

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA**  
**E AGRIMENSURA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA**  
**E AGRIMENSURA**

---

**RAFAEL LOPES MENDONÇA**

**FILTRAGEM DE DADOS LIDAR DE ÁREA PLANA PARA GERAÇÃO DE  
MODELO DIGITAL DO TERRENO**



Recife

2017

RAFAEL LOPES MENDONÇA

**FILTRAGEM DE DADOS LIDAR DE ÁREA PLANA PARA GERAÇÃO DE  
MODELO DIGITAL DO TERRENO**

Monografia apresentada na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e Agrimensura, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito básico para a obtenção do grau de Engenheiro Cartógrafo.

**Orientador:** Prof. Dr. José Luiz Portugal.

Recife

2017

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M539f	<p>Mendonça, Rafael Lopes. Filtragem de dados LIDAR de área plana para geração de modelo digital do Terreno / Rafael Lopes Mendonça. – 2017. 61 folhas, il., gráfs., tabs.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Luiz Portugal. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Cartográfica e Agrimensura, 2017. Inclui Referências.</p> <p>1. Engenharia Cartográfica. 2. Filtragem. 3. <i>Light Detection and Ranging</i> (LIDAR). 4. Modelo Digital do Terreno (MDT). I. Portugal, José Luiz. (Orientador). II. Título.</p>	
		UFPE
	526.1 CDD (22. ed.)	BCTG/2017-400

RAFAEL LOPES MENDONÇA

FILTRAGEM DE DADOS LIDAR DE ÁREA PLANA PARA GERAÇÃO DE  
MODELO DIGITAL DO TERRENO

Monografia apresentada na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e Agrimensura, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito básico para a obtenção do grau de Engenheiro Cartógrafo.

Aprovado em: 07/12/2017

---

Prof. Dr. José Luiz Portugal (Orientador acadêmico)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Lucilene Antunes Correia M. de Sá (Examinadora interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais e ao meu avô e amigo Manoel Custódio Lopes (*in memoriam*).

Dedico

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo na minha vida, à minha família por toda dedicação, carinho, apoio e estímulo para realizar os meus objetivos. Em particular aos meus pais por todo esforço que fazem para que eu possa ter acesso ao conhecimento e pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luiz Portugal, pela oportunidade de poder desenvolver em conjunto a monografia e a dissertação, pelos conhecimentos transmitidos e pelo suporte em todas as etapas.

A todos os professores do departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE por tudo que me ensinaram. Em especial à Profa. Dra. Lucilene Antunes por todo apoio que me deu na graduação e no mestrado, e pelos conselhos que me ajudaram a seguir adiante.

Agradeço também à Nathália que me ajudou diretamente nas correções desta dissertação e por sempre me estimular a alcançar os meus objetivos.

À Prefeitura do Recife que disponibilizou os dados desta pesquisa, agradeço em nome de Aurélio Melo.

Por fim agradeço ao CNPq pela bolsa de intercâmbio, que me proporcionou um ano de aprendizado na ESGT – *École Supérieure des Géomètres et Topographes*, Le Mans - França.

Concluir esta etapa não seria possível sem o apoio de todos.

## RESUMO

Com o crescente uso do escaneamento a LASER aerotransportado para aquisição de Modelo Digital, tem-se observado um maior interesse em desenvolver técnicas de filtragens capazes de gerar um Modelo Digital do Terreno (MDT) de forma automática. Para que isso seja possível, as técnicas de filtragem devem ser capazes de identificar e eliminar os elementos naturais e artificiais acima do solo exposto. Diante disto, o presente trabalho tem como objetivo analisar algumas técnicas de filtragem existentes, e avaliar os resultados obtidos aplicados a dados *Light Detection And Ranging* (LIDAR) para geração de MDT. A área de estudo corresponde a uma região do campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), no bairro da Cidade Universitária na cidade de Recife, capital Pernambucana. Esta região apresenta um relevo plano, com baixa concentração de imóveis, além da presença de vegetação arbórea e rasteira. Através de três métodos de filtragens foram analisados os resultados obtidos para essa área de estudo. Os métodos utilizados (segmentação, identificação de bordas por declividade e identificação de bordas por pontos atípicos) apresentaram resultados compatíveis, segundo o intervalo de confiança, porém as superfícies geradas por eles possuem volumes distintos.

**Palavras-chave:** Filtragem. *Light Detection and Ranging* (LIDAR). Modelo Digital do Terreno (MDT).

## ABSTRACT

With the increasing use of the airborne LASER scanning to acquire Digital Model, it has been observed a greater interesting in developing filtering techniques capable of generating a Digital Terrain Model (DTM) automatically. For this to be possible, filtering techniques must be capable of identifying and eliminating the natural and artificial elements above the exposed soil. The objective of this work is to analyze some existing filtering techniques and to evaluate the results obtained for Light Detection And Ranging (LIDAR) data for the generation of MDT. The study area corresponds to a campus region of the Federal University of Pernambuco (UFPE), in the neighborhood of the University City in the city of Recife, capital Pernambucana. This region presents a flat relief, with low concentration of real estate, besides the presence of arboreal and low vegetation. Through three filtering methods, the results obtained for this area of study were analyzed. The methods used (segmentation, edge identification by slope and edge identification by atypical points) presented compatible results according to the confidence interval, but the surfaces generated by them have different volumes.

**Keywords:** Filtering. Light Detection and Ranging (LIDAR). Digital Terrain Model (DTM).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Amostragens de pontos tridimensionais. ....	17
Figura 2 - Esquema do levantamento por LIDAR.....	19
Figura 3 - Múltiplos retornos para um único pulso LASER. ....	20
Figura 4 - Tipos de espelhos e varreduras. ....	21
Quadro 1 – Exemplo de características de um sensor LIDAR. ....	22
Figura 5 - Transformação da nuvem de pontos LIDAR em MDS e MDT.....	25
Figura 6 - Fluxograma das operações envolvidas para geração de MDT vetorial. ....	26
Figura 7 - Localização e delimitação do bairro Cidade Universitária da cidade de Recife. ....	28
Figura 8 - Ortofoto da área de estudo, localizada nos bairros da Várzea e Cidade Universitária, Recife.....	29
Figura 9 - MDS da ortofoto 80_49-00.....	30
Figura 10 - Mapa de situação da área de estudo.....	31
Figura 11 - Amostra da distribuição da nuvem de pontos obtida pelo levantamento LIDAR. ....	34
Figura 12 - Comprovação da distribuição espacial dos pontos obtidos pelo LIDAR. ....	35
Figura 13 - Primeiro resultado obtido pelo Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão. ....	36
Figura 14 - Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 2 m como limiar de distância.....	37
Figura 15 - Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 1 m como limiar de distância.....	38
Figura 16 - Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 1,5 m como limiar de distância.....	39
Figura 17 - Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 3 m como limiar de distância.....	40
Figura 18 - Resultado do método de filtragem a partir do índice de Moran Local. ....	41
Figura 19 – MDT criado a partir do TIN do Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 2 m como limiar de distância. ....	41
Figura 20 - Nuvem de pontos inicial com declividades agrupadas em cinco grupos.....	42
Figura 21 - Nuvem de pontos com declividade maior que 70°. ....	43
Figura 22 - Polígonos criados a partir da agregação do conjunto de pontos com declividade maior que 70°. ....	44

Figura 23 - Polígonos que sobrepõem todos os pontos dos acidentes naturais e artificiais identificados. ....	45
Figura 24 - Resultado do método de filtragem a partir da identificação de bordas por declividade.....	45
Figura 25 – MDT criado a partir do TIN do Resultado do método de filtragem a partir da identificação de bordas por declividade. ....	46
Figura 26 - Identificação de bordas por pontos atípicos com os parâmetros na configuração padrão. ....	47
Figura 27 - Polígonos criados a partir da agregação do conjunto de pontos de borda. ....	48
Figura 28 - Polígonos que se propõem a sobrepor todos os pontos dos acidentes naturais e artificiais identificados pelo método de identificação de bordas por pontos atípicos. ....	49
Figura 29 - Resultado do método de filtragem a partir da identificação de bordas por pontos atípicos.....	50
Figura 30 – MDT criado a partir do TIN do Resultado do método de filtragem a partir da identificação de bordas por pontos atípicos.....	51
Figura 31 – Padrão ouro utilizado para análise dos resultados. ....	52
Figura 32 – Diagrama de Venn para as amostras analisadas.....	53
Figura 33 – MDT criado a partir do TIN da nuvem de pontos do padrão ouro. ....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parte da Tabela de Atributos do Conjunto de Pontos.....	30
Tabela 2 - Indicadores estatísticos da nuvem da área de estudo. ....	33
Tabela 3 - Nuvem de pontos com atributos necessários a filtragem. ....	34
Tabela 4 - Resultado dos métodos combinados.....	52
Tabela 5 - Análise da probabilidade condicional dos resultados dos métodos combinados. ....	53
Tabela 6 - Volume das superfícies. ....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTER *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*  
ALS *Airbone LASER Scanning*  
DGPS *Differential Global Positioning System*  
DSG *Diretoria de Serviço Geográfico*  
GPS *Global Positioning System*  
HRDEM *High resolution Digital Elevation Model*  
LASER *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*  
LIDAR *Light Detection and Ranging*  
IDW *Inverse Distance Weighting*  
IMU *Inertial Measurement Unit*  
MDE *Modelo Digital de Elevação*  
MDS *Modelo Digital de Superfície*  
MDT *Modelo Digital do Terreno*  
MNS *Modelo Numérico de Superfície*  
MNT *Modelo Numérico do Terreno*  
NASA *National Aeronautics and Space Administration*  
NDEP *National Digital Elevation Program*  
NGA *National Geospatial-Intelligence Agency*  
NN *Nearest Neighbor*  
RADAR *Radio Detection and Ranging*  
RBFs *Radial Basis Functions*  
SMI *Sistema de Medição Inercial*  
SRTM *Shuttle Radar Topographic Mission*  
SWIR *Shortwave Infrared*  
TIN *Triangulated Irregular Network*  
TIR *Thermal Infrared*  
TLS *Terrestrial LASER Scanning*  
VNIR *Visible and Near Infrared*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos .....	15
<b>2</b>	<b>TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO NA DEFINIÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO .....</b>	<b>16</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS DO LIDAR .....	18
2.2	FILTRAGEM DOS PONTOS LIDAR.....	23
2.2.1	Método Baseado na Interpolação .....	24
2.2.2	Método de Segmentação.....	24
2.2.3	Identificação de Bordas.....	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA .....</b>	<b>26</b>
3.1	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO .....	26
3.2	ÁREA DE ESTUDO .....	27
3.3	RECURSOS TECNOLÓGICOS .....	31
3.3.1	Base de Dados Espaciais.....	31
3.3.2	Programas Computacionais.....	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>33</b>
4.1	ÍNDICE DE MORAN LOCAL, BASEADO NO MÉTODO DA SEGMENTAÇÃO	35
4.2	IDENTIFICAÇÃO DE BORDAS BASEADA NA DECLIVIDADE .....	42
4.3	IDENTIFICAÇÃO DE BORDAS BASEADA NOS PONTOS ATÍPICOS .....	46
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	51
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Existem diferentes meios de aquisição de dados para a geração de Modelos Digitais, tais como: medição de campo, fototriangulação, digitalização de mapas topográficos, escaneamento LIDAR - *Light Detection And Ranging*/ RADAR - *Radio Detection and Ranging*, DSG (2016). Dentre eles o escaneamento a LASER aerotransportado, ALS - *Airbone LASER Scanning*, com a tecnologia LIDAR tem sido cada vez mais utilizado.

