciana da Silva, aluna da Engenharia Cartográfica da UFPE, que fez seu estágio de graduação auxiliando na parte prática dessa dissertação. Sua ajuda e comprometimento foram fundamentais para defesa de andamento.

Agradecimento em especial à minha orientadora Doutora Ana Lúcia Bezerra Candeias pelas valiosas orientações, conversas e por acreditar em mim.

Aos membros da banca, João Rodrigues e Sylvana Melo, pela contribuição com observações necessárias para o aperfeiçoamento dessa dissertação.

Ao CNPq processo: 311120/2014-8 do projeto de Profa. Ana Lúcia Bezerra Candeias.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação e ao Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE.

Aos amigos mais que especiais, Glauco Freitas e Alberto Pereira, pelos grandes desafios, noites mal dormidas e superações que compartilhamos. Muito obrigado.

“Tente e não diga que a vitória está perdida... Tenha fé em Deus, tenha fé na vida. Tente outra vez!” (Raul Seixas).

RESUMO

As possibilidades de extração de edificações em áreas urbanas, a partir de dados oriundos de perfilamento a LASER aerotransportado é uma realidade, e tem sido o centro das atenções não somente entre as comunidades científicas, mas também em órgãos públicos, como ferramenta alternativa de apoio na atualização cartográfica e controle de ocupação dos solos. A partir da nuvem de pontos é possível gerar ortoimagens de intensidade, de hipsometria e de composição. Esses resultados podem auxiliar na extração das bordas (contornos) das edificações. O objetivo deste estudo é desenvolver uma metodologia para extração automatizada de edificações a partir de dados de nuvem de pontos oriundos do LIDAR. Para isso, considerou-se as tolerâncias planimétricas estabelecidas pelo PEC – PCD (Padrão de Exatidão Cartográfico para Produtos Cartográficos Digitais). Também se utilizou a transformação IHS (*Intensity, Hue, Saturation*) e classificação por K-médias na extração das bordas. Os objetivos específicos são: a) desenvolver metodologicamente a extração de bordas das edificações por meio de processamento de imagens de composição, gerando polígonos fechados para os cálculos de áreas; e b) avaliar a precisão obtida na metodologia a partir de dados obtidos por técnicas tradicionais de restituição estereofotogramétrica e topografia, tanto para questões posicionais (X,Y) como também nas possíveis diferenças nos cálculos de áreas, utilizando testes estatísticos de acordo com as especificações de qualidade da PEC-PCD. A estatística aplicada na validação dos dados oriundos da aerofotogrametria e os dados obtidos por topografia em campo poderão servir de parâmetro de confiabilidade para as novas análises sobre as extrações automatizadas de bordas das edificações desenvolvidas nessa pesquisa, ou seja, podem ser comparadas as feições da restituição com as feições obtidas na automação, através dos cálculos de discrepâncias. A área de estudo é uma edificação situada na UFPE e com terreno plano. Os resultados do método de t-Student apontaram que não há tendência em nenhuma das direções, porém há erro sistemático na coordenada E. O teste do Qui-Quadrado resultou em uma qualidade compatível com a Classe C do PEC-PCD, cujo erro padrão é 0,50m, para a escala de 1:1000.

Palavras-chave: LIDAR. Processamento de imagem. Extração de bordas. Sensoriamento remoto. PEC-PCD.

ABSTRACT

The possibilities of extracting buildings in urban areas, from data derived from profiling the airborne LASER is a reality, and has been the center of attention not only among scientific communities, but also in public agencies, as an alternative support tool in the cartographic update and soil occupation control. From the cloud of points it is possible to generate orthoimage of intensity, hypsometry and composition. These results can aid in the extraction of the edges (contours) of the buildings. The objective of this study is to develop a methodology for automated extraction of buildings from point cloud data from LIDAR. For this the planimetric tolerances established by PEC-PCD (Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products) were considered. IHS (Intensity, Hue, Saturation) transformation and k-means clusterings classification in edge extraction were also used. The specific objectives are: a) to develop methodologically the extraction of building edges by means of composition image processing, generating closed polygons for the area calculations; and b) to evaluate the accuracy obtained in the methodology from data obtained by traditional techniques of restitution (X, Y) as well as possible differences in area calculations, using statistical tests according to the PEC-PCD quality specifications. The statistics applied in the validation of the data from the photogrammetry and the data obtained by field topography may serve as a parameter of reliability for the new analyzes on the automated extraction of edges of the buildings developed in this research, that is, the characteristics restitution can be compared with features obtained in automation, through discrepancy calculations. The study area is a building located in UFPE and with flat terrain. The results of the t-Student method indicated that there is no tendency in any of the directions, but there is a systematic error in the E coordinate. The chi-square test resulted in a Class C compatible quality of PEC-PCD, whose standard error is 0.50m, for the 1:1000 scale.

Keywords: LIDAR. Image processing. Edge extraction. Remote Sensing. PEC-PCD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama do Sensor LASER.....	19
Figura 2: Diâmetro do ponto projetado no Solo em função da altura de voo....	20
Figura 3: Princípio de funcionamento do sistema aerotransportado.....	22
Figura 4: Frequência de perfilamento.....	23
Figura 5: Imagens em níveis de cinza obtidos por um processo de quantização de coordenadas altimétricas.....	24
Figura 6: Interceptação parcial do pulso na borda do telhado e duas reflexões do pulso (solo e fachada lateral).....	24
Figura 7: Mecanismos de varredura.....	25
Figura 8: Configuração da varredura em relação ao tipo de espelho.....	26
Figura 9: Imagem de intensidade LASER.....	26
Figuras 10: Ilustração de uma Imagem de Intensidade que mostra uma parte do Campus Joaquim Amazonas, UFPE.....	28
Figuras 11: Ilustração de uma Imagem Hipsométrica que mostra uma parte do Campus Joaquim Amazonas, UFPE.....	28
Figura 12: Ilustração de uma Imagem de Composição que mostra uma parte do Campus Joaquim Amazonas, UFPE.....	29
Figura 13: Esquema do cubo de cores RGB.....	31
Figura 14: Espaço de cores IHS.....	32
Figura 15: Efeitos da morfologia matemática em uma imagem binária.....	33
Figura 16: Área de estudo com ampliação específica para as edificações pertencente ao Centro de Tecnologia de Pernambuco – CTG, no campus Joaquim Amazonas da UFPE.....	34
Figura 17: Laboratório de Nanoestruturas (CTG).....	37
Figura 18: Representação das bordas espessas das edificações.....	39
Figura 19: Vetorização das duas edificações analisadas.....	39
Figura 20: Planta de comparação entre os vértices obtidos por topografia e os vértices obtidos por vetorização.....	41
Figura 21: Exemplo de utilização de tabela bilateral para obtenção dos valores limites de “t” de Student para o grau de liberdade $n-1=7$	43
Figura 22: Resultados obtidos na transformação do modelo RGB para o modelo IHS sobre o recorte de imagem da Área I de estudo.....	44

Figura 23: Ilustração dos resultados obtidos pelo método da Morfologia Matemática46

Figura 24: Resultado da Classificação não supervisionada utilizando K-médias
47

Figura 25: Representação do “Ponto de Análise” sobrepondo o resultado da classificação por K-médias.....48

Figura 26: Comportamento dos vértices sobre a imagem RGB.....48

Figura 27: Comportamento dos vértices sobre a imagem binarizada.....49

Figura 28: Comportamento dos vértices sobre a imagem que sofreu dilatação pelo processo da morfologia matemática.....49

Figura 29: Comportamento dos vértices sobre a imagem que sofreu dilatação pelo processo da morfologia matemática juntamente com a nuvem de pontos do MDE 50

Figura 30: Imagem de análise apresentando o comportamento da nuvem de pontos MDE sobre a faixa espessa de borda através do filtro de dilatação.....51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrão de Exatidão Cartográfico dos Produtos Cartográficos Digitais Estabelecidos para Classe A.....	30
Tabela 2: Coordenadas em UTM e no sistema topocêntrico local das estações EPS04 e EPS07.....	38
Tabela 3: Coordenadas UTM / SIRGAS 2000 obtidas por dois métodos e suas discrepâncias.....	40
Tabela 4: Tabela de padrão de qualidade da PEC-PCD nas escalas 1:1.000 e 1:2.000. 42	
Tabela 5: Tabelas de análises para erros sistemáticos pelo teste de t de Student....	42
Tabela 6: Cálculo do quadrado do Erro-Padrão e Teste do qui-quadrado para definição de classe da PEC-PCD na escala 1:1000.....	43

LISTA DE SIGLAS

2D - Bidimensional

3D - Tridimensional

ALS - *Airborne Laser Scanning*

ALTM - *Airborne LASER Terra in Mapper*

APD - *Avalanche Photo Diodes*

ASCII - American Standard Code for Information Interchange

CMY - *Cyan, Magenta and Yellow*

EP - Erro Padrão

et al - e outros

ET-PCDG - Especificação Técnica dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais

GPS - Global Positioning System

HLS - *Handy Laser Scanning*

IHS - *Intensity, Hue and Saturation*

INDE - Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais

INS - Inertial Navigation System

ITEP - Instituto de Tecnologia de Pernambuco

LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LiDAR - *Light Detection and Ranging*

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDS - Modelo Digital de Superfície

MDSn - Modelo Digital de Superfície normalizado

MDT - Modelo Digital do Terreno

MTLS - *Mobile Terrestrial Laser Scanning*

PEC - PCD - Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RGB - *Red, Green and Blue*

SCN - Sistema Cartográfico Nacional

SEFIN - Secretaria de Finanças

SEMOC - Secretaria de mobilidade e Controle Urbano

TLS - *Terrestrial Laser Scanning*

UTM - Universal Transversa de Mercator

VANT - Veículo Aéreo não Tripulado

VLA - Varredura Laser Aerotransportada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1	SISTEMA DE PERFILAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO.....	18
3.1.1	Sensor LASER.....	18
3.1.2	Características do Sistema de Varredura a LASER.....	20
3.1.3	Espelhos de Varredura e Objetos não Perfilados.....	25
3.1.4	Produtos Oriundos de Dados LiDAR.....	27
3.2	AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO PLANIMÉTRICA – (PEC-PCD).....	29
3.3	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM.....	30
3.3.1	Modelo RGB.....	30
3.3.2	Modelo IHS.....	31
3.3.3	Filtragem Morfológica: Dilatação e Erosão.....	32
3.3.4	Classificação por K-Médias.....	33
4	METODOLOGIA.....	34
4.1	CARACTERIZAÇÕES DA ÁREA.....	34
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.2.1	Materiais.....	35
4.2.2	Métodos.....	37
4.2.2.1	Levantamento Topográfico (Método da Poligonação).....	37
4.2.2.2	Vetorização de Feições.....	38
4.2.3	Resultados.....	40
4.2.3.1	Transformação de RGB para IHS.....	44
4.2.3.2	Morfologia Matemática: Dilatação e Erosão.....	45
4.2.3.3	Classificação por K-médias.....	47
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	52
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Os dados obtidos pela técnica de perfilamento a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) aerotransportado, com todos os avanços ocorridos nos últimos anos em relação à precisão, velocidade de aquisição e informação, poderão suprir de forma eficaz e menos dispendiosas a atualização cartográfica das cidades, mitigando as ações de fiscalização em campo de forma mais rápida e objetiva.

Devido à grande dinâmica nas mudanças de ocupação em áreas urbanas, de um modo geral, as prefeituras não conseguem resolver os processos de acompanhamento e fiscalização dessas alterações de forma eficiente. Portanto, são necessários, muitas vezes, projetos de cadastramento por Topografia ou processos Aerofotogramétricos de alto custo para os cofres públicos, dificultando a administração. Entretanto, em muitos casos, as técnicas utilizadas na extração dos volumes urbanos, vinculadas as informações de altura das edificações, ainda mesclam a restituição estereofotogramétrica digital com os Modelos de Elevação oriundos do LiDAR (*Light Detection and Ranging*).

Autores como Brandalize (2001), Ferreira (2014), Falat (2008), Becker e Centeno (2013) e Renslow (2012) apresentam resultados de aplicações com LIDAR, utilizando a classificação e técnicas estatísticas para o tratamento da nuvem de pontos geradas pelos feixes de laser lançados por aeronaves no momento do voo, adquirindo polígonos 3D georreferenciados.

Segundo Falat (2008), o Sistema de perfilamento a LASER (ALS - *Airborne Laser Scanning*), VLA (Varredura Laser Aerotransportada), Sistema Aerotransportado de Laser para Mapeamento do Terreno (ALTM - *Airborne LASER Terra in Mapper*), LiDAR, Sistema de Varredura LASER (*Laser Scanner*) ou simplesmente Perfilamento a LASER, são algumas das variações encontradas na literatura para denominar o sistema de sensoriamento remoto ativo, com funcionamento baseado na utilização de um pulso de LASER, que é emitido em direção ao terreno para obtenção de coordenadas tridimensionais (x, y, z) de pontos sobre uma superfície.

Durante o voo o sistema transmite pulsos LASER, direcionado ao solo, obtendo a primeira e última reflexão de cada pulso, formando uma nuvem de pontos

que são justamente os elementos primários para modelagem do terreno. A filtragem desses dados definirá a nuvem de pontos correspondentes Modelo Digital do Terreno (MDT) e o Modelo Digital de Superfície (MDS), em que a diferença dentre esses modelos, na variável z (cota), forneceram o Modelo Digital de Superfície normalizado (MDSn).

Uma das atividades que mais consomem tempo na Fotogrametria é a obtenção do MDT ou MDE (Modelo Digital de Elevação). Este subproduto cartográfico normalmente é utilizado para a retificação diferencial de ortofotos ou para obtenção automática de curvas de nível. O Perfilamento a LASER é uma tecnologia que está revolucionando esta metodologia, permitindo a obtenção do MDT de maneira mais direta, evitando processos fotogramétricos ou levantamentos com outras técnicas como o GPS (BRANDALIZE, 2001).

Cavalcanti, Candeias e Tavares Júnior (2014) e também Cavalcanti, Candeias e Tavares Júnior (2016) usaram esses conceitos para estudar a classificação e o tratamento de nuvens de pontos LiDAR, apresentando uma metodologia de aquisição de polígonos de edificações em 3D através de processos de fatiamento do MDE, da reclassificação, das ferramentas de Morfologia Matemática e da rotulação de componentes conexas utilizadas na geração de máscara binária. Com base nos resultados deste método foi possível filtrar informações referentes às áreas e volumes das edificações de municípios e de grandes áreas urbanas.