O LIDAR não depende de fonte de luz externa para o seu funcionamento, ou seja, é um sistema de sensoriamento remoto ativo. Essa tecnologia obtém uma nuvem de pontos tridimensionais, distribuídos de acordo com o terreno a ser levantado. Esse conjunto de pontos corresponde a uma amostra pontual tridimensional da superfície e para cada elemento da área de estudo existe um ponto associado. Para a coleta dos dados é utilizado o LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* como fonte de energia. Os valores altimétricos do terreno são obtidos a partir do cálculo da diferença entre o tempo de emissão e recepção do pulso LASER. Associada a essa elevação, coordenadas planimétricas são também registradas a partir de sistemas acoplados. A nuvem de pontos obtida pela tecnologia é de alta densidade, em toda área de estudo. Esse fato tem relação direta com a elevada qualidade do MDE gerado. Outra propriedade de destaque é a possibilidade de capturar pontos do terreno, mesmo que estes estejam cobertos por vegetação devido às múltiplas respostas dos pulsos LASER. Ressalta-se ainda que o LIDAR tem menor custo de processamento quando comparado ao processamento de ortofotos. Por esses motivos o LIDAR tem substituído gradualmente os métodos convencionais de aquisição de dados plani-altimétricos, principalmente como fonte de dados para criação de Modelos Digitais, WERBROUCK et al. (2011).

O produto de um escaneamento a LASER aerotransportado não pode ser considerado um modelo digital, pois representa apenas um conjunto de pontos com coordenadas espaciais. Segundo SILVA e SEGATINE (2015) para obter um modelo digital é preciso à aplicação de uma ou mais funções matemáticas, denominadas de interpoladores, que descrevam a superfície, de acordo com métodos específicos, baseados em dados discretos da variável a ser modelada.

A DSG - Diretoria de Serviço Geográfico classifica os modelos digitais a partir do Modelo Digital de Elevação e o define como sendo um produto cartográfico obtido através de modelos matemáticos que representam uma região de forma contínua. A distinção entre os

modelos derivados do MDE é feita a partir dos elementos que esses representam. Dessa forma o solo exposto e os acidentes naturais e artificiais sobre ele são representados no Modelo Digital de Superfície (MDS) representa. Tais acidentes podem ser de origem antrópica, por exemplo, edificações e pontes, ou naturais, como a vegetação. Enquanto que o Modelo Digital do Terreno (MDT) representam apenas o solo exposto. O MDT deve ser capaz de considerar os acidentes geográficos de relevo, tais como talwegues, espigões, divisores de água, taludes, muros de arrimo, zonas construídas e outros, DSG (2016). Esse modelo é um importante produto de mapeamento topográfico, que pode ser usado em diversas análises do terreno ZHANG et al. (2016). A definição de modelo do terreno da DSG será observada nessa pesquisa, ou seja, o solo exposto será tratado como a superfície sem que os acidentes naturais e artificiais sejam representados.

A extração automática de MDT a partir de MDS é uma importante tarefa ZHANG et al. (2016). Entre outras tarefas é preciso realizar a identificação dos pontos que não representam o solo exposto e sua posterior eliminação. Essa tarefa é denominada de filtragem e foi definida por VOLSSELMAN e SITHOLE (2004). Dessa forma o resultado obtido após a filtragem será um modelo que contenha apenas os pontos que representam o solo exposto. Tem-se observado um maior interesse em desenvolver técnicas de filtrações automáticas ou semiautomáticas, onde a intervenção humana seja mínima, PODOBNIKAR e VREČKO (2012). Além do processo de filtragem, os dados brutos gerados pelo LIDAR devem ser submetidos as seguintes etapas: georreferenciamento, interpolação dos pontos da nuvem e por fim, porém nem sempre necessário, a suavização do MDT.

Os interpoladores utilizados no conjunto de dados têm por objetivo transformar os dados pontuais em superfícies contínuas. Estes predizem o valor de dados não amostrados a partir de dados amostrados. São classificados em modelos determinísticos de efeito global, modelos determinísticos de efeito local e modelos probabilísticos de efeito global e local, BURROUGH e MCDOWELL (1986).

Os modelos determinísticos de efeito global têm por característica adaptar toda a amostra a uma superfície definida a priori, em função de um polinômio de grau  $n$ . Quando o polinômio é de grau 0, a superfície é um plano horizontal; quando é de grau 1 a superfície é um plano inclinado e assim sucessivamente. O interpolador que materializa esse modelo é denominado superfície de tendência.

Os modelos determinísticos de efeito local têm por característica gerar uma superfície adaptada, onde os vizinhos mais próximos tem maior influência na determinação do ponto

desconhecido. Dentre esses interpoladores cita-se o *inverso da distância ponderada*, o *vizinho mais próximo*, as *funções de base radial* e o *polinomial local*.

Os modelos probabilísticos de efeito global e local têm por característica gerar uma superfície adaptada associada a uma de erro, a partir das amostras mais próximas, considerando-se uma variabilidade local e global. O interpolador que materializa esse modelo é a *krigagem*.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.1.1 Objetivo Geral

Filtrar dados LIDAR de uma região plana para geração de MDT.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar técnicas de filtragem de dados LIDAR;
- Testar técnicas de filtragem capazes de identificar pontos do solo exposto;
- Avaliar as técnicas de filtragem.

## 1.2 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA

Capítulo 1 - Apresenta a pesquisa, a problemática envolvida e a justificativa para escolha do tema.

Capítulo 2 - Faz uma revisão bibliográfica sobre aquisição de dados para geração de MDT, principalmente em relação ao sistema sensor LIDAR e também sobre métodos de filtragem de dados de MDE.

Capítulo 3 - Apresenta a metodologia e recursos tecnológicos empregados na pesquisa.

Capítulo 4 - Analisa e discute os resultados obtidos.

Capítulo 5 – Apresenta a conclusão e recomendações.

## 2 TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO NA DEFINIÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

A aquisição de dados para geração de MDT teve início pela digitalização de dados topográficos e pela fotogrametria, LANDAU e GUIMARÃES (2011). Em ambos os casos, é obtida uma nuvem de pontos tridimensional, com densidade relativamente baixa. Essa nuvem é considerada uma amostra da superfície e sua densificação se processa por meio de interpoladores. Dessa forma, os dados pontuais são convertidos para contínuos, BURROUGH (1998).

Modos de aquisição mais eficientes são desenvolvidos através das técnicas de estereoscopia orbital e interferometria. Esses têm a característica de obter nuvens de pontos densas em curto espaço de tempo, LANDAU e GUIMARÃES (2011). Segundo BIFFI et al. (2013), são exemplos desses modos o ASTER – *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* e o SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission*. Cita-se ainda o LIDAR como um modo de aquisição.

O sensor ASTER foi lançado em 1999 a bordo do satélite Terra, permite a obtenção de pares estereoscópicos entre as latitudes 83°S e 83°N. A aquisição do par estereoscópico é realizada por dois instrumentos independentes do sistema sensor, com uma diferença de 55 segundos entre os imageamentos. Essa característica permite que as diferenças radiométricas sejam mínimas, diferente de sistemas que utilizam órbitas adjacentes. Esse sensor consiste em três subsistemas: VNIR - *Visible and Near Infrared*, SWIR - *Shortwave Infrared* e TIR - *Thermal Infrared*. Suas imagens possuem 14 bandas ou canais espectrais e abrangem desde o visível até o infravermelho térmico, na faixa do espectro, BIFFI et al. (2013). Os seus dados são disponibilizados gratuitamente para a América do Sul, com resolução espacial de aproximadamente 30 m, que equivale a 1 segundo de arco, no sistema geodésico WGS84, LANDAU e GUIMARÃES (2011).

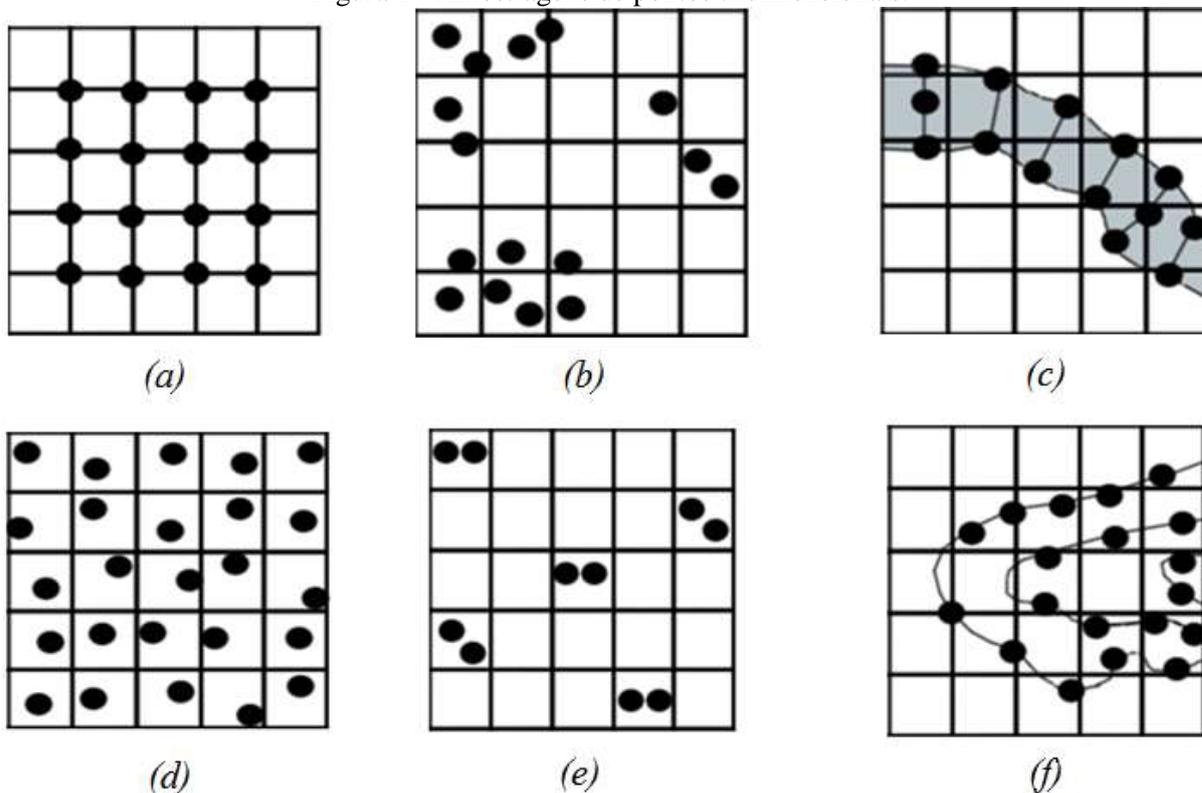
A missão SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission* foi realizada através de um esforço colaborativo da NASA – *National Aeronautics and Space Administration* e da NGA – *National Geospatial-Intelligence Agency*. Lançada a bordo do ônibus espacial *Endeavor* em fevereiro de 2000, durou 11 dias e teve por objetivo de gerar um MDT usando interferometria entre as latitudes 54°S e 60°N, ROBINSON et al. (2014). Seus dados são disponibilizados gratuitamente para a América do Sul, com resolução espacial de aproximadamente 90 m, que equivale a 3 segundos de arco, no sistema geodésico WGS84, LANDAU e GUIMARÃES (2011).

O LIDAR é um sistema sensor ativo que utiliza pulso LASER como instrumento de medição de distância. Segundo AMORIM e SILVA (2012), foi desenvolvido em 1993 por pesquisadores alemães que pretendiam obter modelos digitais de áreas onde os métodos anteriores não eram suficientes. Porém, segundo LILLESAND et al. (2000); LI et al. (2005), o uso do LIDAR para determinação de elevações do terreno teve início na segunda metade da década de 70. Nessa ocasião as coordenadas planimétricas dos pontos da nuvem não eram registradas e por esse motivo foi considerado limitado em relação aos outros sensores existentes na época.

O avanço da tecnologia LIDAR impulsiona inúmeras pesquisas de extração automática de MDT de alta resolução a partir de dados de áreas urbanas, dentre as técnicas utilizadas pode-se citar os métodos matemáticos morfológicos, baseados na interpolação, no TIN, na declividade e os métodos baseados na detecção de bordas ZHANG et al. (2016).

Independente da técnica de aquisição empregada, o dado a ser disponibilizado corresponde a pontos tridimensionais do terreno. Esses pontos podem ter diferentes distribuições e densidades sobre o terreno, SILVA e SEGATINE (2015). A Figura 1 mostra os diferentes tipos de amostragens de dados.

Figura 1 - Amostragens de pontos tridimensionais.



Fonte: adaptada de BURROUGH (1998).

A Figura 1(a) representa aquisição na forma de amostra regular, 1(b) na forma de amostra aleatória, 1(c) na forma de amostra regular de transectos, 1(d) na forma de amostra aleatória estratificada, 1(e) na forma de amostra em cluster ou aninhada e 1(f) na forma de curvas de nível.

## 2.1 CARACTERÍSTICAS DO LIDAR

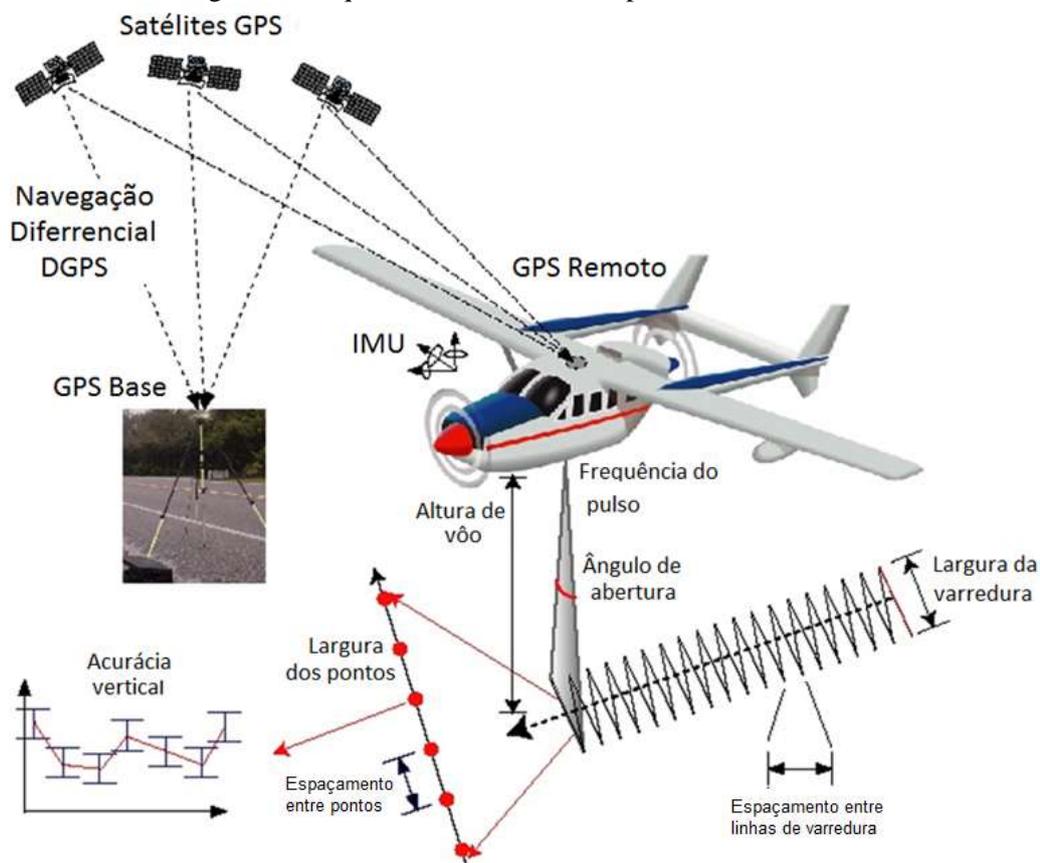
Os dados LIDAR são amplamente utilizados no inventário e gerenciamento florestal e nas investigações dos ecossistemas florestais ZHAO et al. (2016). O LIDAR é um sistema de sensoriamento remoto ativo que tem o LASER como fonte de luz própria. Ele coleta informações da superfície através de técnica de varredura ótico-mecânica a partir de uma plataforma aérea, terrestre ou orbital.

A altitude do ponto coletado (Z) é obtida a partir do intervalo de tempo entre a emissão e a recepção do pulso LASER. A posição do sensor ( $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$ ) bem como os ângulos de atitude da plataforma ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) são obtidos por GPS diferencial (DGPS) e por um sistema de medição inercial. Sincronizando todos esses dados, os pontos coletados podem ser pós-processados de forma a compor a nuvem de pontos tridimensionais do terreno, DALMOLIN e SANTOS (2004). O sistema DGPS requer uma estação base no solo e outra na plataforma aerotransportada, de modo que possam ser operadas simultaneamente.

A nuvem de pontos LIDAR normalmente apresenta densidade de um ponto por metro quadrado, o que faz com que a perspectiva de variação de elevação seja distinta para regiões planas e íngremes ZHANG et al. (2016).

A Figura 2 apresenta os equipamentos empregados num levantamento aerotransportado. Em relação a eles valem as seguintes observações: (i) a alta frequência do pulso LASER, que varia entre 10.000 e 100.000 pulsos por segundo, exigindo um relógio de alta precisão para sincronismo dos dados com os sistemas acoplados; (ii) a resolução planimétrica do levantamento esta entre 0,3m e 1m e a resolução altimétrica entre 15 e 20cm, LI et al. (2005); (iii) um sistema de armazenamento robusto de dados é necessário e em alguns casos uma câmera de vídeo pode ser integrada, LILLESAND et al. (2007).

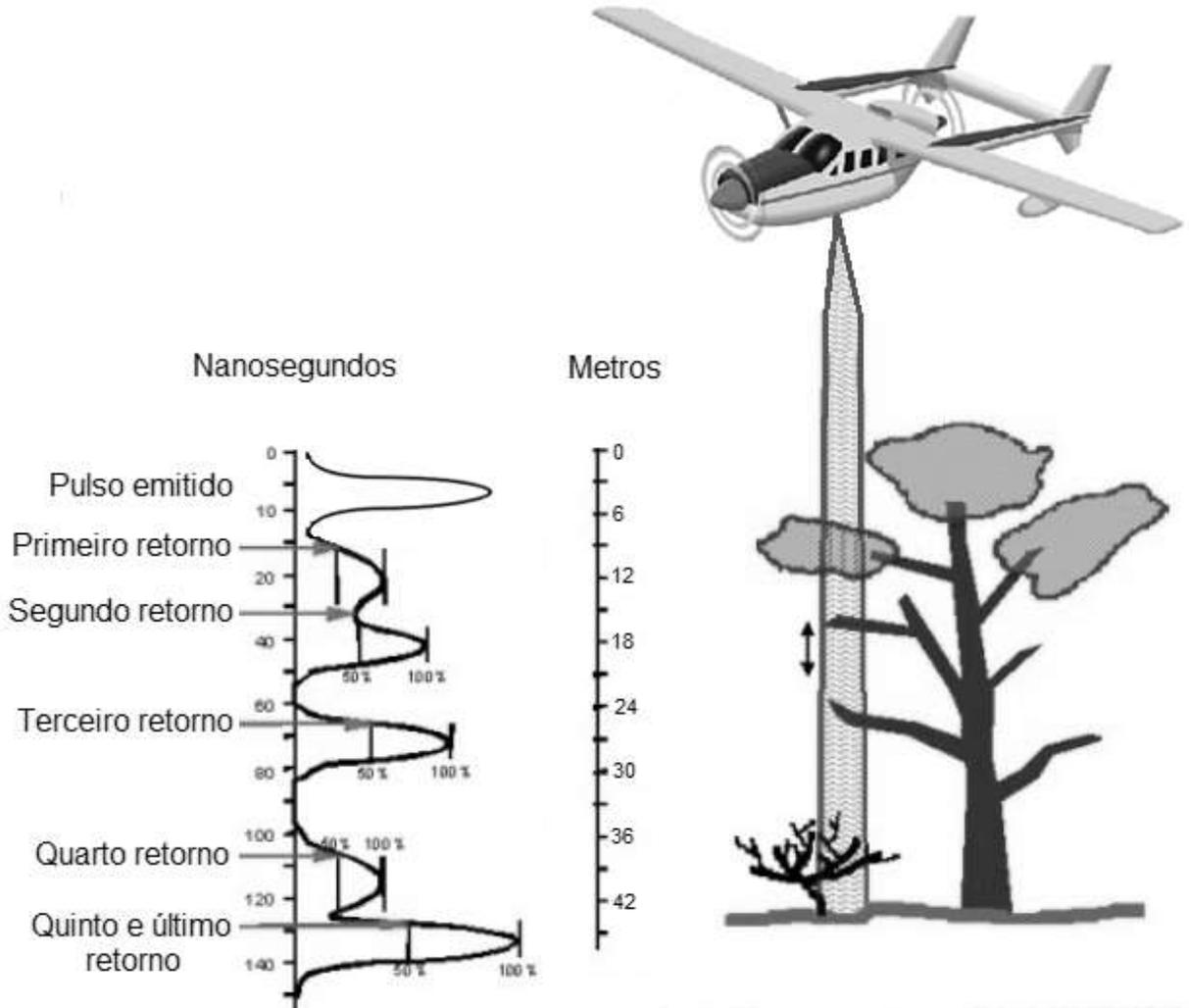
Figura 2 - Esquema do levantamento por LIDAR.