Com os avanços tecnológicos, as alternativas em obter atualização cartográfica cadastral dos municípios vêm dando cada vez mais ênfase aos produtos adquiridos com maior rapidez e economia de gastos públicos. Um exemplo disso é a obtenção dessas bases e produtos oriundos da tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR), na medida em que, num primeiro momento, o seu voo independe de condições climáticas e horário e obtém dados de uma grande área de uma única vez.

Becker e Centeno (2013) demonstram a importância de dados LiDAR no levantamento do relevo, mesmo em áreas relativamente planas, em função da precisão em altimetria e planimetria, porém, dependendo das especificações do sensor utilizado no levantamento, a densidade de pontos pode não ser suficiente para se obter detalhamento das edificações, principalmente em áreas de grande densidade. Já El-Ashmawy, Shaker e Yana (2011) apresentam um trabalho com classificação por pixel e orientado a objetos usando dados LIDAR. Os experimentos

apontaram que o método do adensamento é mais recomendado para preservar os detalhes.

Além das edificações diversos objetos acima do solo poderão ser identificados e extraídos tais como: Vegetação, Linhas de Transmissão, Transporte, etc. Na vegetação, o conjunto de dados LiDAR podem fornecer informação referente à vegetação existente na área abrangida pela varredura. Essa informação pode ser adquirida tanto pelo retorno discreto LiDAR, como pela análise da forma da onda. Isso se deve à capacidade de penetração dos pulsos laser no meio de ramos, galhos e folhagem da vegetação até alcançar o solo (Renslow, 2012, p. 310).

Para o caso das Linhas de Transmissão de Energia, a tecnologia LiDAR é uma das ferramentas indicadas para mapeá-las. Com os recentes avanços dos sistemas de aquisição operando em frequências mais altas, a capacidade de detectar os cabos aéreos de fibra óptica com LiDAR, por exemplo, que são mais finos, já é uma realidade (Renslow, 2012, p. 310).

No Transportes, a tecnologia LiDAR tem sido empregada nas plataformas ALS (aeronave), HLS (helicóptero), TLS (terrestre) e MTLIS (TLS móvel). O retorno de intensidade do sensor pode ser utilizado para identificar e extrair feições como marcas de frenagem, sinalização das vias e danos na pavimentação (Renslow, 2012, p. 331 e 337).

Cirilo *et al.* (2014) apresentam os dados de LIDAR como Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial para o Estado de Pernambuco destinados à implantação de infraestrutura e ações de previsão e controle de inundações. Também Cavalcanti, Candeias e Tavares Júnior (2014) simularam um mapeamento de riscos de inundações usando dados LIDAR: para a bacia do Rio Una, Pernambuco e onde foi utilizado Modelo Digital de Elevação obtido com LiDAR (Ligth Detection and Ranging), imagem RAPIDEYE, mapas de setores censitários do Censo 2010 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), e operação de álgebra de mapas.

Luo (2016) desenvolveu uma estratégia para extrato semi-automatizado de limite cadastral a partir de dados de nuvem de pontos de ALS, onde os métodos existentes para as gerações de limites de parcelas são determinados usualmente por processos manuais. Avalia-se que, se os objetos cadastrais forem extraídos semi-automaticamente dos dados de detecção e de variação da luz (LiDAR), menos

mão-de-obra será necessária e o custo e o tempo de operação serão reduzidos em grande parte.

Uma revisão da extração automática de contornos com imagens de alta resolução para o mapeamento cadastral é apresentada em Crommelinck *et al.* (2016). Os métodos usados de segmentação são aplicados a imagens obtidas com VANT, mas são abordagens que podem ser usadas para outros tipos de imagem. Uma exemplificação de extração de bordas usando morfologia matemática em imagens de alta resolução pode ser vista em Candeias *et al.* (2016). Já Ferreira, Larocca e Cintra (2015) propõem uma segmentação do espaço urbano por meio de dados LIDAR aerotransportado. Por outro lado, Ercolin Filho, Centeno e Mitishita (2016) mostram a detecção automática de áreas planas em telhados de edificações utilizando nuvem de pontos LIDAR.

Janssen (2014) avalia a acurácia da aquisição de dados coletados de formas múltiplas. A avaliação dos resultados obtidos é também uma questão estudada nesse trabalho.

Por fim, as possibilidades de extração de edificações em áreas urbanas, a partir de dados oriundos de perfilamento a LASER aerotransportado é uma realidade, e tem sido o centro das atenções não somente entre as comunidades científicas, mas também em órgãos públicos, como ferramenta de apoio alternativa na atualização cartográfica e controle de ocupação dos solos. No caso do município de Recife, todos os dados obtidos para realização desse estudo foram validados pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP, em relatório, através de testes estatísticos amostrais, possibilitando uma segurança ainda maior no uso desses.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo é desenvolver uma metodologia para extração automatizada de edificações a partir de dados de nuvem de pontos oriundas do LiDAR.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos estão subdivididos em três grandes tópicos.

- Desenvolver metodologicamente a extração de bordas das edificações por meio de processamento de imagens de composição, gerando polígonos fechados para os cálculos de áreas.
- Avaliar a precisão obtida na metodologia a partir de dados obtidos por técnicas tradicionais de restituição estereofotogramétrica e topografia, tanto para questões posicionais (X, Y) como também nas possíveis diferenças nos cálculos de áreas, utilizando testes estatísticos de acordo com as especificações de qualidade da PEC-PCD.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos e ferramentas que são utilizados no desenvolvimento dessa pesquisa.

3.1 SISTEMA DE PERFILAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO

O Sistema de Perfilamento a Laser Aerotransportado consiste na determinação de pontos sobre a superfície topográfica escaneada, adquirindo dados do terreno e elementos que se encontram acima deste, gerando um arquivo de “nuvem de pontos”.

O processo consiste, a partir de um equipamento gerador de pulsos LASER de alta precisão instalado num recorte feito na parte inferior da carenagem das aeronaves, num feixe de laser emitido em direção ao solo obtendo registros contínuos de coordenadas espaciais em 3D, formando uma densificação de pontos por metro quadrado que são os elementos primários para modelagem do terreno e geração de mapas topográficos.

Durante o levantamento esses feixes são refletidos pelo solo, onde o equipamento recebe e grava os intervalos de tempo de partida e chegada de cada pulso. Com base no tempo decorrido entre a emissão e o registro do retorno do sinal calcula-se a distância entre a aeronave e o local de incidência (Baltsavias, 1999).

3.1.1 Sensor LASER

Os sistemas Sensores LASER aerotransportados podem ser acoplados em aeronaves. Seu princípio de funcionamento depende basicamente da integração de três componentes, isto é: o GPS, o INS, e o próprio LASER.

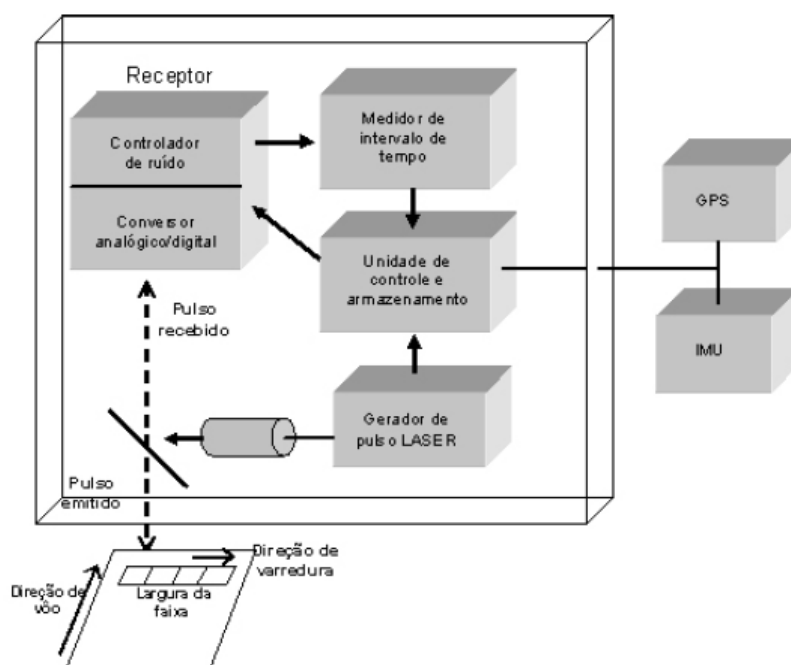
- GPS: registra a posição da aeronave em intervalos de tempo fixos, enquanto outro receptor de base (no terreno) possibilita correção diferencial do posicionamento do sensor (pós-processamento);
- INS: registra os ângulos de atitude do sensor durante o voo. Posteriormente, são utilizados em pós-processamento para

determinação precisa das coordenadas dos pontos tridimensionais no terreno; e

- LASER: armazena o tempo de emissão e recepção de cada pulso, bem como a resposta espectral de cada objeto varrido.

Um sensor LASER é formado principalmente pelo gerador do pulso LASER, ótica de transmissão e recepção do raio e outros componentes eletrônicos (Figura 1) (BRANDALIZE, 2001).

Figura 1: Diagrama do Sensor LASER.



Fonte: GALVANIN e DAL POZ, 2007.

Após o pulso ser gerado, ele é dirigido para a chamada cavidade óptica até um espelho móvel na parte final do sensor. O conjunto óptico de lentes e espelhos orienta os pulsos laser emitindo-os para os objetos. O sinal de retorno é dirigido à parte eletrônica de recepção do sensor, que recebe um sinal analógico de retorno e por meio de um conversor A/D transforma o sinal analógico em digital. O sinal digital da radiação refletida passa por um filtro de interferência (controlador de ruído) que verifica se o sinal recebido possui a mesma intensidade do sinal emitido (GALVANIN, 2007).

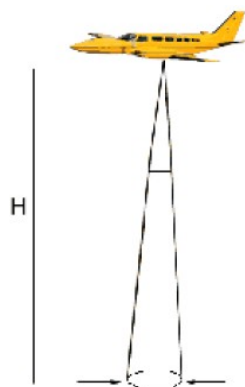
Os pulsos laser gerados são emitidos pelo sistema (na faixa espectral do infravermelho) com o auxílio de um espelho de varredura que redireciona o pulso -

com uma frequência de varredura e diâmetro de espessura, para a superfície de interesse a ser mapeada ou reconstruída tridimensionalmente.

3.1.2 Características do Sistema de Varredura a LASER

A divergência do raio constitui uma característica física do pulso LASER de divergir à medida que se propaga. Tal divergência é relativamente baixa, resultando em um ponto projetado de tamanho pequeno em relação às altitudes de operação (BRANDALIZE, 2001).

Figura 2: Diâmetro do ponto projetado no Solo em função da altura de voo.



Fonte: BRANDALIZE, 2001

O ângulo de divergência pode ser ajustado por meio de elementos óticos apropriados do transmissor para um ponto projetado de dimensões controladas, de acordo com a superfície levantada. Uma divergência menor é necessária para levantamentos de detecção de cabos de linhas de transmissão e para melhor penetração na vegetação. Um pulso LASER com média a alta divergência possui um ângulo “ α ” da ordem de 1,0 mrad. Já um pulso LASER com baixa divergência possui um ângulo “ α ” da ordem de 0,2 mrad. Os sistemas LASER atualmente comercializados possuem variação de divergência de 0,2 mrad a 5 mrad.

O diâmetro do ponto projetado no solo (Eq. 01) é função da altura de vôo (H em m) e da divergência do raio LASER (“ α ” em radianos):

$$D = \alpha \times H$$

1_l
(1)

Para uma altura de vôo de 1.200 m, o diâmetro do ponto projetado para um pulso de alta divergência seria de 1,20 m e para um pulso de baixa divergência seria de apenas 0,24 m (BRANDALIZE, 2001).

Desta forma fica fácil entender que quanto menor for o valor desse diâmetro, resultante dessa divergência, melhores resultados serão obtidos na detecção de bordas das edificações.

A característica mais marcante do sistema de emissão e recepção do pulso é a sua propriedade em medir distâncias com alto grau de acurácia, usualmente, baseada em um instrumento preciso para medida de tempo.

O intervalo de tempo (t) entre a emissão e recepção do pulso é calculado com precisão e a distância entre a plataforma e o objeto perfilado (R) é calculada em função de t e a velocidade da radiação eletromagnética (v - valor fixo), a saber:

$$R = \frac{v \Delta t}{2} \quad (2)$$

Da relação acima, se pode extrair a seguinte equação, a saber (Shan e Toth, 2009):

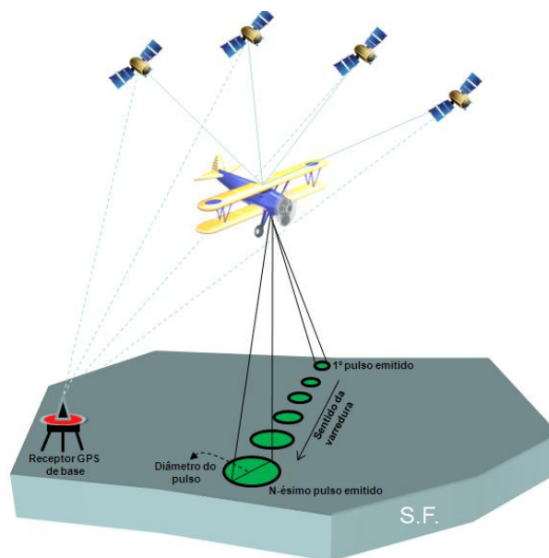
$$\Delta R = \frac{\Delta v t}{2} + \frac{v \Delta t}{2} \quad (3)$$

Onde, ΔR é a precisão da distância, Δv é a precisão da velocidade e Δt é o valor correspondente da precisão de t . A precisão de ΔR é determinada em função de Δt .