Fonte: adaptada de <http://LIDAR.ihrc.fiu.edu/> (2007).

Os sensores recentes são capazes de identificar múltiplos retornos para cada pulso, a partir do sistema de ondas contínuas *full-waveform*, GIONGO et al. (2010). Esse fato permite reconhecer diferentes feições da superfície ao mesmo tempo, como as copas de árvores, galhos intermediários e o solo exposto. Os retornos podem ser separados em camadas, característica essa que torna o LIDAR um sistema de aquisição de dados altimétricos apropriado para regiões com cobertura florestal, densamente edificadas ou outras que não permitam visadas diretas ao solo exposto, LILLESAND et al. (2007). A Figura 3 exemplifica essa assertiva.

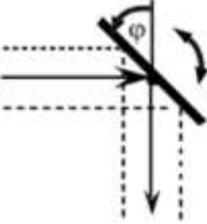
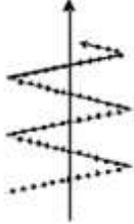
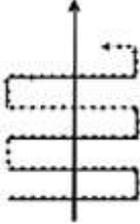
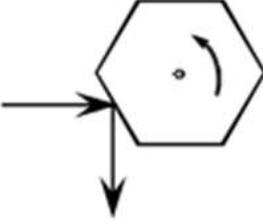
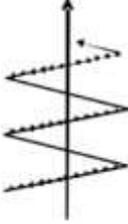
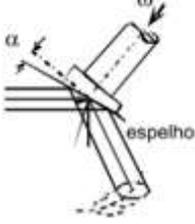
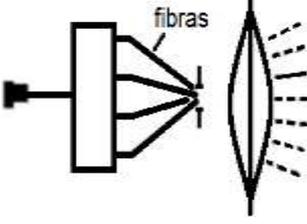
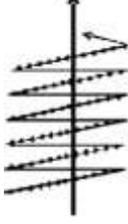
Figura 3 - Múltiplos retornos para um único pulso LASER.



Fonte: adaptada de LILLESAND et al. (2007).

Um dos parâmetros do LIDAR é o tipo de mecanismo utilizado pelo sistema de varredura ótica. Os pulsos gerados por esse sistema são direcionados para um espelho de varredura. Existem diferentes tipos de espelhos, sendo alguns apresentados na Figura 4, associados aos tipos de varredura.

Figura 4 - Tipos de espelhos e varreduras.

Tipo de espelho	Tipo de varredura	
<b>Espelho oscilante</b>	Com um eixo: coleta os pontos em zig-zag	Com dois eixos: coleta os pontos em forma de U
		
<b>Polígono rotatório</b>	Coleta os pontos em linhas paralelas	
		
<b>Palmer</b>	Coleta os pontos em forma de elipse	
		
<b>Fibras rotatórias</b>	Coleta os pontos em linhas paralelas	
		

Fonte: adaptada de CENTENO e MITISHITA (2007).

O ângulo de abertura ( $\theta$ ) do sensor LIDAR e a altura de voo ( $H$ ) determinam a largura da faixa de perfilamento na direção transversal à linha de voo ( $L$ ) em metros, como definido na Equação 1, GABOARDI (2009):

$$L = 2H \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

A frequência de repetição do pulso (*frp*) representa a quantidade de faixas varridas por segundo. A densidade, em pontos por metro quadrado, depende da velocidade da aeronave (*v*), da frequência de repetição do pulso (*frp*), da altura do voo (*H*) e do ângulo de varredura ( $\theta$ ) GABOARDI (2009). A Equação 2 relaciona essas variáveis:

$$D = \frac{frp}{Lv} = \frac{frp}{\left(2H \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)v} \quad (2)$$

Por exemplo, para uma altura de voo *H* de 500 m, uma frequência de repetição do pulso (*frp*) de 33142,8571Hz, largura da faixa de perfilamento (*L*) de 360m e velocidade (*v*) de 65,76m/s, a densidade obtida é de 1,4 pontos por metro quadrado.

A nuvem de pontos adquirida pelo sistema apresenta distribuição quase regular e tem por base as linhas de vôo da plataforma aérea. Ela pode ser processada como dado vetorial, empregando-se uma malha triangular irregular ou como dado raster, através de uma grade regular, CENTENO e MITISHITA (2007). A tabela de atributos dos pontos pode conter outros que não só a altitude. Por exemplo, ela pode receber os valores de reflectância das bandas RGB caso haja um sistema para geração de ortofotos acoplado.

O Quadro 1 apresenta um exemplo das possíveis características de um sensor LIDAR.

Quadro 1 – Exemplo de características de um sensor LIDAR.

<b>Parâmetros ou Características do Sistema</b>	<b>LIDAR</b>
Fonte de energia	Ativo
Geometria	Polar
Tipo de sensor	Pontual
Medição dos pontos	Direta
Amostragem	Pontos individuais
Imagem associada	8 bits multiespectral
Precisão horizontal	2 a 3,5 vezes menor que a precisão vertical
Precisão vertical	1000m de altura – 10 a 15 cm; 2000m de altura – 25 cm
Planejamento do vôo	Sobreposição lateral (30%) apenas para obtenção de cobertura contínua.
Restrições de vôo	Independente da luz do sol
Taxa de produtividade	Maior automação e rapidez
Custo	25% a 33% do custo de levantamento fotogramétrico
Produção	<i>Software</i> proprietário – processamento realizado pela empresa fornecedora do levantamento LIDAR

Fonte: adaptado de ZANDONÁ (2006).

Por fim, salienta-se que a nuvem de pontos refere-se a dados de modelo digital de superfície, inclusive com alguns pontos sobrepostos. Por esse motivo, para a obtenção de um MDT é necessário, entre outras etapas, filtrar a nuvem de modo a selecionar somente os pontos que fazem parte do solo exposto.

## 2.2 FILTRAGEM DOS PONTOS LIDAR

Segundo COELHO et al. (2001) e LOHMANN et al. (2000), o processo de retirada dos acidentes naturais e artificiais dos Modelos Digitais de Elevação, assim como a eliminação de erros grosseiros, é denominado de filtragem. Essa é realizada a partir de modelos matemáticos definidos por algoritmos, tendo por objetivo a obtenção de Modelos Digitais do Terreno.

Uma grande variação de elevação, normalmente, indica a representação de um elemento sobre o solo exposto. Dessa forma, pode-se afirmar que a maioria dos métodos de filtrações funciona bem em terrenos planos, mas são propensos a falhar em terrenos íngremes, onde quase não há diferença entre o relevo topográfico e os pontos que representam elementos sobre o solo exposto ZHANG et al. (2016). Segundo ZHAO et al. (2016) a filtragem em terrenos acidentados, encostas íngremes, vegetação densa e descontinuidades do terreno ainda é um grande desafio.

De acordo com SCHIMALESKY (2007) a filtragem pode utilizar o conjunto de dados de entrada de duas formas:

- Nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais X, Y e Z para cada pulso refletido, correspondente aos pontos da superfície da área de estudo;
- Grade interpolada, ou imagens raster com níveis de cinza dos pixels calculados a partir das medições da reflectância da área coberta por cada um.

E segundo ZHAO et al. (2016) os métodos de filtragem podem ser classificados em diferentes categorias baseadas na metodologia empregada:

- Declividade;
- Interpolação;
- Morfológica e
- Segmentação.

A seguir são discutidos alguns métodos de filtragem.

### 2.2.1 Método Baseado na Interpolação

O método também é conhecido como Filtragem por Predição Linear, foi proposto por KRAUS e PFEIFER (1998) e utiliza método iterativo de interpolação linear por mínimos quadrados ponderado, para a identificação dos pontos que fazem parte da superfície do terreno. Inicialmente é estimada de forma grosseira uma superfície média do terreno com pesos iguais para todos os pontos. A partir dessa superfície é calculada a distância, denominada de resíduo, em relação aos pontos do levantamento LIDAR. Normalmente os pontos correspondentes ao terreno apresentam resíduos negativos e recebem pesos mais altos, enquanto que os que não fazem são positivos e por serem os pontos que possivelmente serão eliminados, recebem pesos mais baixos. Os dados de entrada para próxima iteração são todos os pontos com os pesos atualizados, utilizados como dados para estimar novamente a superfície do terreno. A cada iteração é previsto que se chegue cada vez mais próximo da classificação dos pontos que fazem e que não fazem parte do terreno, LIU (2008).

### 2.2.2 Método de Segmentação

De acordo com BROVELLI (2002), esse método é baseado em segmentação ou agrupamento dos dados. Inicialmente a nuvem de pontos é segmentada em setores, ou *clusters*, através da identificação de regiões com altitudes aproximadas. Após a segmentação é feita a classificação das regiões que pertencem ao solo exposto ou não. O intervalo de altitude de cada *cluster* é comparado com os intervalos dos *clusters* adjacentes, caso seja superior tem uma grande probabilidade de representar um objeto que não faz parte do solo exposto, PACHECO et al. (2011); DAL POZ (2013).

### 2.2.3 Identificação de Bordas

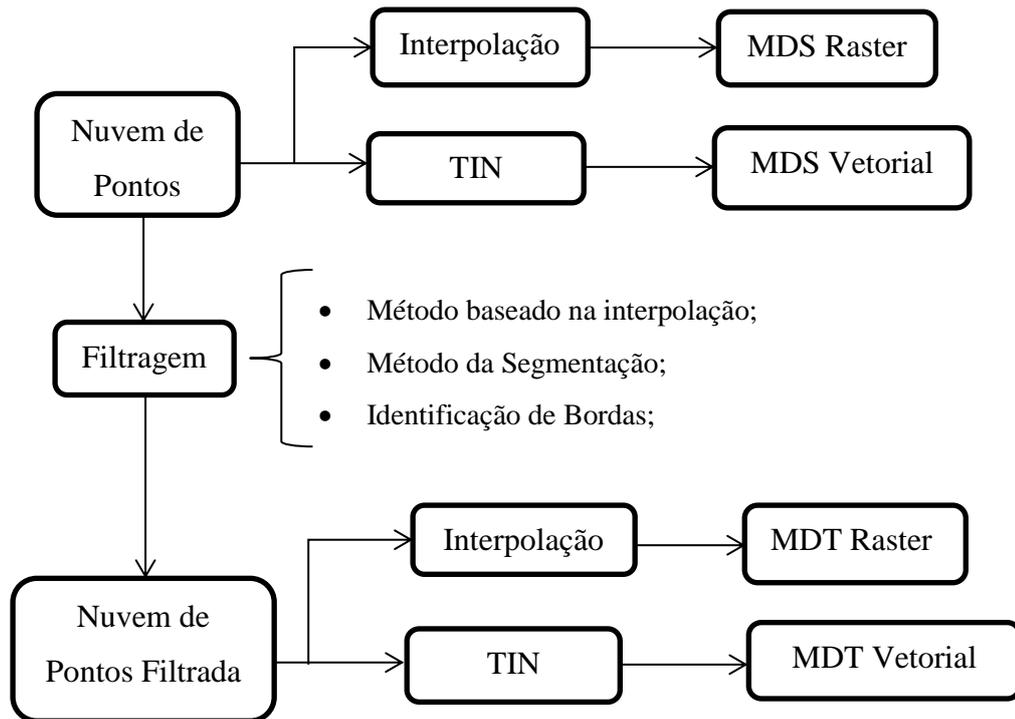
A borda pode ser entendida como uma região limitada por significativas mudanças, provocadas por diferentes efeitos físicos, MUCHERONI et al. (1993).