Como descrito anteriormente, o GPS é utilizado em modo cinemático pós-processado, que requer um receptor de base (Figura 3.11) em um ponto de coordenadas conhecidas (por exemplo, uma RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – desde que a mesma esteja próxima à área do levantamento). Para tanto, recomenda-se uma distância máxima de 50 Km da base à aeronave, para efetuar o processamento diferencial da nuvem de pontos e garantir

a precisão planimétrica (BRANDALIZE, 2001). A Figura 3 apresenta um esquema do princípio de funcionamento do sistema aerotransportado.

Figura 3: Princípio de funcionamento do sistema aerotransportado.

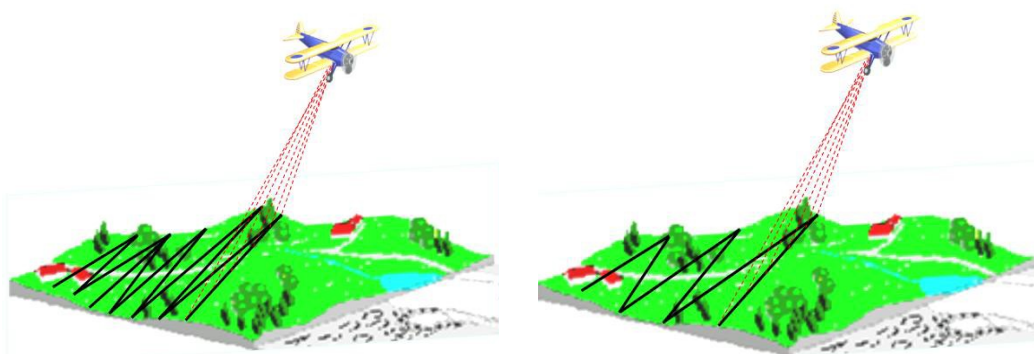


Fonte: Elementos da Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (Santos, D. 2013).

De acordo com a Figura 3, verifica-se visualmente que, o diâmetro do pulso no momento da emissão é consideravelmente inferior quando o mesmo interage com a superfície. O diâmetro do pulso varia de acordo com a altitude de voo estabelecida no levantamento aéreo.

Ainda ao observar a Figura 3 é possível verificar que a varredura do terreno é realizada aleatória e transversalmente à direção do voo, o que possibilita o perfilamento tridimensional da área de interesse com uma frequência que depende das especificações do projeto. A Figura 4 ilustra esquemas de alta e baixa frequência de perfilamento.

Figura 4: Frequência de perfilamento.



(a) Alta frequência de perfilamento;

(b) Baixa frequência de perfilamento.

Fonte: Elementos da Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (Santos, D. 2013).

Para garantir a precisão plani-altimétrica de cada ponto perfilado pelo sistema LiDAR a distância entre os receptores, aerotransportado e de base, não deve ultrapassar 50 km. Um conjunto de receptores de base deverá ser estabelecido, caso não seja possível manter a exigência descrita anteriormente.

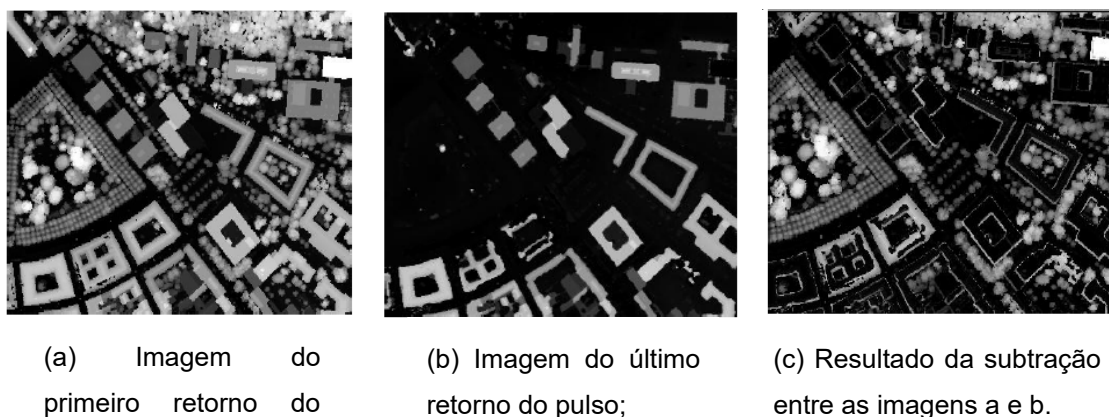
A qualidade dos dados obtidos pelo sistema de varredura a LASER depende da qualidade dos dados fornecidos pelos componentes que compõem o sistema supracitado. Em relação ao GPS, os fatores internos, externos e operacionais, tais como, solução da ambiguidade, perda de sinal dos satélites, frequências L1 e L2, geometria e número de satélites disponíveis, deslocamentos orbitais, modelagem do geóide, multicaminhamento, erro de propagação do sinal na atmosfera, interferências eletromagnéticas e parâmetros incorretos, são os fatores mais importantes a serem cuidadosamente estudados.

Além de considerar todos os possíveis erros descritos acima, ainda é necessário tomar algumas precauções para a obtenção da precisão requerida, tais como, realizar planejamento adequado, operações de voo dentro de limites apropriados (para evitar perda de sinal do GPS) já descritos e uma boa distribuição das estações GPS de base em solo.

A altura de voo é fator a ser considerado na degradação da precisão das medidas relacionadas ao sistema LASER. Outra característica a ser evidenciada é o problema de divergência dos pulsos, que resultam em pequenas diferenças na interpretação dos resultados que aqui serão chamados de borda de divergência.

Os erros de divergência podem ser visualizados através de uma operação de subtração de imagens do primeiro (Figura 5a) e último retorno do pulso (Figura 5b). A Figura 5c mostra o resultado desse procedimento.

Figura 5: Imagens em níveis de cinza obtidos por um processo de quantização de coordenadas altimétricas.



Fonte: Elementos da Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (Santos, D. 2013).

O pulso LASER ao incidir sobre a borda do telhado de uma edificação, dependendo do tamanho de seu diâmetro, pode interceptar parcialmente a borda do telhado e ocorrer resposta de retorno devido às reflexões no solo e na fachada lateral do edifício (Figura 6), ou outras diversas reflexões do pulso, dependendo do tipo de material perfilado, até seu retorno ao sistema. A Figura 6 mostra as intercepções parciais do pulso e um exemplo do processo de reflexão do pulso.

Figura 6: Intercepção parcial do pulso na borda do telhado e duas reflexões do pulso (solo e fachada lateral).



Fonte: Elementos da Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (Santos, D. 2013).

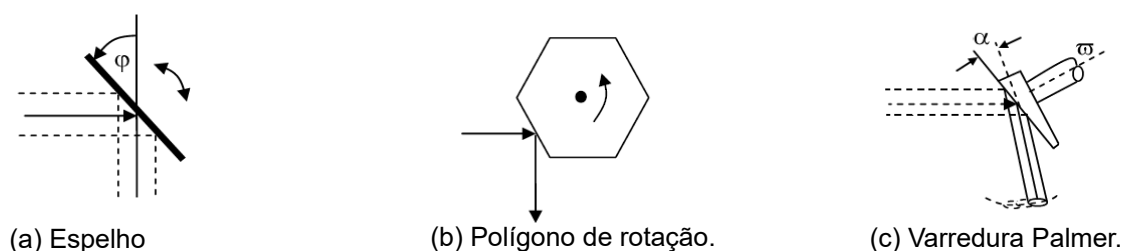
Verifica-se também que as bordas das edificações contidas na imagem do último retorno do pulso (Figura 5b) são mais estreitas que as do primeiro retorno do pulso. Fato ocorrido devido ao último retorno incidir sobre o solo e posteriormente na fachada lateral da edificação (reta pontilhada, Figura 6) enquanto o primeiro retorno do pulso incide diretamente na borda do telhado (feixe de retas externas e continuas, Figura 6).

Outro fator relacionado ao erro de divergência é a resposta de retorno do pulso após interagir com o objeto perfilado. Por ser esta uma função de dispersão de energia eletromagnética dentro da área do diâmetro do pulso pode-se dizer que, quanto maior a inclinação do pulso em relação ao objeto perfilado na superfície, maior será o erro de divergência e consequentemente maior a incerteza posicional do alvo. Para que não ocorram áreas de oclusão, devido ao fator supracitado, é necessário realizar um recobrimento da área de interesse com o mínimo de sobreposição possível.

3.1.3 Espelhos de Varredura e Objetos não Perfilados

Como descrito anteriormente o sistema LiDAR utiliza espelhos de varredura ótico-mecânica. Existe, basicamente, 3 tipos de espelhos de varredura. A Figura 7 apresenta os espelhos de varredura mais utilizados nos sistemas desenvolvidos.

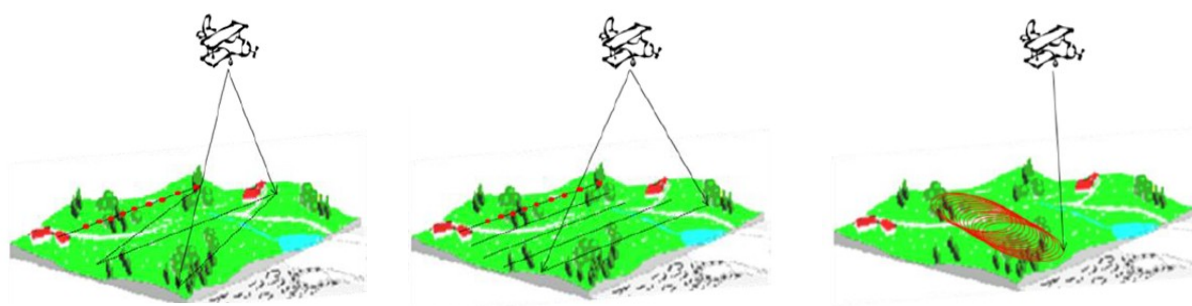
Figura 7: Mecanismos de varredura.



(FONTE: WEHR e LOHR, 1999)

Os espelhos osciladores (Figura 7a) produzem uma configuração de perfilamento denominada linha em “zig-zag” ou “dente de serra” (Figura 8a). Os espelhos de polígono de rotação (Figura 7b) produzem uma varredura unidirecional com linhas paralelas (Figura 8b). Já os espelhos do tipo Palmer (Figura 7c) produzem efeitos de modelos elípticos na superfície (Figura 8c).

Figura 8: Configuração da varredura em relação ao tipo de espelho.



(a) Linhas em “zig-zag”
ou “dente de serra”.

(b) Linhas paralelas.

(c) Modelos elípticos

Fonte: Elementos da Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (Santos, D. 2013).

A Figura 9a apresenta uma imagem de intensidade LASER resultante da varredura de um sistema com tipo de espelho oscilador. Os pontos na cor preta representam objetos que não foram perfilados pelo sistema devido à característica da configuração de perfilamento do tipo de espelho supracitado. Neste caso é necessário realizar uma amostragem dos dados por meio de técnicas de interpolação (vizinho mais próximo, bilinear, triangulação de Delanay etc). A Figura 9b apresenta uma imagem de intensidade derivada de espelhos do tipo Palmer.

Figura 9: Imagem de intensidade LASER.



(a) Derivada de espelhos
osciladores.



(b) Derivada de espelhos tipo Palmer.

Fonte: Elementos da Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (Santos, D. 2013).

Nota-se a diferença na qualidade geométrica entre as imagens apresentadas em as ambas figuras. O sistema LiDAR fornece como produto final uma nuvem de pontos distribuídos irregularmente armazenados em um arquivo ASCII de linhas por

ponto, composto por um conjunto de coordenadas tridimensionais referenciadas no sistema de projeção admitido no trabalho, cuja manipulação pode-se gerar um MDT e um MDS da região perfilada.

A densidade dos pontos obtidos atinge vários pontos por m^2 , dependendo da altura de vôo e a frequência de perfilamento. A frequência do sistema se situa na faixa de 500 a 1500 nm, com valores de 1040 a 1060 nm, sendo as mesmas refletidas pelos objetos contidos no terreno. Os pontos coletados podem ser utilizados diretamente ou podem ser filtrados e interpolados de forma a gerar uma grade regular de pontos.

3.1.4 Produtos Oriundos de Dados LiDAR

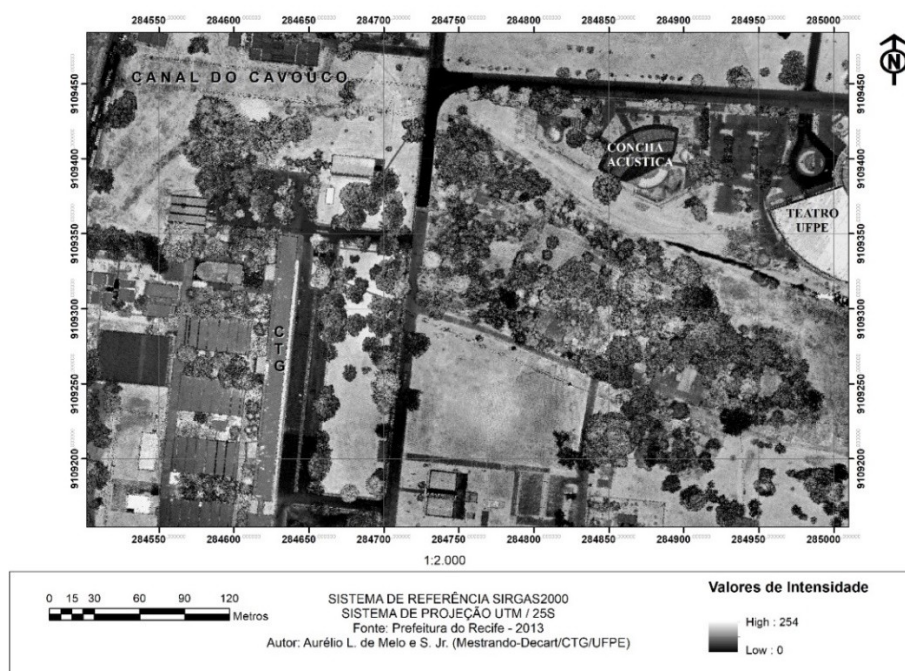
Alguns sistemas de perfilamento a LASER possuem uma característica marcante que está relacionada com a capacidade de reflectância de determinados objetos. Neste caso são disponibilizados dados de intensidade de retorno dos pulsos ao sistema, que variam de acordo com a superfície perfilada, isto é, a superfície pode absorver ou refletir pulsos de forma diferente. A superfície do material perfilado determina a porcentagem de pulsos que retorna ao sensor. A reflexão do pulso depende basicamente das propriedades da superfície perfilada. A detecção de luz refletida em uma superfície é feita por um componente receptor chamado fotodiodo ou *Avalanche Photo Diodes* (APD) e sua sensibilidade é de grande importância para a captação do sinal refletido (Galvanin e Dal Poz, 2013).

Segundo Wever e Lindenberger (1999), a reflexão é geralmente difusa, isto é, não orientada. A refletividade de terrenos arenosos é da ordem de 10% a 20%, entre 30% e 50% no caso de vegetação e de 50% a 80% no caso de gelo e neve. Em relação à água, pode-se obter refletividade suficiente com um ângulo de varredura menor que 10 graus.

A porcentagem de reflexão dos materiais presentes na superfície tem influência sobre a quantidade de pulsos que retornam ao sistema. Neste caso, a reflexão dos materiais depende basicamente da sensibilidade a determinados comprimentos de onda e das suas características (Galvanin e Dal Poz, 2013).

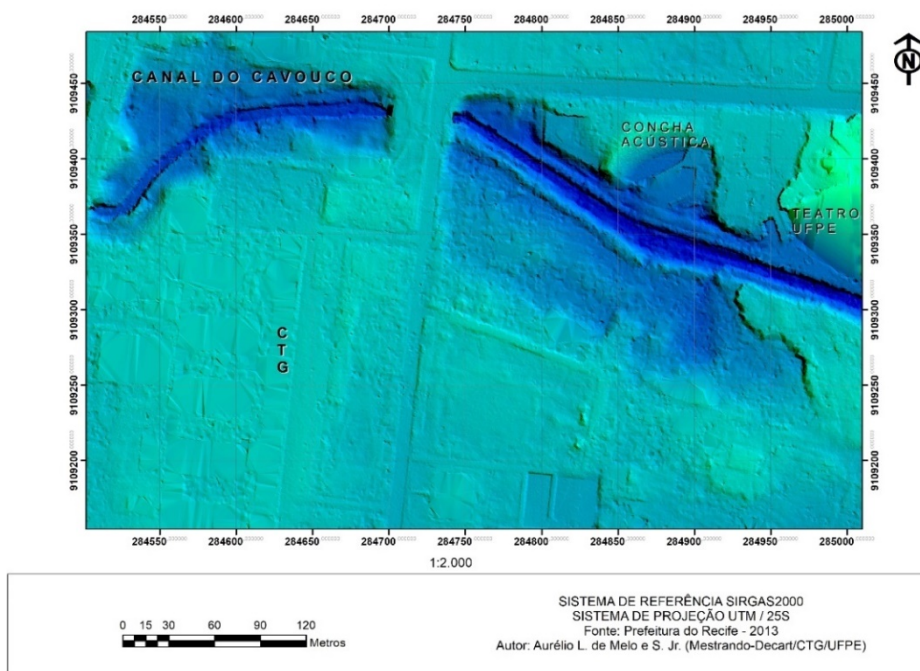
Por fim, além das coordenadas obtidas por esses feixes, cada ponto medido recebe informação de nível de intensidade do alvo, o que permite a geração de imagens de intensidade e imagens hipsométricas, Figuras 10 e 11 respectivamente.

Figuras 10: Ilustração de uma Imagem de Intensidade que mostra uma parte do Campus Joaquim Amazonas, UFPE.



Fonte: O autor.

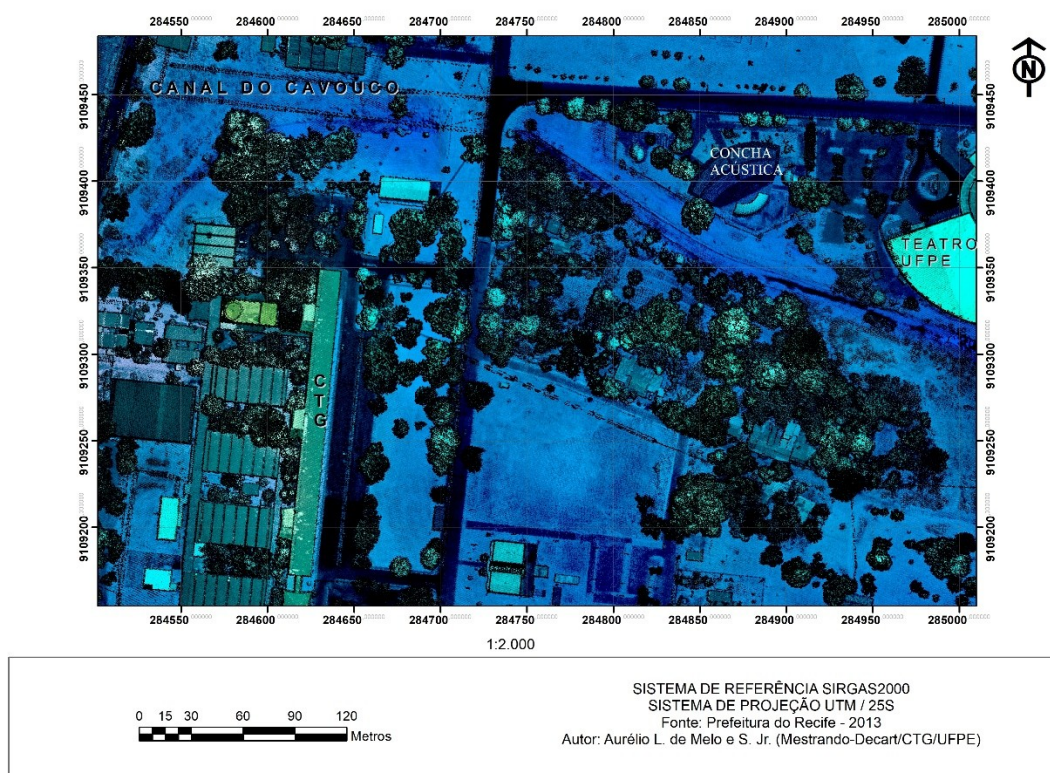
Figuras 11: Ilustração de uma Imagem Hipsométrica que mostra uma parte do Campus Joaquim Amazonas, UFPE.



Fonte: O autor.

A fusão entre essas duas imagens irá gerar a imagem de composição que facilita a interpretação e visualização das feições edificadas. A Figura 12 demonstra bem o ganho interpretativo dessas feições no terreno.

Figura 12: Ilustração de uma Imagem de Composição que mostra uma parte do Campus Joaquim Amazonas, UFPE.



Fonte: O autor.

3.2 AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO PLANIMÉTRICA – (PEC-PCD)

Para analisar a qualidade dos produtos cartográficos oriundos do LiDAR considerou-se as tolerâncias estabelecidas pelo indicador estatístico de qualidade posicional PEC – PCD (Padrão de Exatidão Cartográfico para Produtos Cartográficos Digitais). Esse indicador originou-se do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica), cujas normas foram estabelecidas pelo Decreto Federal 89.817 de 1984 e cuja finalidade na época foi garantir a exatidão cartográfica do produto analógico.

Entretanto, o uso de novas tecnologias e o aumento da demanda por informação geoespacial acarretou a necessidade de se criar novos padrões de qualidade de forma a englobar também os produtos digitais.

Foi com base nessa necessidade que o Exército Brasileiro definiu o PEC – PCD dentro da Especificação Técnica dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG), cujas regulamentações são utilizadas também pela Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE).

O Decreto Federal 89817/84 estabelece três classes de carta, são elas: A, B e C, porém, com a criação do PEC-PCD foi estabelecida mais uma classe, de forma que os produtos cartográficos possam ser classificados em A, B, C ou D (Tabela 1).

Tabela 1: Padrão de Exatidão Cartográfico dos Produtos Cartográficos Digitais Estabelecidos para Classe A.

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	0,28	0,1	0,56	0,3	1,40	0,8	2,80	1,7	7,00	4,2	14,0	8,5	28,0	17,0	70,0	42,5

Fonte: Adaptado da ET-ADGV (2016).

3.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

O uso da cor no processamento de imagens é bastante vantajoso, uma vez que a cor, em muitos casos, pode facilitar a identificação e extração de objetos em uma cena (GONZALEZ e WOODS, 2010).

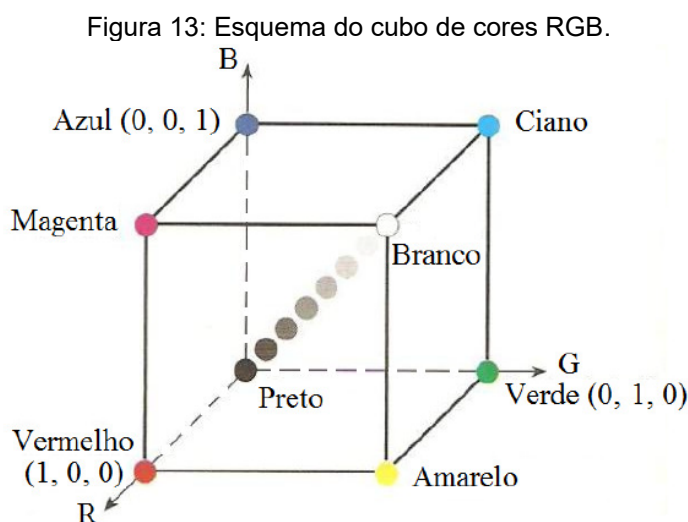
A modelagem da cor é necessária e tem por objetivo facilitar a especificação das cores em alguma forma padronizada. Assim, um modelo de cores corresponde a um sistema de coordenadas, em um subespaço em que cada cor representa um ponto (GONZALEZ e WOODS, 2010).

Aqui serão apresentados os modelos RGB, IHS, Morfologia Matemática e Classificação de Imagens por K-médias, utilizados nos processamentos de imagens nessa pesquisa.

3.3.1 Modelo RGB

O modelo RGB é formado por um sistema de coordenadas cartesianas. O subespaço de cores utilizado é o cubo, no qual os valores RGB primários (vermelho, verde e azul) estão em três vértices, as cores secundárias ciano, magenta e amarelo

estão em outros três vértices, o preto está na origem, e branco está no vértice mais distante da origem. A escala de cinza estende-se ao longo do segmento de reta que une o preto até o branco. Por conveniência todos os valores são normalizados, e assim, os valores de R, G e B estão no intervalo $[0, 1]$ (Figura 13) (GONZALEZ e WOODS, 2010).



Fonte: Gonzalez e Woods 2010.

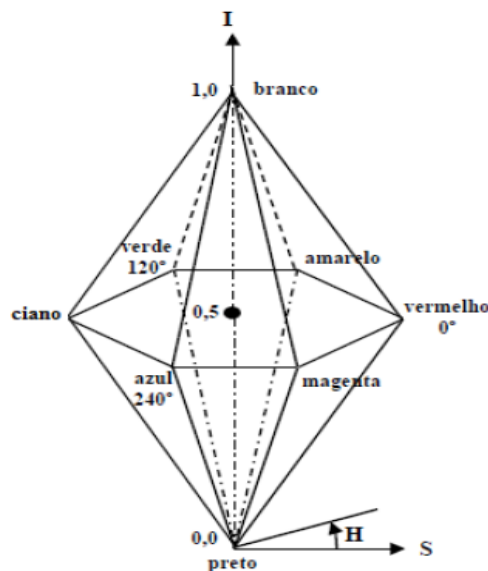
3.3.2 Modelo IHS

O modelo IHS é definido em termos de matiz (*Hue*), saturação (*Saturation*) e brilho (*Intensity*). O matiz está relacionado com a cor pura (azul, amarelo ou verde puros), a saturação é a medida da diluição de uma cor pura por luz branca e o brilho incorpora a noção acromática de intensidade. Esse modelo de cores diferente dos modelos de cores RGB e CMY, se aproxima mais da percepção humana. Isso porque os seres humanos descrevem um objeto em termos de matiz, saturação e brilho, não em termos de três cores primárias que quando combinadas formam uma imagem colorida (GONZALEZ e WOODS, 2010).

A representação do espaço de cor IHS é composta por dois cones hexagonais unidos pela base. Esse espaço de cores é representado por um eixo de intensidade na posição vertical e os pontos de cor estão situados em planos perpendiculares a esse eixo. O matiz do ponto é o ângulo formado a partir do eixo vermelho. O eixo vermelho corresponde ao ângulo de 0° , portanto ao valor de matiz igual a 0, esse valor aumenta no sentido anti-horário a partir desse ponto. A saturação é o

comprimento do vetor que parte da origem até o ponto, a origem considerada é o eixo vertical. Esses elementos estão representados na Figura 14 (FERNANDES, 2016).

Figura 14: Espaço de cores IHS.



Fonte: adaptado de <http://www.ufrgs.br/engcart/PDASR/formcor.html>

3.3.3 Filtragem Morfológica: Dilatação e Erosão

O filtro morfológico consiste essencialmente na classificação de pontos como pertencentes ou não - pertencentes à superfície do terreno pela aplicação de operações de Dilatação e Erosão da grade. A Erosão Morfológica é basicamente o “encolhimento” de uma imagem enquanto a Dilatação Morfológica, também apontada na literatura como Dilação, é uma transformação morfológica que implica no “engordamento” de imagens (PACHECO, 2011). Maiores detalhes em CANDEIAS (1997).