Os métodos de identificação de bordas baseiam-se na análise de zonas de significativa descontinuidade do parâmetro analisado entre elementos vizinhos, ANTERO e TOMMASELLI (2009). Este parâmetro pode ser a altitude, declividade ou reflectância, por exemplo. Caso o parâmetro utilizado seja a altitude ou a declividade, o dossel das árvores

apresentará significativa descontinuidade. Neste caso, além das bordas dos elementos sobre o solo exposto, a vegetação arbórea também será identificada por este método.

Por fim, esquematiza-se na Figura 5 um fluxograma com as etapas necessárias para obtenção de MDS ou MDT, a partir de levantamento LIDAR.

Figura 5 - Transformação da nuvem de pontos LIDAR em MDS e MDT.



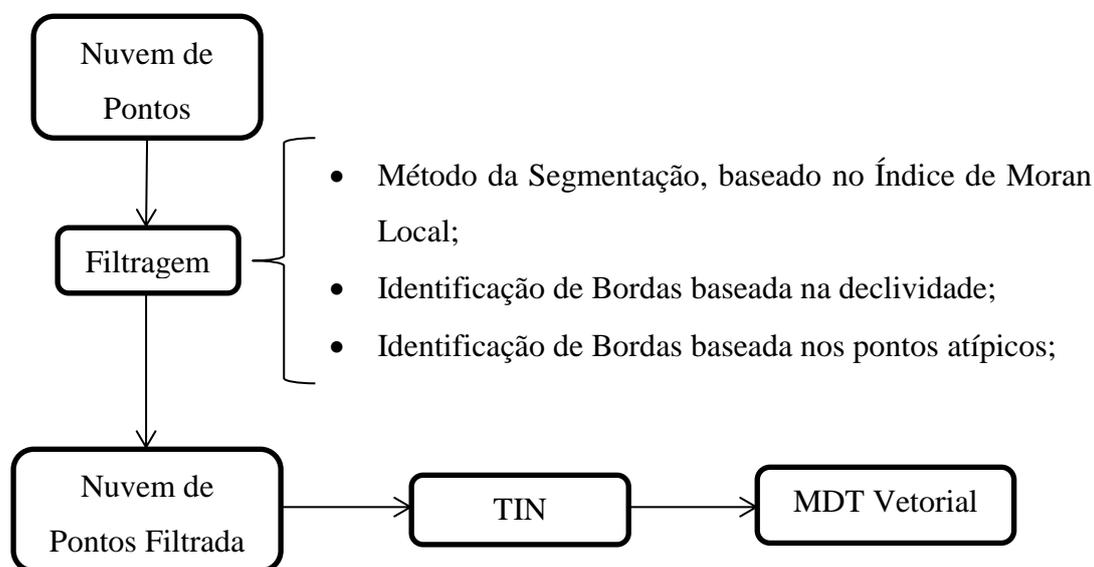
Fonte: o autor.

### 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

#### 3.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Uma nuvem de pontos, resultante de um levantamento LIDAR aerotransportado, foi empregada para testar diferentes métodos de filtragem para criação de MDT vetorial. A Figura 6 mostra o fluxograma das operações envolvidas nesse procedimento.

Figura 6 - Fluxograma das operações envolvidas para geração de MDT vetorial.



Fonte: o autor.

Dicionário dos dados para a Metodologia da Pesquisa:

- **Nuvem de pontos original:** dados originais de um levantamento LIDAR formados por conjunto de pontos tridimensionais georreferenciados.
- **Método da Segmentação, baseado no Índice de Moran Local:** O índice de Moran Local identifica a covariância entre um ponto e seus vizinhos, permitindo concluir se pontos vizinhos são similares ou dissimilares em relação à altitude, por exemplo.
- **Identificação de Bordas baseada na declividade:** ocorre pela identificação das bordas através da declividade entre pontos vizinhos.

- **Identificação de Bordas baseada nos pontos atípicos:** ocorre pela identificação das bordas através da determinação de pontos considerados atípicos em relação aos seus vizinhos.
- **Nuvem de pontos filtrada:** nuvem de pontos obtida após a realização de métodos de filtragem.
- **TIN (MDT):** malha triangular irregular da nuvem de pontos filtrada, que deve representar apenas os pontos do solo exposto.
- **MDT vetorial:** resultado obtido através da malha triangular irregular aplicada a nuvem de pontos filtrada.

### 3.2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, como mostrado na Figura 7, é uma região do campus da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco), localizada no bairro da Cidade Universitária da cidade de Recife, no estado de Pernambuco. Segundo a Prefeitura do Recife (2017) o bairro faz parte de uma ZEIS (Zona Especial de Interesse Social), apresentando uma área de 162 ha, densidade demográfica de 5,05 hab/ha, possui 222 domicílios com renda média mensal de R\$2.044,30. Destaca-se ainda que a região conta com relevo plano, com casas de poucos pavimentos e de edificações com números diversos de pavimentos.

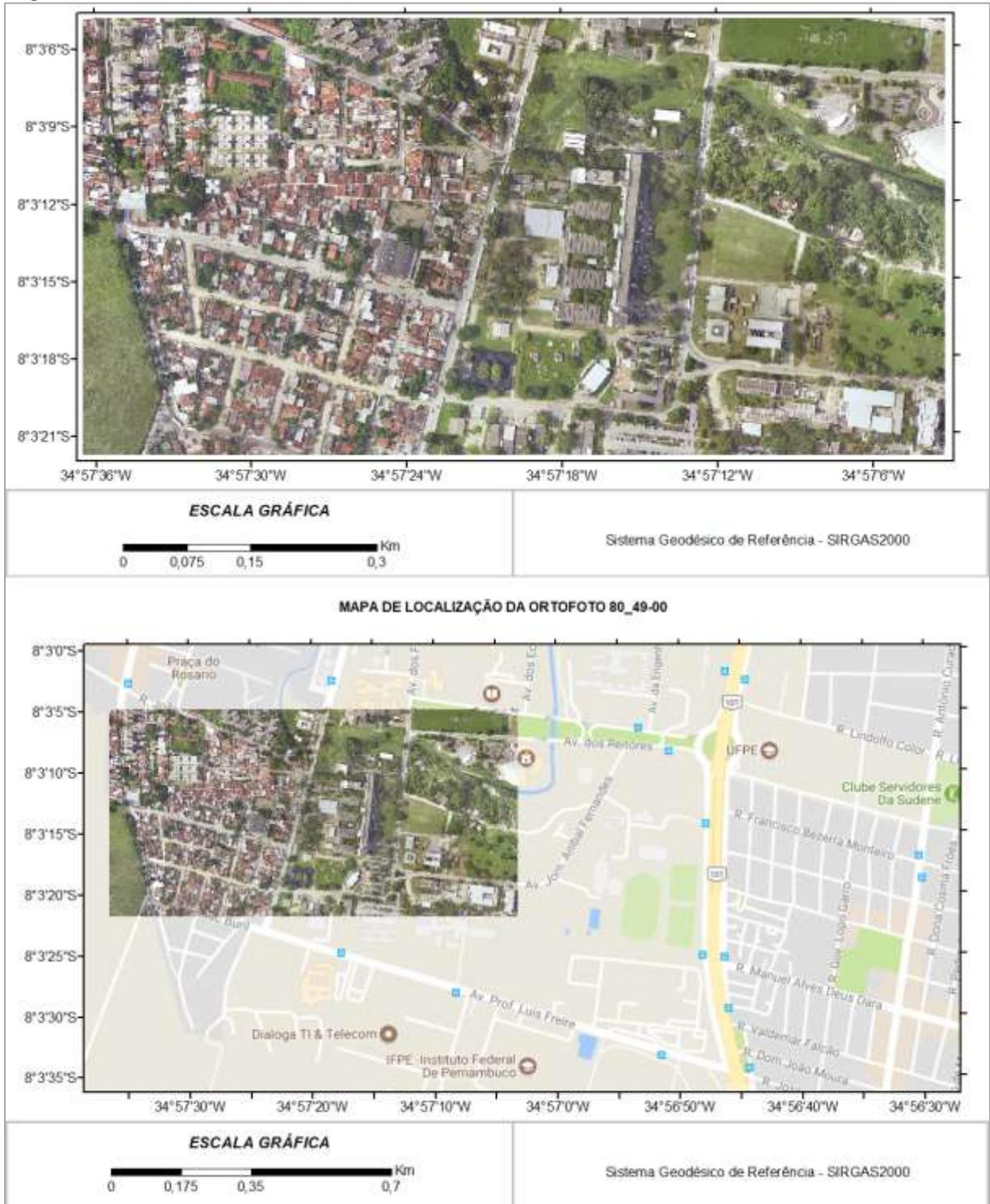
Figura 7 - Localização e delimitação do bairro Cidade Universitária da cidade de Recife.



Fonte: o autor.

Deseja-se esclarecer que não foi definido todo o bairro como área de estudo devido à necessidade de associar-se uma ortofoto existente ao levantamento LIDAR. Como as ortofotos disponíveis têm dimensões padronizadas, foi selecionada a ortofoto 80\_49-00 constante na Figura 8.

Figura 8 - Ortofoto da área de estudo, localizada nos bairros da Várzea e Cidade Universitária, Recife.