A dilatação em níveis de cinza de f por b é denotada $f \oplus b$ e definida (GONZALEZ e WOODS, 2000) como:

$$(f \oplus b)(s, t) = \text{Max} \{ f(s - x, t - y) + b(x, y) \mid (s - x, t - y) \in Df; (x, y) \in Db \} \quad (4)$$

A erosão em níveis de cinza de f por b é denotada $f \ominus b$ e definida como:

(5)

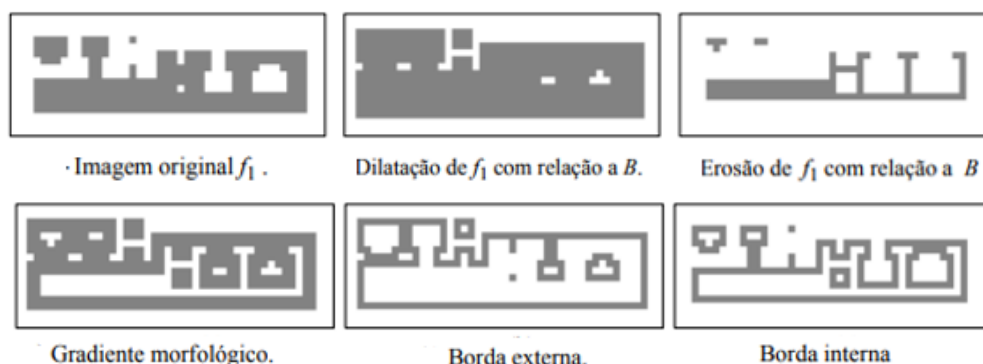
$$s, t = \text{Min} \{ f(s+x, t+y) + b(x, y) \mid (s+x, t+y) \in Df; (x, y) \in Db \}$$

$$(f \oplus b)$$

Em ambos os casos, f representa a imagem sendo operada e b é um segundo conjunto, chamado de elemento estruturante. Df e Db são os domínios de f e b , respectivamente.

A Figura 15 apresenta o efeito da dilatação, erosão e do resultado de borda obtido subtraindo a dilatação da erosão, a dilatação da imagem original, e também a imagem original subtraída da erosão.

Figura 15: Efeitos da morfologia matemática em uma imagem binária.



Fonte: Adaptado de Candeias (1997).

3.3.4 Classificação por K-Médias

É um classificador não supervisionado que utiliza uma abordagem de agrupamento. O espaço de atributos da imagem é partido em K grupos. A partir dessa situação inicial, e cada pixel da imagem é alocado ao centro mais próximo segundo a distância euclidiana (MENESES, 2012). MacQueen (1967) e Jain (2010) mostram um detalhamento do processo da classificação k-médias

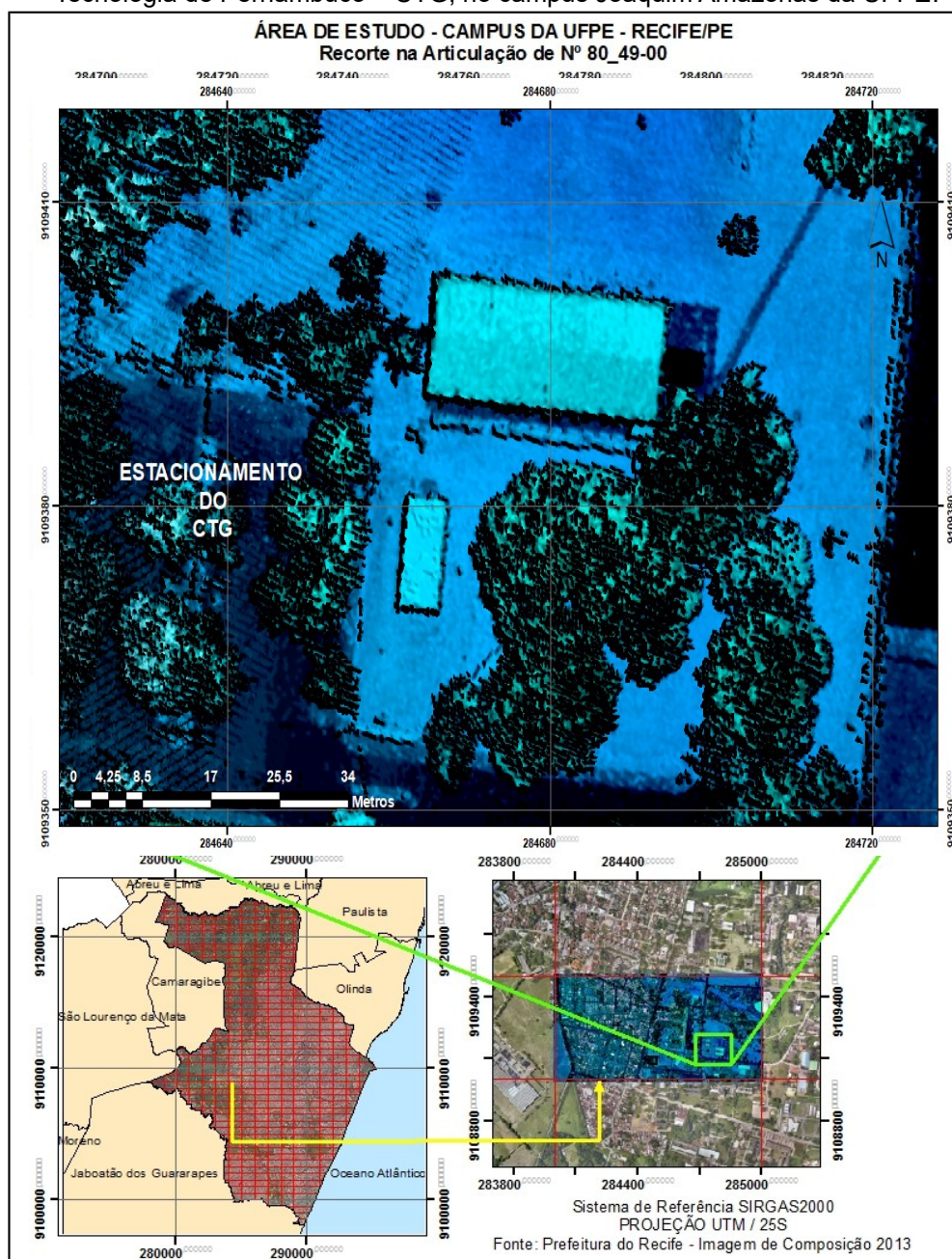
Desta forma, a classificação de Imagens consiste em reconhecer padrões de objetos homogêneos que são utilizados para mapear áreas da superfície terrestre as quais correspondem aos temas de interesse. O interessante dessa classificação é que o usuário precisa apenas fornecer a quantidade de classes e o número de iterações.

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÕES DA ÁREA

A área escolhida está localizada dentro do Campus Joaquim Amazonas, UFPE, onde foram selecionadas na imagem duas edificações pertencentes ao Centro de Tecnologia de Pernambuco – CTG (Figura 16).

Figura 16: Área de estudo com ampliação específica para as edificações pertencente ao Centro de Tecnologia de Pernambuco – CTG, no campus Joaquim Amazonas da UFPE.



Fonte: O autor.

Esta área foi escolhida devido à facilidade de um possível acesso para levantamentos topográficos e ainda por Recife ter sido contemplado com o projeto de voo aéreo elaborado pela prefeitura do Recife, intitulado: “*Serviços de Engenharia para Cobertura Aerofotogramétrica, Perfilamento a LASER Aerotransportado, com Obtenção de Polígonos 2D, 3D e Restituição Estereofotogramétrica*”, realizado no ano de 2013, onde o campus da Universidade Federal de Pernambuco foi uma das primeiras áreas a terem os dados LiDAR disponíveis, tais como: MDT, MDE, Imagens de Intensidade, Imagens Hipsométricas e Imagens de Composição.

Além disso, as edificações apresentadas na área escolhida possuem características que aperfeiçoam e facilitam os métodos apresentados na definição de suas bordas, pois são formadas por telhados de edifícios que se apresentam por geometrias retangulares, simples e não conjugadas.

Os dados referentes a essa área serão utilizados como parâmetros de análises estatísticas utilizando as especificações impostas pela PEC-PCD.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Materiais

A Secretaria de Mobilidade e Controle Urbano (SEMOC) da prefeitura do Recife forneceu os dados oriundos do perfilamento a laser, e a Secretaria de Finanças (SEFIN) foi responsável pelo fornecimento de amostras da sua Base de Lotes. Esses dados foram testados e aprovados pelo ITEP – Instituto de Tecnologia de Pernambuco. As ortofotos fornecidas foram obtidas como dados adicionais de referência. O Sistema de Referência de todos os dados estão em SIRGAS2000, no Sistema Projeção UTM – Zona 25S e a densidade da nuvem de pontos MDE (média) foram de 5,51 p/m².

A Prefeitura do Recife enfatiza que todos os dados do projeto de voo realizados no ano de 2013 estão disponíveis para essa pesquisa. A EMPREL, órgão da Prefeitura do Recife responsável por apoiar todas as iniciativas de tecnologia da informação e comunicação da administração municipal, por possuírem computadores mais robustos e *softwares* licenciados, também apoia essa pesquisa

de Mestrado e disponibiliza, caso haja necessidade, de sua infraestrutura num eventual processamento de dados.

Equipamentos

- Computadores: Notebook e Desktop;
- Estação Total Topcon GPT-3200N: precisão angular de 5" e precisão linear de 5mm + 5ppm*D; (Disponibilizado pelo Departamento de Cartografia/LATOP).

Acessórios

- Caderneta de Campo, piquete, prisma, tripé, trena e base nivelante;

Softwares

- SPRING (versão 5.5.1);
- ArcGis 10.4.1 (Licença da Prefeitura do Recife);
- AscGeoTop (GARNÉS, 2014);
- QGIS (versão 2.14.9);
- Excel 2013;
- Word 2007;

Arquivos

- Modelo Digital do Terreno - MDT;
- Modelo Digital de Elevação - MDE;
- Imagens de Intensidade;
- Imagens de Hipsométricas;
- Imagens de Composição;
- Relatórios de conclusão e validação do projeto de Voo(ENGEFOTO).

4.2.2 Métodos

Na Área de estudo citada, encontram-se dois edifícios que fazem parte do laboratório de nanoestruturas do CTG (Figura 17), cujos vértices dos cumes foram levantados pelos métodos descritos a seguir.

Figura 17: Laboratório de Nanoestruturas (CTG).



Fonte: Google Earth, 2017.

Com o objetivo de analisar a precisão dos vetores que delimitam as bordas das edificações segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC- PCD), realizou-se dois experimentos para obtenção de coordenadas de pontos de interesse, a saber: levantamento topográfico e vetorização a partir de imagens de composição oriundas da nuvem de pontos do LIDAR (Light Detection and Ranging).

4.2.2.1 Levantamento Topográfico (Método da Poligonação)

Foi estabelecida uma poligonal de quatro vértices (EPS07, E1, E2 e E3) dos quais foram levantados os pontos de interesse nas quinas e topos das duas edificações, os pontos foram: P1, P2, P3, P4, P6, P7, P9 e P10.

Segundo Erba et al. (2005), uma poligonal constitui-se de uma série de alinhamentos consecutivos, dos quais a extensão e a direção são medidos no campo possibilitando o levantamento de pontos de detalhes necessários para a completa descrição da área. Com a finalidade de garantir maior qualidade às medições utilizou-se o método de centragem forçada que, segundo Kahmen & Faig

(1988), consiste em não modificar a centragem durante o procedimento de medição. Isso garante que nas medições pelo método de poligonação apenas sejam trocados a alidade da Estação Total, os adaptadores base-prisma e os sinalizadores de alvos. Os tripés e as bases nivelantes centrados permanecem fixos sobre o vértice topográfico até que as medições sejam finalizadas.

O processamento da poligonal foi realizado no *software AstGeoTop*, utilizando como base para o georreferenciamento o alinhamento definido pelas estações EPS07 e EPS04, como Azimute de partida, que são pontos pertencentes à Rede Cadastral do Campus Joaquim Amazonas da UFPE e cujas coordenadas na projeção UTM e no sistema topocêntrico local se encontram na Tabela 2.

Tabela 2: Coordenadas em UTM e no sistema topocêntrico local das estações EPS04 e EPS07.

ESTAÇÕES	COORDENADAS UTM		COORDENADAS NO SISTEMA TOPOCÊNTRICO LOCAL	
	E (m)	N (m)	X (m)	Y (m)
EPS04	284742,576	9109481,118	149811,215	249927,136
EPS07	284650,091	9109407,837	149718,398	249854,310

Fonte: Infraestrutura de dados Geo/Top (2016).

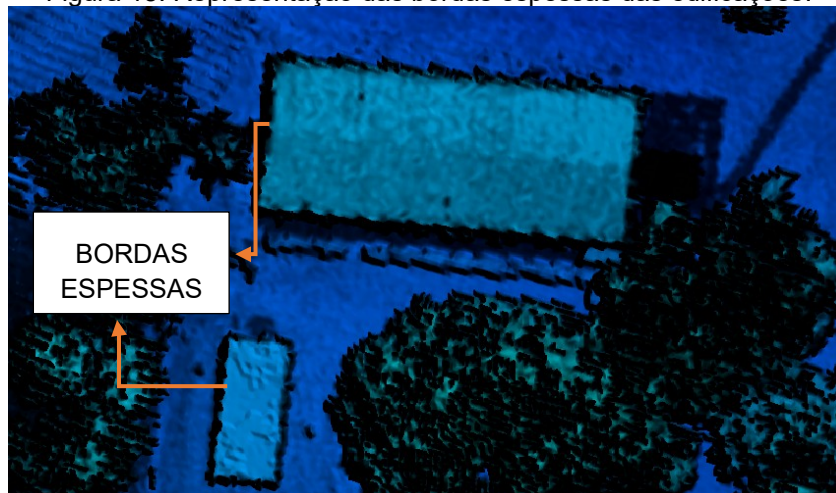
4.2.2.2 Vetorização de Feições

Outro método para obtenção das coordenadas foi realizado no *software* QGIS e consistiu na aquisição vetorial dos vértices dos cumes dos objetos de estudo. O produto raster escolhido para a extração das feições foi a imagem de composição, oriunda da fusão das imagens de intensidade e imagens hipsométricas, devido a esta apresentar uma melhor acurácia visual.

Durante o processo de extração das feições percebeu-se a influência das bordas dos objetos na interpretação de suas faces, fator este que teve de ser investigado com mais cautela no decorrer do trabalho. Observou-se que algumas arestas do objeto levantado possuem maiores espessuras devido ao efeito das bordas e que esse fenômeno é acentuado quando são utilizadas escalas grandes, o que dificulta o processo de interpretação na vetorização (Figura 18). Notou-se que essas bordas são resultado da projeção na nuvem de pontos tridimensionais no plano da imagem. No caso específico das edificações prediais, que tiveram seus topos levantados, a varredura a LASER obteve pontos tridimensionais não só da sua cobertura, mas também de suas faces verticais. A nuvem de pontos deu origem às imagens, e os pontos dos componentes verticais da estrutura que possuíam

coordenadas planimétricas idênticas ou semelhantes foram sobrepostos ou ficaram bem próximos, gerando uma borda espessa.