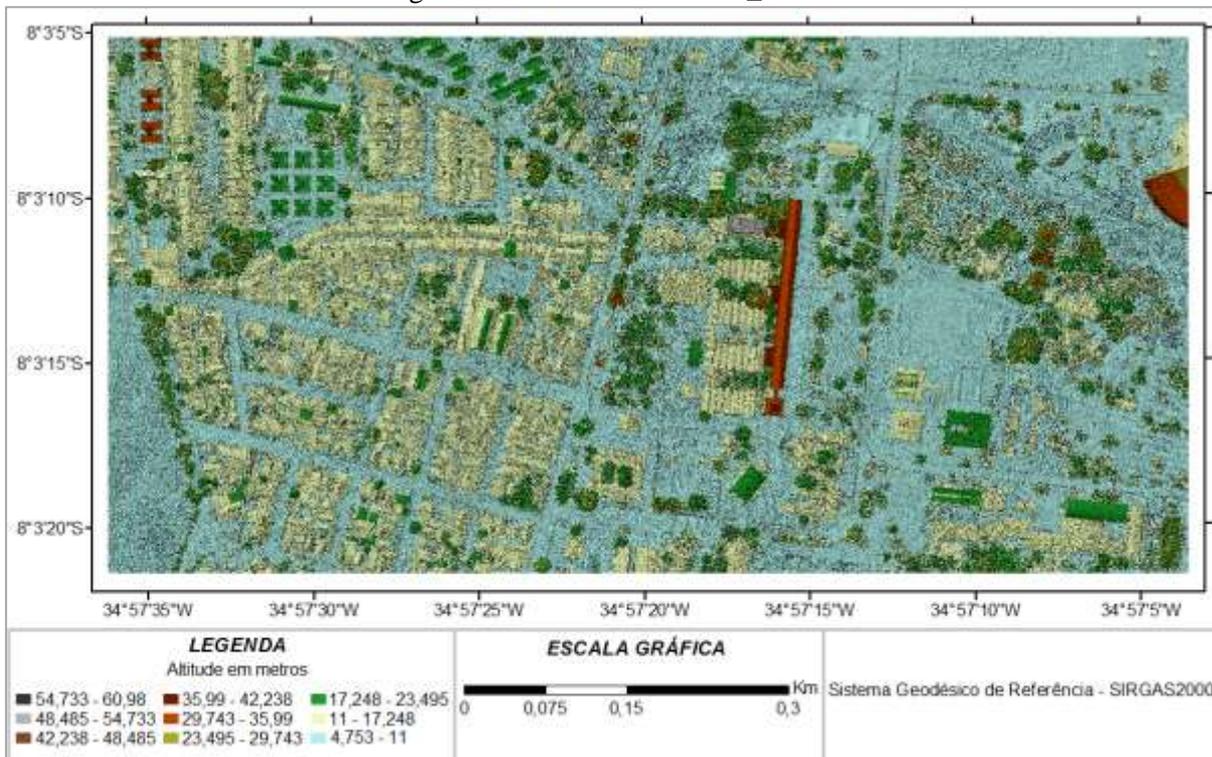


Fonte: o autor.

A partir da escolha da ortofoto, foi gerado um MDS vetorial da região por ela coberta tendo por base a nuvem de pontos do levantamento LIDAR, como mostrado na Figura 9. Os intervalos foram agrupados pelo método de *cluster*, segundo o algoritmo de *Jenks*. Esse MDS vetorial comprova o tipo de relevo plano da região, além de que pode-se observar a presença

dos acidentes naturais e artificiais sobre o solo exposto, por exemplo as edificações do campus da UFPE.

Figura 9 - MDS da ortofoto 80\_49-00.



Fonte: o autor.

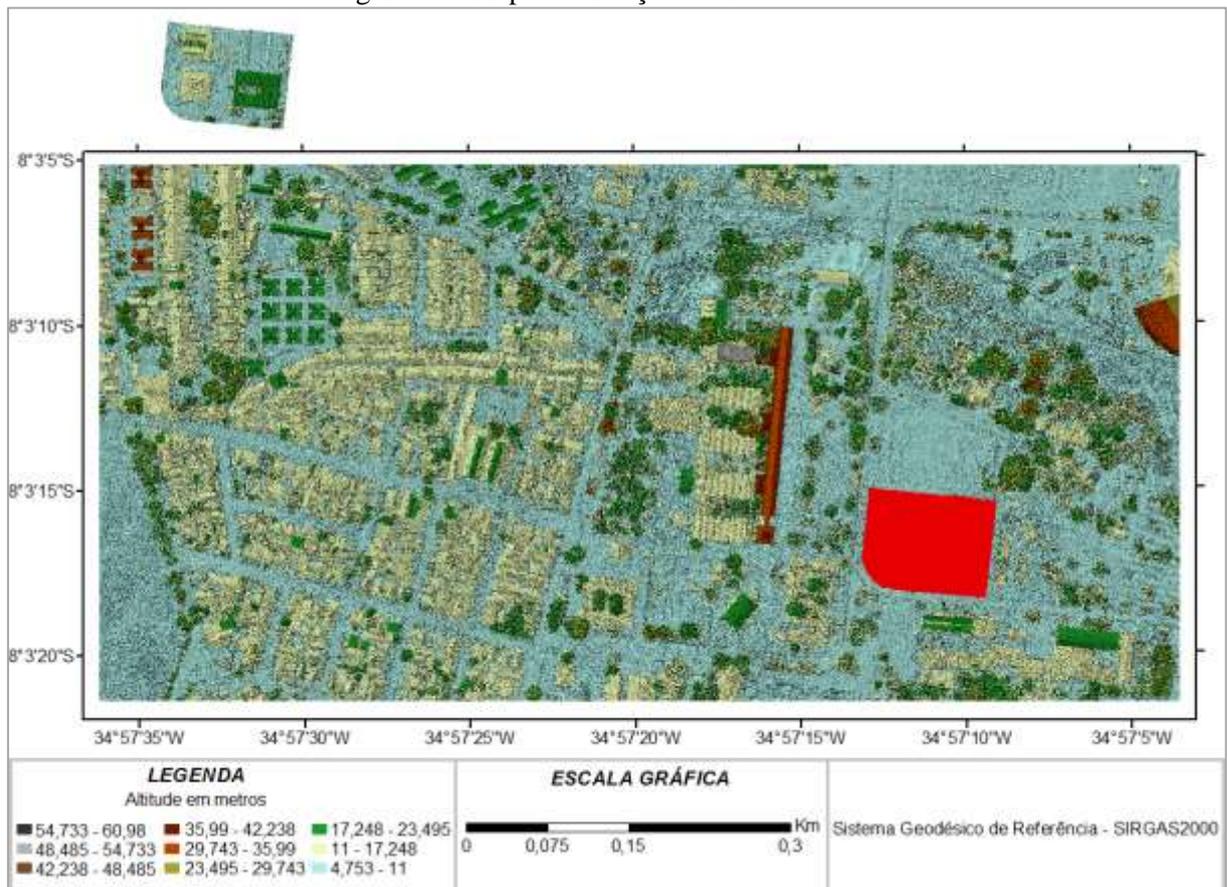
A Tabela 1 corresponde a uma amostra dos atributos da nuvem de pontos. Destaca-se que a unidade de medida do campo “ELEVAÇÃO” é metros.

Tabela 1 - Parte da Tabela de Atributos do Conjunto de Pontos.

ID	CAMADA	ELEVAÇÃO
0	Feição desconhecida do tipo ponto	8,176
1	Feição desconhecida do tipo ponto	8,166
2	Feição desconhecida do tipo ponto	8,15
3	Feição desconhecida do tipo ponto	8,199
4	Feição desconhecida do tipo ponto	8,151
5	Feição desconhecida do tipo ponto	8,155
⋮	⋮	⋮

A região coberta pela ortofoto 80\_49-00 selecionada contém 7.216.879 pontos. Esse fato exige um elevado tempo de processamento para que todos os filtros sejam analisados, em função do hardware disponível. Para superar tal problemática foi extraída uma área de estudo menor que é mostrada na Figura 10.

Figura 10 - Mapa de situação da área de estudo.



Fonte: o autor.

### 3.3 RECURSOS TECNOLÓGICOS

#### 3.3.1 Base de Dados Espaciais

A base de dados espaciais utilizada consiste na nuvem de pontos com dados de elevação e ortofotos digitais coloridas, ambas georreferenciadas. Esses dados são resultantes do levantamento LIDAR apoiado por fotogrametria no ano de 2013, executado pela empresa ENGEFOTO. A Prefeitura do Recife é proprietária do levantamento e o disponibilizou para uso exclusivamente acadêmico.

#### 3.3.2 Programas Computacionais

- ArcGIS
- Microsoft Word
- Microsoft Excel

### **3.3.3 Equipamentos Eletrônicos e Computacionais**

- Notebook com processador Intel(R) core(TM) i3-3110M CPU 2,40GHz, memória instalada de 4GB e Sistema Operacional de 64 bits.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A área de estudo foi escolhida de modo que apresente uma região plana com edificações e vegetação tanto arbórea, quanto arbustiva. A nuvem de pontos desta área contém 135.632 pontos, devidamente georreferenciados. Os indicadores estatísticos da nuvem constam na Tabela 2.

Tabela 2 - Indicadores estatísticos da nuvem da área de estudo.

<b>INDICADOR</b>	<b>VALOR</b>
<b>Quantidade de pontos:</b>	135.632
<b>Menor Altitude:</b>	8,025 m
<b>Maior Altitude:</b>	27,114 m
<b>Soma das Altitudes:</b>	1.594.421,87 m
<b>Valor médio das Altitudes:</b>	11,75 m
<b>Mediana</b>	8,828 m
<b>Desvio Padrão:</b>	4,94
<b>Moda</b>	8,753 m
<b>Assimetria</b>	1,39
<b>Curtose</b>	0,502
<b>Quantidade de valores nulos:</b>	0

Observa-se na Tabela 2 que os pontos da área de estudo possuem uma distribuição assimétrica positiva e uma curva de frequência aberta, platicúrtica, com valores de média, moda e mediana significativamente diferentes, Esses indicadores mostram uma distribuição que foge aos padrões da normalidade, evidenciando a complexidade da superfície.

A nuvem de pontos LIDAR da área de estudo é sobreposta a ortofoto que foi gerada por dispositivo acoplado. Essa ortofoto possui resolução espectral de 3 bandas (R, G, B), com resolução radiométrica de 8 bits e resolução espacial de 0,08 metros. Essa sobreposição permitiu o acréscimo de mais três campos à tabela de atributos dos pontos, que são a reflectância em cada uma das 3 bandas supra citadas.

Em seguida, foi criado o MDS da área de estudo, no modo vetorial, a partir da implementação do TIN. Com a criação desse MDS foi possível acrescentar mais 1 campo à tabela de atributos dos pontos, que é a declividade, em graus decimais. Nessa situação a

nuvem de pontos passa a conter os atributos constantes na Tabela 3, que são os exigidos para estudo dos filtros.

Tabela 3 - Nuvem de pontos com atributos necessários a filtragem.

ID	ELEVAÇÃO	R	G	B	DECLIVIDADE_GRAUS
1	8,176	220	220	221	57,79
2	8,166	224	227	227	89,02
3	8,15	227	227	228	24,79
4	8,199	227	232	233	57,79
5	8,151	218	221	221	28,33
6	8,155	236	241	242	27,58
7	8,253	210	211	208	69,20
8	8,214	213	213	210	4,81
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Em relação à distribuição espacial dos pontos da nuvem, visualizado na Figura 11, observa-se que existe uma dispersão que pode ser classificada como amostra regular de transectos, definida na Figura 1(c). Os transectos correspondem às linhas de vôo da plataforma aérea.

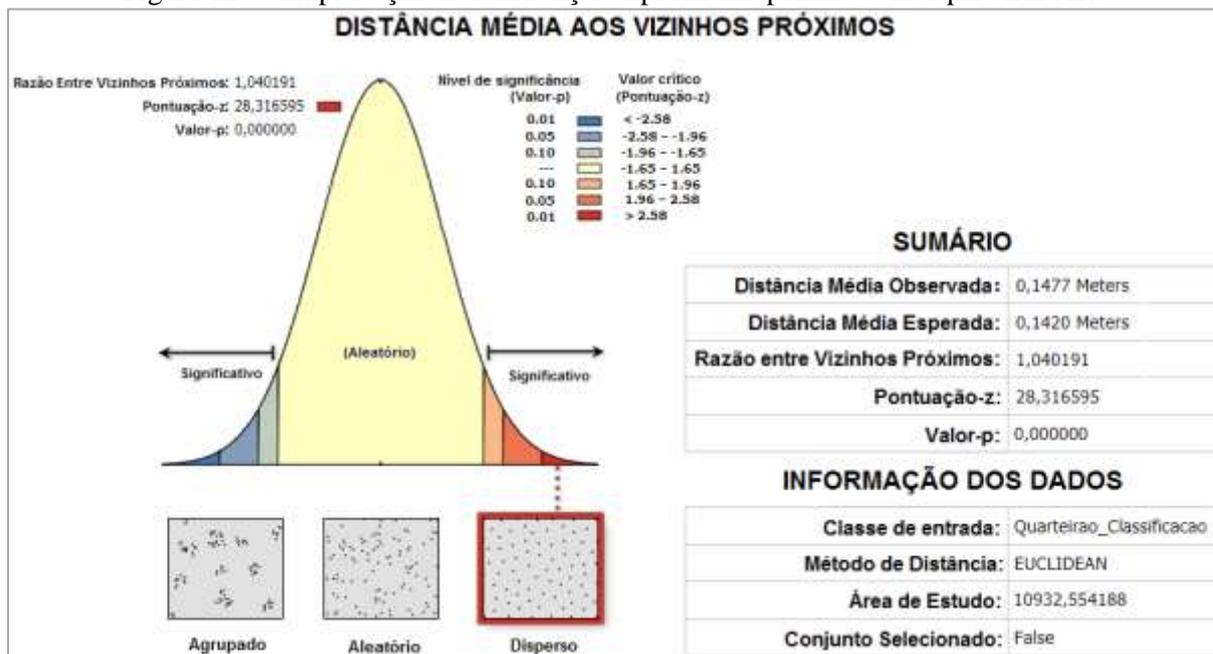
Figura 11 - Amostra da distribuição da nuvem de pontos obtida pelo levantamento LIDAR.



Fonte: Prefeitura do Recife.

A comprovação da distribuição espacial dos pontos, mostrada na Figura 12, se processa pelo modelo da *Distância Média aos Vizinhos Próximos*. Esse modelo, empregado e detalhado por EBERT et al. (2014), esta disponível no programa ArcGis.

Figura 12 - Comprovação da distribuição espacial dos pontos obtidos pelo LIDAR.



Fonte: o autor.

As técnicas de filtragens utilizadas na identificação dos pontos que não fazem parte do terreno e os elimina, com o objetivo de criar um MDT foram:

#### 4.1 ÍNDICE DE MORAN LOCAL, BASEADO NO MÉTODO DA SEGMENTAÇÃO

O Índice de Moran Local foi utilizado como método de clusterização do conjunto de pontos da área de estudo. Os parâmetros desse método são:

- Método de análise das relações espaciais. Determina qual método irá calcular as relações espaciais entre os pontos;
- Método de cálculo da distância entre pontos vizinhos;
- *Flag* padronização. Utilizada quando os pontos de entrada apresentam uma amostra tendenciosa;
- Limiar de distância;

A configuração padrão do índice de Moran Local é:

- Método de análise das relações espaciais: inverso da distância;
- Método de cálculo da distância entre pontos vizinhos: distância euclidiana;
- Variável booleana de padronização: desativada;
- Limiar de distância: nulo;

Estes pontos foram classificados em cinco grupos:

- Não significativo;
- *Cluster* Alto-Alto;
- *Outlier* Alto-Baixo;
- *Outlier* Baixo-Alto;
- e *Cluster* Baixo-Baixo.

O grupo não significativo é descartado por não apresentar significância estatística ao nível de 95% para o índice de Moran Local. Dentre os outros quatro grupos, os dois *outliers* idealmente representam as variações bruscas da superfície, enquanto que os dois *clusters* representam os objetos sobre o solo exposto e o solo exposto.

A Figura 13 apresenta o primeiro resultado obtido por esse método, utilizando a configuração padrão.

Figura 13 - Primeiro resultado obtido pelo Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão.



Fonte: o autor.

O resultado obtido apresenta pontos classificados nos quatro grupos, porém não foi satisfatório, pois a configuração padrão dos parâmetros não foi capaz de identificar a maioria dos acidentes naturais e artificiais sobre o solo exposto. Além disso, o grupo Baixo-Baixo em azul, que deveria identificar o solo exposto, classificou apenas 86 pontos de um total de 79.757 que deveriam ter sido identificados.

Como estratégia de contorno, foi inserido um valor de 2 metros como limiar de distância para que a classificação dos pontos seja feita baseada nessa faixa de distância. A Figura 14 mostra o resultado obtido por esse procedimento, destacando-se as seguintes observações:

- *Outlier* Alto-baixo e *Outlier* Baixo-alto: estes grupos contêm os pontos que representam regiões de transição, regiões com variação significativa de altitude;
- *Cluster* Alto-alto: este foi capaz de identificar alguns objetos sobre o solo exposto;
- *Cluster* Baixo-baixo: por fim, este identificou o solo exposto da região de estudo.

Figura 14 - Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 2 m como limiar de distância.



Fonte: o autor.

Como pode ser observada na Figura 14 a maior parte do solo exposto foi classificado por esse método modificando apenas o limiar de distância para o valor de 2 metros. Foram feitos testes alterando o método de cálculo da distância entre pontos vizinhos, utilizando o Inverso da distância ao quadrado e posteriormente a Distância fixa, e pode-se concluir que os resultados obtidos foram compatíveis. Em seguida foram testados valores distintos para o limiar de distância: 1 m, 1,5 m e 3 m. Os resultados obtidos para 1 m e 1,5 m foram insatisfatórios e são apresentados na Figura 15 e 16, respectivamente.

Figura 15 - Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 1 m como limiar de distância.



Fonte: o autor.

Figura 16 - Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 1,5 m como limiar de distância.



Fonte: o autor.

Para o limiar de 1 m, uma região grande do solo exposto não foi identificada pelo grupo *Cluster* Baixo-baixo, já para o limiar de 1,5 m ocorreram classificações erradas dos elementos e alguns acidentes artificiais não foram identificados.

O resultado obtido pelo limiar de 3 m, apresentado na Figura 17, pode ser considerado compatível com o resultado apresentado pelo limiar de 2 m.

Figura 17 - Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 3 m como limiar de distância.



Fonte: o autor.

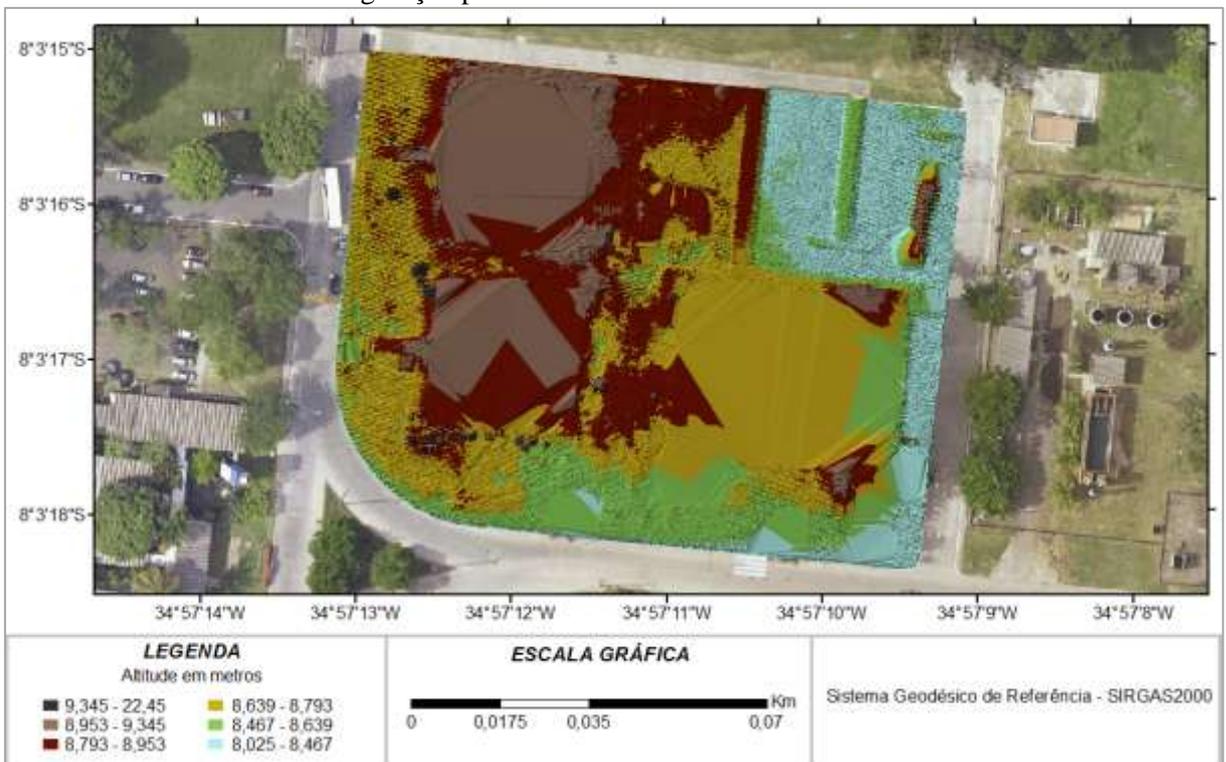
Dessa forma foi escolhido o resultado obtido pelo índice de Moran Local com a configuração padrão e o valor de 2 m para o limiar de distância. Foi selecionado apenas o grupo *Cluster* Baixo-baixo, que representa o solo exposto identificado por esse método. A Figura 18 apresenta esse conjunto de pontos e a Figura 19 apresenta o TIN gerado utilizando o conjunto de pontos do *Cluster* Baixo-baixo obtido por esse método.

Figura 18 - Resultado do método de filtragem a partir do índice de Moran Local.



Fonte: o autor.

Figura 19 – MDT criado a partir do TIN do Resultado do Índice de Moran Local, utilizando a configuração padrão e 2 m como limiar de distância.



Fonte: o autor.

## 4.2 IDENTIFICAÇÃO DE BORDAS BASEADA NA DECLIVIDADE

Quanto menor a distância entre dois pontos e maior a diferença de altitude entre eles, maior será a declividade. A Figura 20 apresenta a nuvem de pontos da área de estudo com as respectivas declividades em graus, agrupadas pelo método de *cluster*, segundo o algoritmo de *Jenks*.