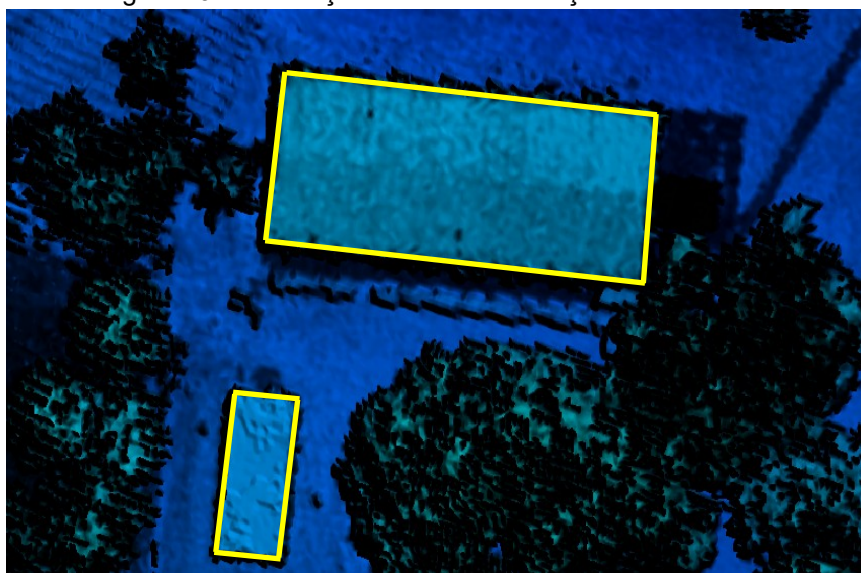
Figura 18: Representação das bordas espessas das edificações.



Fonte: O Autor.

Diante disto foram realizadas aquisições vetoriais na escala 1:1000 (Figura 19) e analisadas as coordenadas dos pontos obtidos comparando-as com as coordenadas obtidas por levantamento topográfico.

Figura 19: Vetorização das duas edificações analisadas.



Fonte: O autor.

4.2.3 Resultados

A poligonal descrita no subtítulo 4.2.1, alínea 4.2.1.1, processada no modo planialtimétrico do software AstGeoTop, obteve como erro de fechamento angular 8,8", erro de fechamento linear 0,0232 m e erro relativo linear 1/8452,7184.

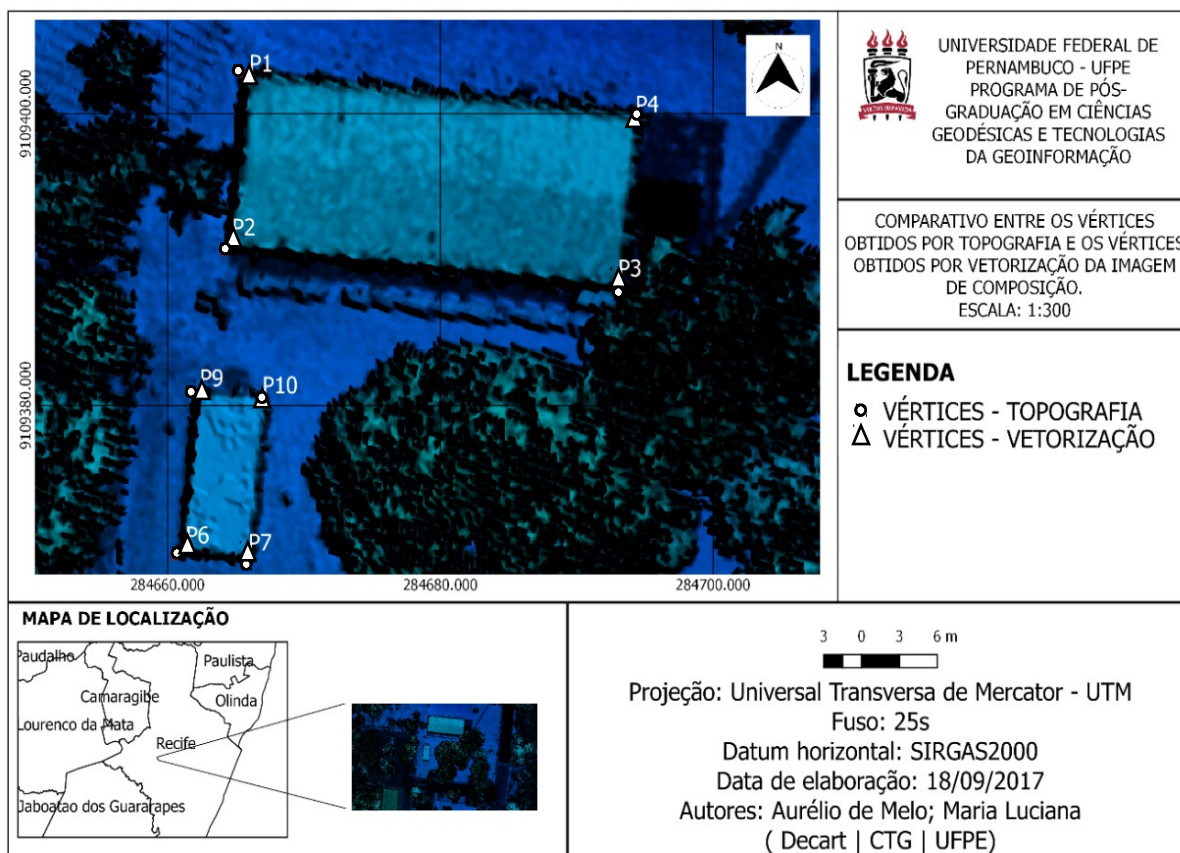
A Tabela 3 mostra os resultados obtidos por levantamento topográfico e os resultados obtidos pela vetorização exercida na imagem de composição, assim como as discrepâncias ΔE e ΔN entre os dois métodos.

Tabela 3: Coordenadas UTM / SIRGAS 2000 obtidas por dois métodos e suas discrepâncias

PONTOS	TOPOGRAFIA		VETORIZAÇÃO		ΔE (m)	ΔN (m)
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)		
P1	284665,358	9109402,808	284666,006	9109402,504	0,648	0,304
P2	284664,145	9109390,581	284664,734	9109391,270	0,588	0,689
P3	284693,086	9109387,668	284693,039	9109388,461	0,047	0,793
P4	284694,257	9109399,898	284694,312	9109399,695	0,055	0,203
P6	284660,568	9109369,732	284661,341	9109370,169	0,773	0,437
P7	284665,802	9109369,203	284665,925	9109369,673	0,123	0,470
P9	284661,797	9109380,882	284662,372	9109380,941	0,575	0,059
P10	284666,984	9109380,388	284666,956	9109380,445	0,028	0,057

A Figura 20 mostra um mapa representativo dos vértices obtidos pelos dois métodos.

Figura 20: Planta de comparação entre os vértices obtidos por topografia e os vértices obtidos por vetorização.



Fonte: O autor

Segundo a ET-ADGV (2016), para que um produto digital possa ser aceito como produto de Referência do Sistema Cartográfico Nacional (SCN), e consequentemente da INDE, assim como o estabelecido para o PEC, 90% dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico, quando comparados com as suas coordenadas levantadas em campo por método de alta precisão, devem apresentar os valores iguais ou inferiores aos previstos pelo PEC-PCD, devendo ainda apresentar os valores de erro padrão (EP) também iguais ou inferiores aos previstos.

As escalas abrangidas pela PEC-PCD são 1:1.000, 1:2.000, 1:5.000, 1:10.000, 1:25.000, 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000. Sendo as duas primeiras as analisadas nesse trabalho e cujos padrões de qualidade estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de padrão de qualidade da PEC-PCD nas escalas 1:1.000 e 1:2.000.

PEC - PCD	1:1000			1:2000		
	PEC (m)	EP (m)	EP ² (m)	PEC (m)	EP (m)	EP ² (m)
A	0,28	0,17	0,03	0,56	0,34	0,12
B	0,50	0,30	0,09	1,00	0,60	0,36
C	0,80	0,50	0,25	1,60	1,00	1,00
D	1,00	0,60	0,36	2,00	1,20	1,44

Na Tabela 5 pode-se contemplar os resultados obtidos quanto aos erros sistemáticos pelo teste de t de Student, observando um nível de confiança $(1 - \alpha)$ igual a 90% ($\alpha = 0,10$). Permitindo assim, a realização de uma análise de tendência.

Tabela 5: Tabelas de análises para erros sistemáticos pelo teste de t de Student.

PONTOS	ESCALA 1:1000			
	RESÍDUOS		$(\Delta E - \mu E)^2$	$(\Delta N - \mu N)^2$
	ΔE	ΔN		
P1	0,6327	-0,3710	0,0718	0,4575
P2	0,5757	0,7430	0,0445	0,1915
P3	0,2097	1,1160	0,0241	0,6571
P4	-0,0088	-0,3190	0,1396	0,3898
P6	0,9777	0,3200	0,3756	0,0002
P7	0,1887	0,5310	0,0310	0,0509
P9	0,3837	0,2820	0,0004	0,0005
P10	-0,0408	0,1410	0,1645	0,0270
Σ	2,9186	2,4430	0,8514	1,7746
μ	0,3648	0,3054	MÉDIA	
σ	0,3488	0,5035	DESVIO PADRÃO	
t	2,958759366	1,715426563	PARAMETRO DE ANÁLISE DE TENDENCIA	
t	2,958759366	1,715426563	1,895 (Tabelado pela distribuição "t" de Student)	
TESTE (t)	Possui erro sistemático	Não possui erro sistemático		

(a) Tabela de análise para erros sistemáticos

NOMENCLATURAS	
Σ	SOMATÓRIO
μ	MÉDIA
σ	DESVIO PADRÃO
t	PARÂMETRO PARA ANÁLISE DE TENDÊNCIA

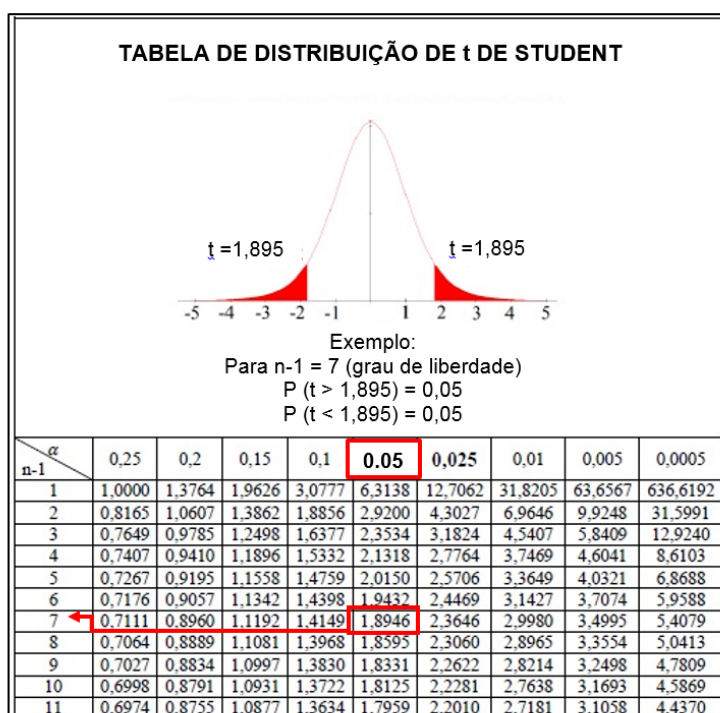
(b) Tabela de nomenclaturas

PARÂMETROS		
n =	8	TAMANHO DA AMOSTRA
$\alpha =$	0,1	ESTATÍSTICA t PARA GRAU DE CONFIANÇA IGUAL A 90%
$\alpha/2 =$	0,05	PARÂMETROS PARA VALOR LIMITE DE t PARA UM GRAU DE CONFIANÇA IGUAL A 90%
n-1 =	7	
t (tabelado) =	1,895	VALOR DE t OBTIDO NA TABELA

c) Tabela de Parâmetros para os testes

A partir do número de pontos coletados, obtém-se um valor limite “ t ” a partir dos valores de “ $n-1$ ” e “ $\alpha/2$ ”, obtido por meio da tabela bilateral (Figura 21). Dessa forma se o valor absoluto calculado for menor que o tabelado, a imagem estará livre de erros sistemáticos.

Figura 21: Exemplo de utilização de tabela bilateral para obtenção dos valores limites de “ t ” de Student para o grau de liberdade $n-1=7$.



Fonte: Adaptado de SUÁREZ, 2012.

Para avaliar a precisão, a análise consiste em verificar, a partir de amostras de discrepâncias, se o valor do desvio-padrão populacional estimado é estatisticamente menor do que o valor limite admissível em precisão de acordo com o PEC-PCD. O teste estatístico é realizado comparando-se o desvio-padrão obtido da amostra dos resíduos com o Erro-Padrão esperado da classe do PEC-PCD desejado (Silva, 2014). Esse resultado pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6: Cálculo do quadrado do Erro-Padrão e Teste do qui-quadrado para definição de classe da PEC-PCD na escala 1:1000.

ESCALA 1:1000		
	ΔE (m)	ΔN (m)
σ	0,348755	0,503508
σ^2	0,12	0,25

(a) Erro Padrão.

PEC - PCD	1:1000			$\sigma^2 (\Delta E)$	$\sigma^2 (\Delta N)$	TESTES	
	PEC (m)	EP (m)	EP ² (m)			E	N
A	0,28	0,17	0,03	0,12	0,25	NÃO	NÃO
B	0,50	0,30	0,09	0,12	0,25	NÃO	NÃO
C	0,80	0,50	0,25	0,12	0,25	SIM	SIM
D	1,00	0,60	0,36	0,12	0,25	SIM	SIM

(b) Teste do qui-quadrado.

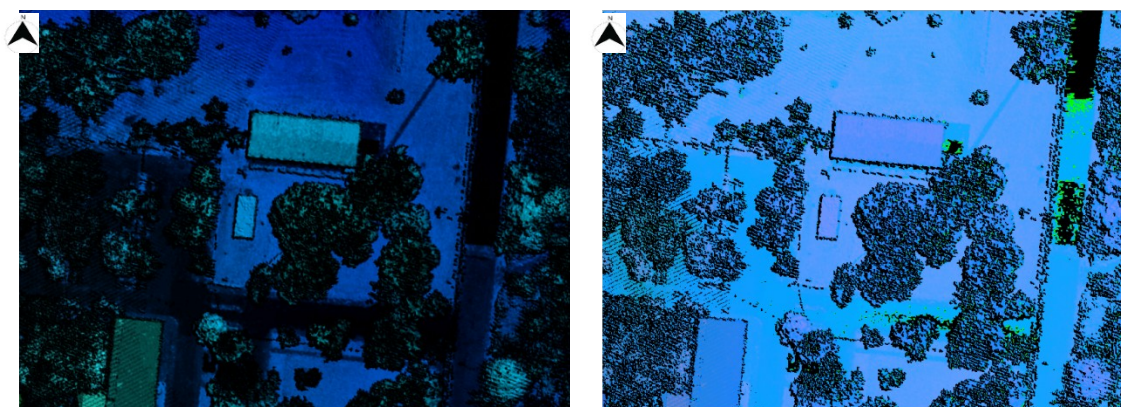
A planimetria atingiu um Padrão de Exatidão Cartográfica PEC-PCD classe C, na escala 1:1000, pois o teste qui-quadrado para as classes A e B não passou em nenhuma das componentes E e N.

Contudo, na tentativa de se obter resultados automatizados na extração dos vetores que representam as bordas das edificações, ou ainda, que possa facilitar a interpretação dos mesmos no processo de vetorização, algumas técnicas de processamento digital de imagens foram inicializadas na pesquisa.

4.2.3.1 Transformação de RGB para IHS

Nos estudos realizados sobre o processamento digital de imagens, observou-se que a transformação do modelo RGB em um modelo IHS, a componente I apresenta uma visão geral da área, a componente H separa os alvos pelo matiz e a componente S mostram as bordas dos objetos edificados, como mostra a Figura 22.

Figura 22: Resultados obtidos na transformação do modelo RGB para o modelo IHS sobre o recorte de imagem da Área I de estudo.

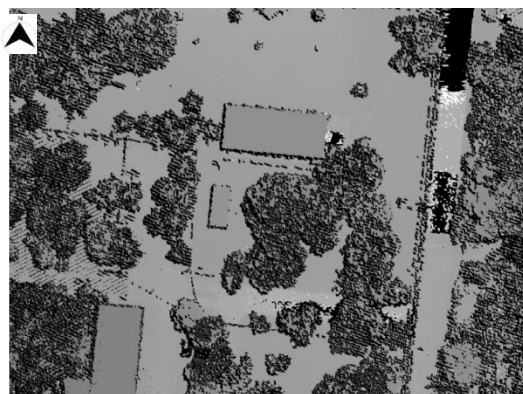


(a) Imagem RGB.

(b) Imagem IHS.



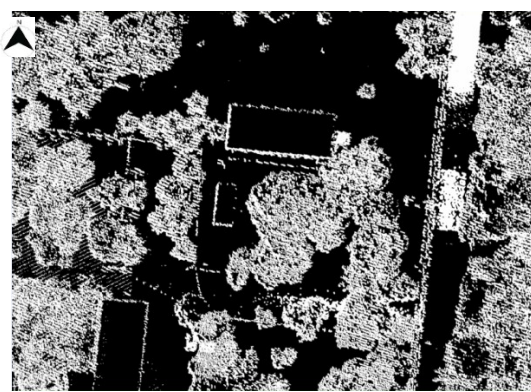
(c) Componente I.



(d) Componente H.



(e) Componente S.



(f) Componente S binarizado.

Fonte: O autor.

Utilizou-se a binarização da componente S e obteve-se o resultado apresentado na imagem (f) da Figura 21.

4.2.3.2 Morfologia Matemática: Dilatação e Erosão

Outro teste foi executado utilizando a filtragem de Dilatação e Erosão, e os resultados obtidos podem ser observados na Figura 23.

O filtro morfológico consiste essencialmente na classificação de pontos LIDAR como pertencentes ou não pertencentes à superfície do terreno pela aplicação de operações de E



Figura 23:

a Matemática.

a) Dilatação;



b) Erosão.

Fonte: O autor.

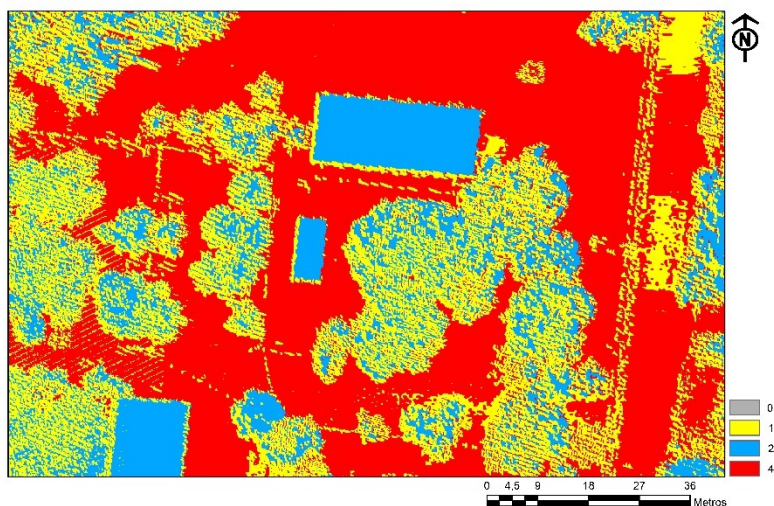
A Erosão Morfológica é basicamente o “encolhimento” de uma imagem enquanto a Dilatação Morfológica, também apontada na literatura como Dilação, é uma transformação morfológica que implica no “engordamento” de imagens. O processo é iterativo e é repetido até que não existam mais remoções, quando se assume que a superfície do objeto foi aproximada. Especial cuidado deve ser tomado na escolha do limiar de tolerância, pois valores extremamente grandes ou pequenos podem influenciar a forma do objeto resultante (PACHECO, 2011).

Para a realização desse estudo foi utilizado o software SPRING 5.5.1 para o processamento e recorte da imagem de composição adquirida. Imagem esta que compõe uma das 532 folhas de articulação do mosaico formado pelo recobrimento aéreo do município de Recife.

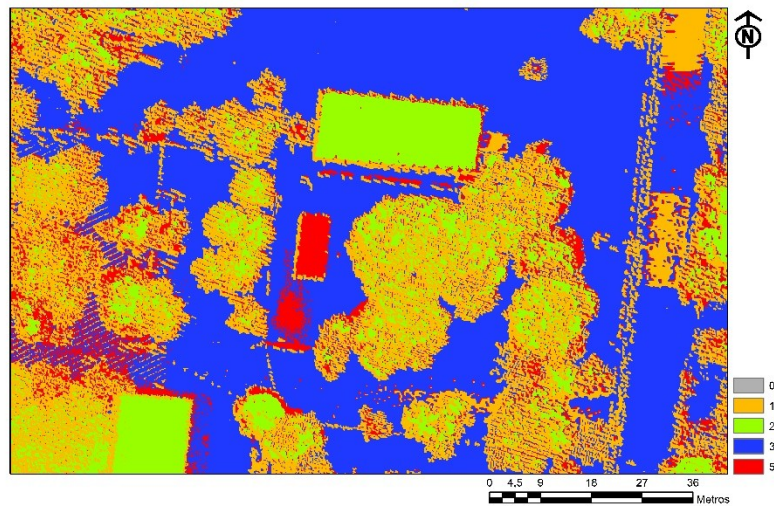
4.2.3.3 Classificação por K-médias.

Um último processamento foi testado utilizando um classificador não supervisionado, com 4 e com 5 classes, esses resultados podem ser vistos na Figura 24.

Figura 24: Resultado da Classificação não supervisionada utilizando K-médias.



4) Classes



5) Classes

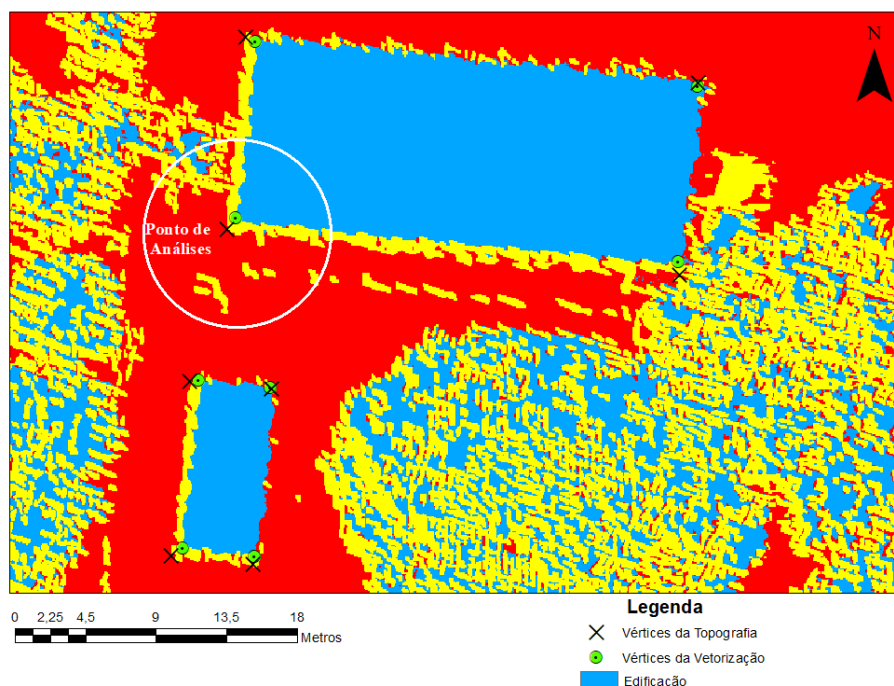
Fonte: O autor.

O classificador K-médias assume que um número de agrupamento é conhecido a priori, ou seja, o operador fixa um número arbitrário de agrupamentos.

Desta forma foi possível observar um novo limiar entre a borda escura observada na componente H do modelo IHS, as respostas obtidas pelo processo da

morfologia matemática, binarização e o resultado da classificação por K-médias, Figuras 25, 26, 27 e 28 respectivamente.

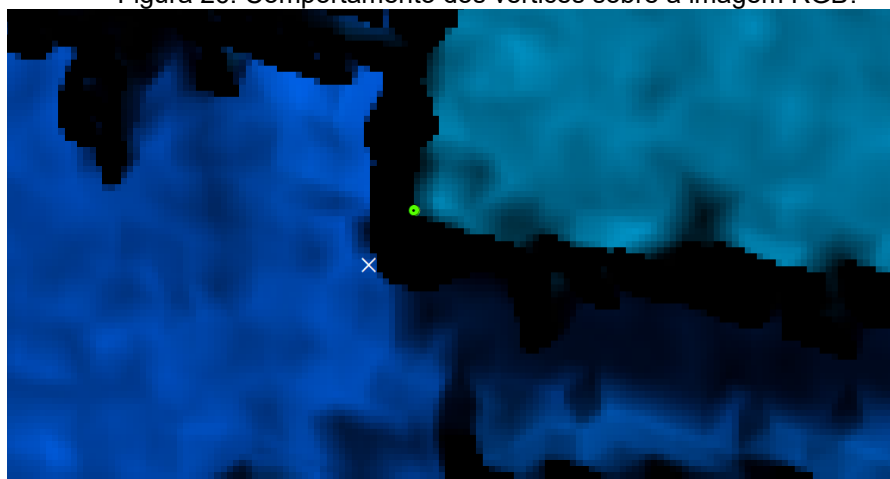
Figura 25: Representação do “Ponto de Análise” sobrepondo o resultado da classificação por K-médias.



Fonte: O autor.

A partir da identificação do ponto de análise da Figura 25, as próximas ilustrações serão apresentadas com as considerações referentes a esse local.

Figura 26: Comportamento dos vértices sobre a imagem RGB.



Fonte: O autor.

Observamos na Figura 26, que o vértice levantado em campo por topografia encontra-se próximo a borda externa da faixa escura da imagem e o vértice da vetorização na borda interna. Contudo, a binarização discretiza melhor os alvos

(Figura 27). Porém, os vértices ainda se comportam exatamente iguais aos apresentados na imagem RGB.

Figura 27: Comportamento dos vértices sobre a imagem binarizada.



Fonte: O autor.

Na dilatação, através da morfologia matemática, observamos que os dois vértices se encontram inseridos na borda da edificação delimitada pelo processo de dilatação (Figura 28).

Figura 28: Comportamento dos vértices sobre a imagem que sofreu dilatação pelo processo da morfologia matemática.

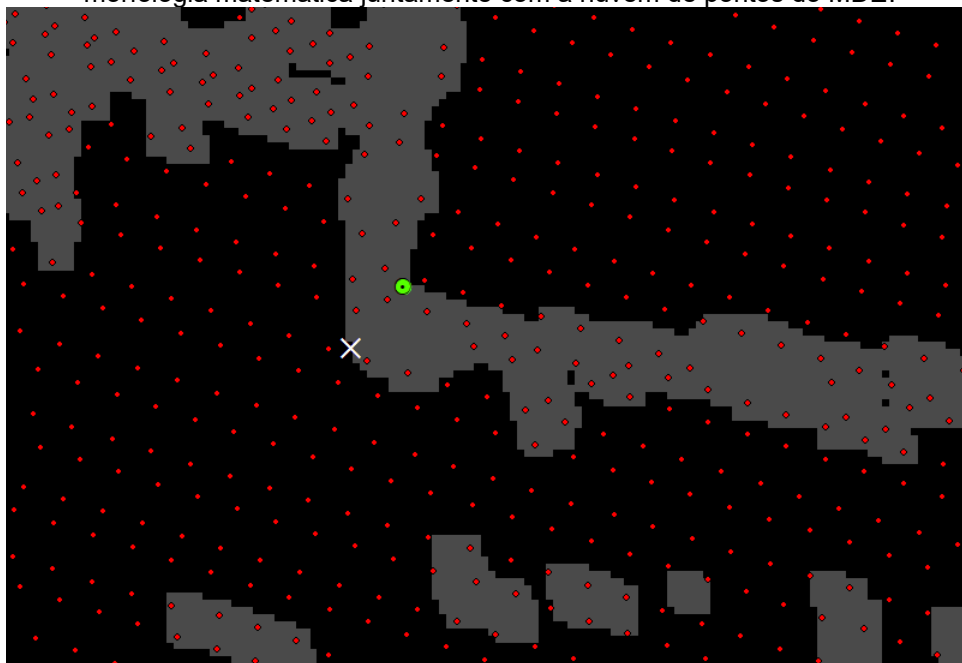


Fonte: O autor

E quando esses vértices são retratados juntamente com a nuvem de pontos que compõem o Modelo Digital de Elevação – MDE (Figura 29) possibilita analisar qual a tendência de comportamento ou aproximação que deverá ter uma linha de borda automatizada sobre essa borda espessa mencionada no subtítulo 4.2.2,

alínea 4.2.3.2, mediante as informações de elevação dos pontos da nuvem que estão contidas, tanto na parte mais externa quanto na parte mais interna.

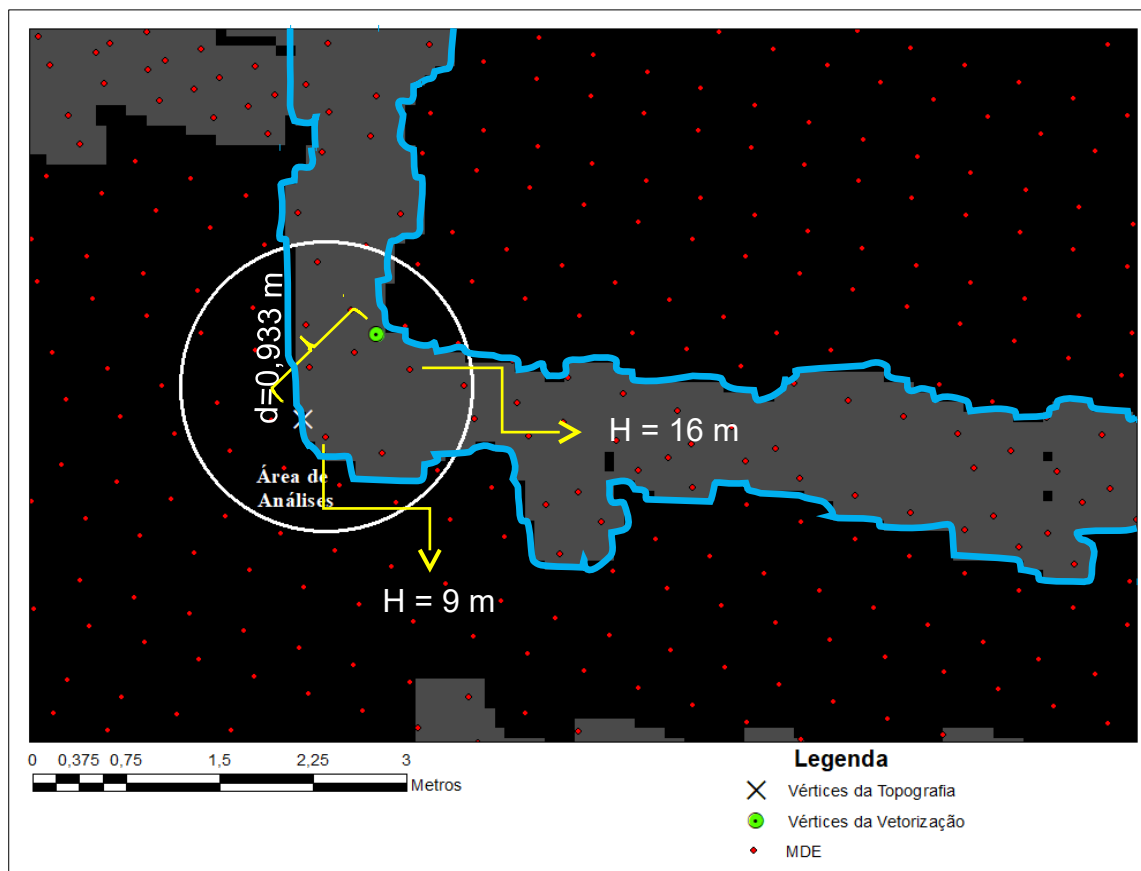
Figura 29: Comportamento dos vértices sobre a imagem que sofreu dilatação pelo processo da morfologia matemática juntamente com a nuvem de pontos do MDE.



Fonte: O autor

Desta forma, uma área está sendo delimitada contendo toda a borda espessa, com informações de variação de altitude “H” entre os pontos da nuvem e a distância plana “d” entre os vértices obtidos, Figura 30, permitindo que os próximos passos dessa pesquisa analisem as possibilidades de um traçado mais preciso com relação ao local exato da edificação, tendo justamente como parâmetros, os vértices e a elevação.

Figura 30: Imagem de análise apresentando o comportamento da nuvem de pontos MDE sobre a faixa espessa de borda através do filtro de dilatação.



Fonte: O autor.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema LiDAR gera resultados importantes na geração de produtos cartográficos. Atrelada à precisão e a velocidade em que ocorre a aquisição desses dados, torna essa tecnologia uma potencial ferramenta no tocante à gestão territorial.

Os dados LiDAR usados nessa dissertação estão em SIRGAS2000, no Sistema Projeção UTM – Zona 25S e a densidade da nuvem de pontos MDE (média) foram usados 5,51 p/m². Foram apresentadas avaliações da extração de contornos de objetos acima do solo a partir de dados oriundos de um perfilamento a LASER aerotransportado, como uma alternativa confiável na atualização cartográfica de ocupação das áreas urbanas.

A estatística aplicada na validação dos dados oriundos da aerofotogrametria e os dados obtidos por topografia em campo serviram de parâmetro de confiabilidade para as novas análises sobre as extrações automatizadas de bordas das edificações desenvolvidas nessa pesquisa, ou seja, foram comparadas as feições da restituição com as feições obtidas na automação, através dos cálculos de discrepâncias das coordenadas dos seus vértices.

Quanto aos resultados usando o método de t-Student observou-se que não há tendência em nenhuma das direções, porém há erro sistemático na coordenada E. Para um diagnóstico mais preciso esse erro deverá ser verificado em outras formas de ocupações e em topografias distintas. Quanto ao teste do Qui-Quadrado, foi alcançada uma qualidade compatível com a Classe C do PEC-PCD, cujo erro padrão é 0,50m, para a escala de 1:1000.

O método empregado para observar as bordas espessas é geral, pois foi utilizada uma classificação não supervisionada. Contudo observou-se que a direção de voo repercute diretamente na geração de sombras nas imagens de composição dos objetos perfilados. E, portanto, em regiões onde o voo foi executado em outras direções, as bordas espessas deverão se apresentar também em outras direções, o que deverá ser mais bem investigado em futuros estudos.

Por fim, os resultados aqui obtidos foram analisados sobre edificações não conjugadas e localizadas em terreno plano. Visto isso, recomenda-se a utilização

dessa metodologia aplicada a outros tipos de terreno, com características de ocupações distintas e irregulares.

REFERÊNCIAS

BALTSAVIAS, E.P. (1999) Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 54, 199-214.

BECKER, J. H.; CENTENO, J. A. S.; Avaliação de Métodos de Filtragem de Nuvem de Pontos Derivados do Sistema Laser Scanner Aerotransportado para Obtenção de MDT. **Revista Brasileira de Cartografia** (2013) Nº 65/4: 651-659

BRANDALIZE, A. A.; Perfilamento a LASER: Comparação com Métodos Fotogramétricos. **ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S.A** (2001).

BRASIL. [Decreto Nº 89.817, de 20 de junho de 1984.](#)

CANDEIAS, A. L. B. Aplicação da morfologia matemática e análise de imagens de sensoriamento remoto, **Tese de Doutorado**, INPE, 6340 - TDI/592. Editora Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997. 162 p.

CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES JUNIOR, J. R.; DO NASCIMENTO, P. H. O.; DE MOURA, C. J. M.; DA SILVA, E. A. Morfologia matemática na extração de bordas de uma imagem IKONOS-2 RGB fusionada. **Rev. Bras. Geom.**, v.4, n. 1, p.026-035, 2016

CAVALCANTI, R. C.; CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES JUNIOR, J. R. Simulação de mapeamento de riscos de inundações usando dados LiDAR: estudo de caso da bacia do rio Una - PE. **Revista Brasileira de Cartografia** (2013) Nº 65/4: 703-716.

CAVALCANTI, R. C.; CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES JUNIOR, J. R.; Metodologia para Aquisição de Polígonos 3D a Partir da Classificação e do Tratamento de Nuvens de Pontos LiDAR. **V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação** (2014).

CAVALCANTI, R. C.; CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES JUNIOR, J. R.; Metodologia para obtenção de polígonos 3D a partir de nuvem de pontos LiDAR. **Rev. Bras. Geom.**, v.4, n. 1, p.046-052, 2016

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol 07, n.04 (2014) 755-763

CROMMELINCK, S., BENNETT, R., GERKE, M., NEX, F., YANG, M. Y., VOSSELMAN, G. Review of Automatic Feature Extraction from High-Resolution Optical Sensor Data for UAV Based Cadastral Mapping. **Remote Sensing** 2016, 8, 689, 1-28.

Departamento de Engenharia Cartográfica. **Infraestrutura de Dados Geo/Top.** Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.

EL-ASHMAWY, N.; SHAKER, A., YANA, W. Y. Pixel vs object-based image classification techniques for LIDAR intensity data. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume XXXVIII-5/W12, 2011. ISPRS Calgary 2011 Workshop, 29-31 August 2011, Calgary, Canada.

ERBA, D. A.; et al. **Cadastro Multifinalitário como Instrumento de Política Fiscal e Urbana.** Editora Studdium. Rio de Janeiro: 2005.

ERCOLIN FILHO, L.; CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Detecção automática de áreas planas em telhados de edificações utilizando nuvem de pontos LIDAR. **Revista Brasileira de Cartografia** (2016), Nº 68/3: 519-526

ET-ADGV (2016) - Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre - **2ª Edição (Versão 1.1 – Março 2016)**. Exército Brasileiro.

FALAT, D. R.; Perfilamento a LASER: Uma Alternativa Rápida e Precisa para a Identificação de Alterações na Superfície. **ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S.A** (2008).

FERNANDES, V. J.M. Extração de Contornos de Telhados de Edifícios a Partir da Integração de Imagem Aérea de Alta-Resolução e Dados Laser, Utilizando Campos Aleatórios de Markov. **Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP.** Campus de Presidente Prudente, 2016.

FERREIRA, F. R., Larocca, A. P. C., Jorge Pimentel Cintra, J. P. Segmentação do espaço urbano por meio de dados LIDAR aerotransportado. **Revista Brasileira de Cartografia** (2015) Nº 67/7: 1413-1420

FERREIRA, F. R.; Segmentação do Espaço Urbano Por Meio da Tecnologia LiDAR Aerotransportado. **Dissertação Apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia** – São Paulo, 2014.

GALVANIN, E. A. S., DAL POZ, A. P. Extração Automática de Contornos de Telhados de Edifícios em Um Modelo Digital de Elevação, Utilizando Inferência Bayesiana e Campos Aleatórios de Markov. **Tese do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista**. Presidente Prudente, 2007.

GALVANIN, E. A. S., DAL POZ, A. P. Sistema LiDAR e Métodos de Interpolação de Dados. **Revista de Geografia (UFPE)** V. 30, No. 1, 2013.

GONZALEZ, R. F., WOODS, R. E., **Processamento de Imagens Digitais**. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 2000.

GONZALEZ, R. F.; WOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens**. 3.ed; São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

ITEP – Instituto de Tecnologia de Pernambuco. **Relatório de Validação de Dados dos Aerolevantamento da Prefeitura da Cidade do Recife** – Cidade do Recife, 2013.

JAIN, A. K. **Data clustering: 50 years beyond K-Means**. Pattern Recognition Letters. 31 (2010) 651–666.

JANSSEN, D. Automating Data Accuracy from Multiple Collects. **FIG Congress 2014**, Engaging the Challenges - Enhancing the Relevance, Kuala Lumpur, Malaysia 16 – 21 June 2014

KAHMEN, H., FAIG, W. **Surveying**. Berlim: Walter Gruyter e Co, 1988. 578 p.

LUO, X. Investigating semi-automated cadastral boundary extraction from airborne laser scanned data. **Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation**. Enschede, The Netherlands, March, 2016

MACQUEEN, J.B, Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, **Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability**. Berkeley, University of California Press, 1:281-297

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília, 2012.

Norma da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre (ET-ADGV). **Exército Brasileiro**. Departamento de Ciência e Tecnologia, 2016.

Pacheco, A. P. Classificação de Pontos LiDAR para a Geração do MDT. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos, Curitiba, v. 17, no 3, p.417-438, jul-set, 2011.

RENSLOW, M. S. **Manual of Airborne Topographic LiDAR**, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 2012.

SANTOS, D. **Elementos de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, 2013**. Curso de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal do Paraná. P. 119 – 137. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/danielsantosufpr/cap-iii-elementos-de-fotogrametria-e-sensoriamento-remoto>>. Acesso em: 02/11/2017.

SHAN, J., TOTH, C. K. **Topographical Laser Ranging and Scanning Principles and Processing**. 2009.

SILVA, M. V. Avaliação da Qualidade Posicional Planimétrica de Dados Lidar De duas Áreas Urbanas do Município do Recife/Pe. **Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco**. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2014.

SUÁREZ, M. **Interaprendizaje de Probabilidades y Estadística Inferencial con Excel, Winstats y Graph**. Primera Edición. Imprenta M & V, Ibarra, Ecuador. 2012.

WEHR, A.; LOHR, U. (1999) Airborne laser scanning: an introduction and overview. **Institute for Navigation, University of Stuttgart**. Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, Germany b TopoSys, Freiherr-v.-Stein-Str. 7, D-88212 Ravensburg, Germany Received 22 December 1998; accepted 24 March 1999

WEVER, C.; LINDENBERGER, J. **Experience of 10 years of laser Scanning**. **Schriftenreihe des Institute für Photogrammetrie. der Universität Stuttgart**, pp. 125-132 1999.