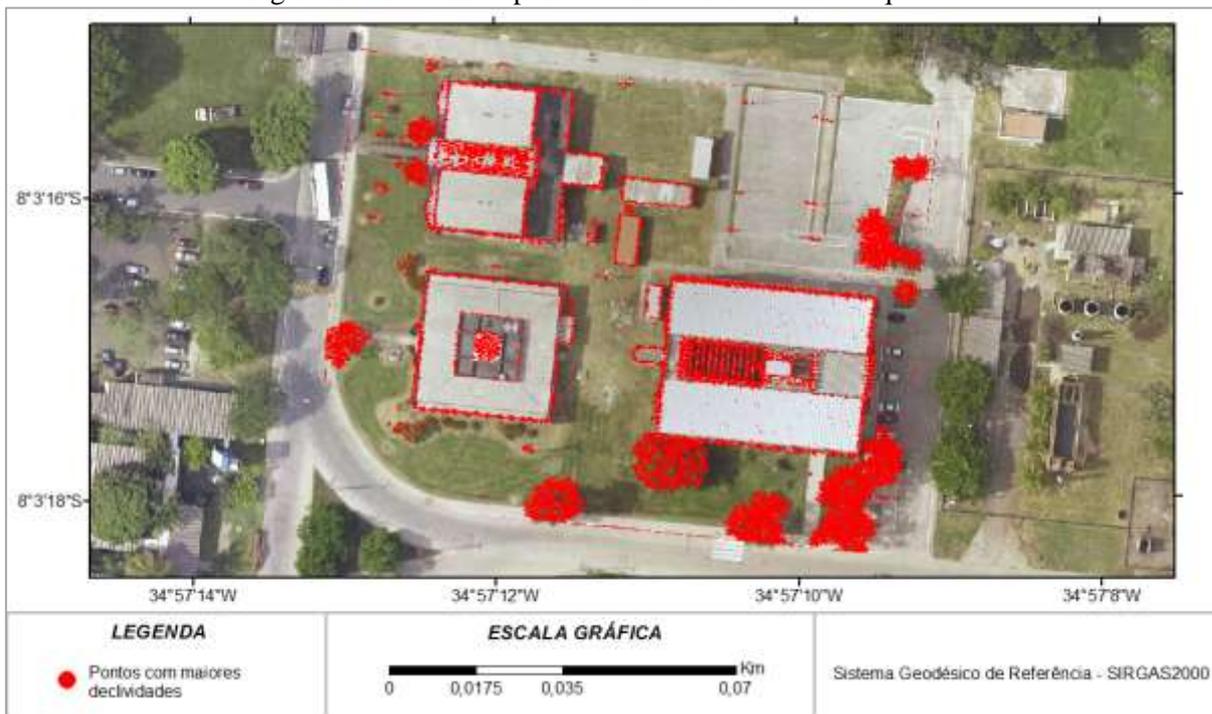
Figura 20 - Nuvem de pontos inicial com declividades agrupadas em cinco grupos.



Fonte: o autor.

Os *clusters*, segundo o algoritmo de *Jenks*, são únicos para cada conjunto de pontos de entrada. O maior intervalo representa as regiões de borda e o dossel das árvores. A Figura 21 apresenta a nuvem de pontos com declividade maior que 70°.

Figura 21 - Nuvem de pontos com declividade maior que 70°.



Fonte: o autor.

Os pontos com declividade superior a 70° foram agregados para formar polígonos que serão considerados como áreas não pertencentes ao solo exposto. Essa agregação exige que seja especificada uma distância máxima entre os pontos que deverão ser agregados. Diversas distâncias foram testadas e a que apresentou melhores resultados foi a de 1 m. Este valor sugere que pontos distantes entre si de até 1 m serão agregados. Convém ressaltar que esse valor deve ser escolhido com cautela, porque um parâmetro de agregação muito elevado pode criar polígonos que incluam o solo exposto. A Figura 22 apresenta os polígonos resultantes desse procedimento.

Figura 22 - Polígonos criados a partir da agregação do conjunto de pontos com declividade maior que 70°.



Fonte: o autor.

Até o momento foram identificadas apenas as bordas dos elementos artificiais e naturais sobre o solo exposto, porém é preciso que todos os pontos desses elementos sejam identificados e posteriormente eliminados. Para que isso seja feito, foi realizado o preenchimento dos polígonos de agregação apresentados na Figura 22. Os polígonos que sobrepõem todos os pontos dos acidentes naturais e artificiais identificados pelo método de identificação de bordas através da declividade são representados na Figura 23.

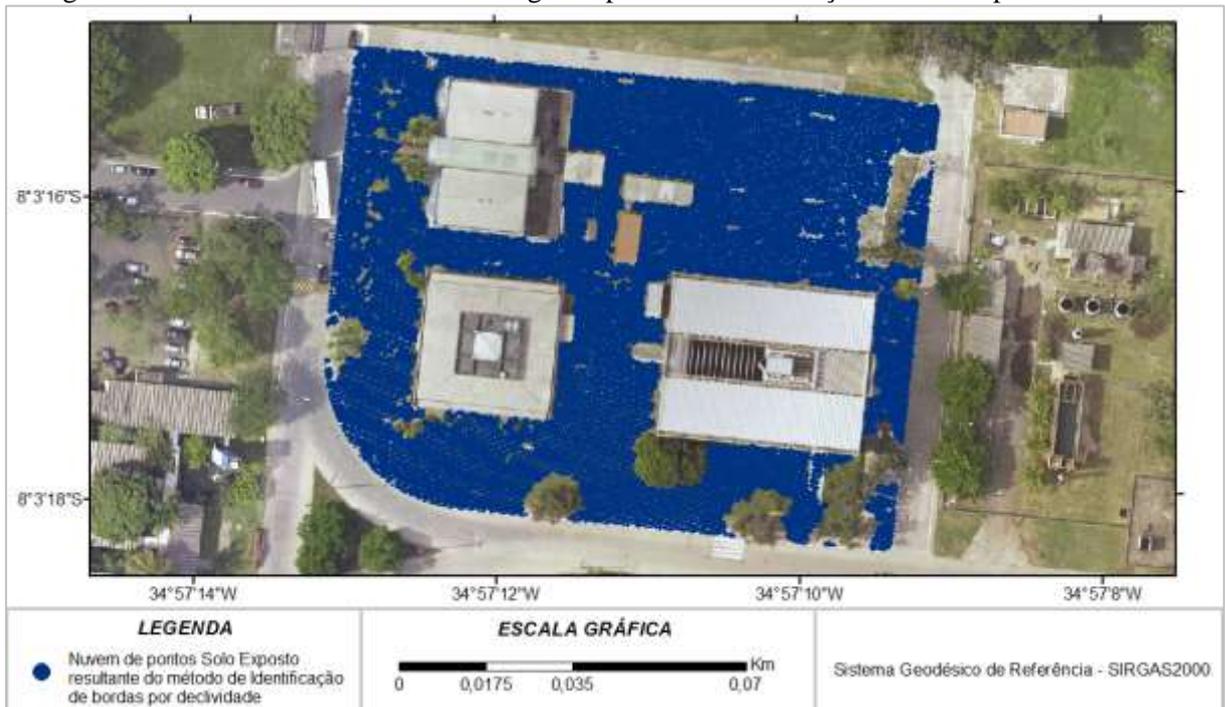
Figura 23 - Polígonos que sobrepõem todos os pontos dos acidentes naturais e artificiais identificados.



Fonte: o autor.

Com o objetivo de obter a nuvem de pontos correspondente ao solo exposto, resultante deste método, foram retirados todos os pontos contidos nos polígonos representados na Figura 23. A Figura 24 representa o resultado final do método.

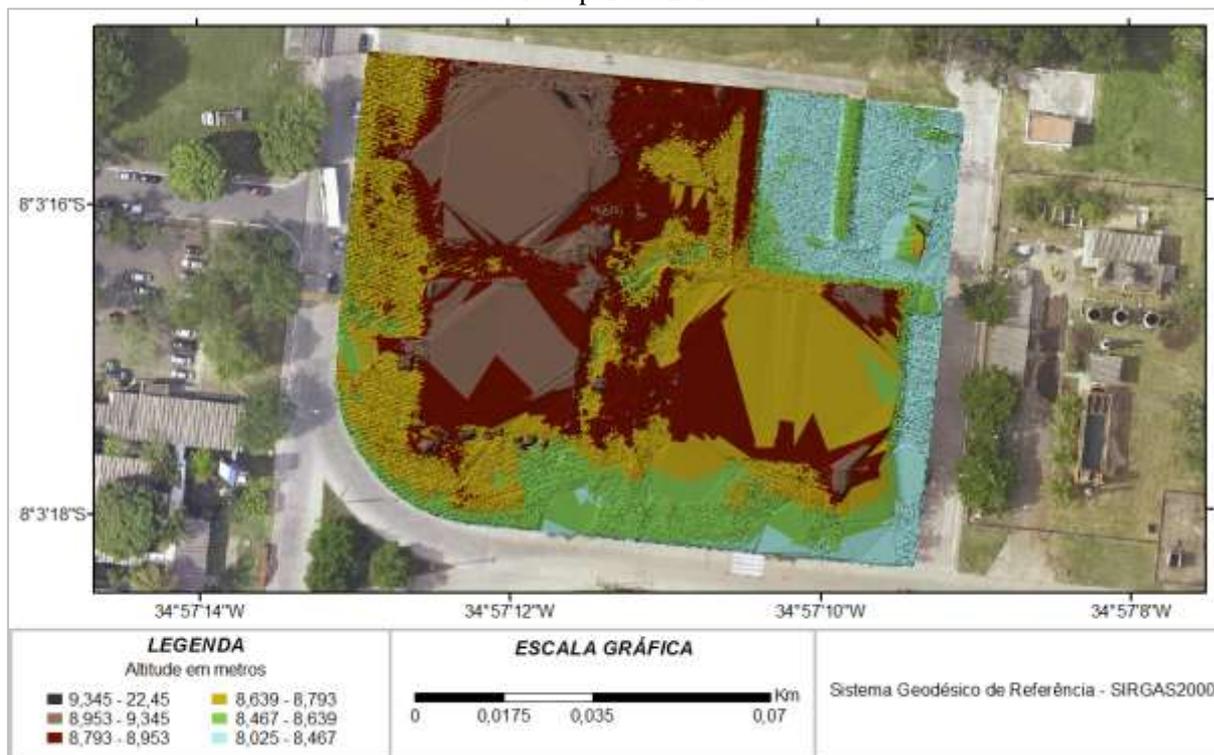
Figura 24 - Resultado do método de filtragem a partir da identificação de bordas por declividade.



Fonte: o autor.

A Figura 25 representa o TIN gerado pelos pontos identificados como pontos que representam o solo exposto, identificados pelo método de identificação de bordas por declividade.

Figura 25 – MDT criado a partir do TIN do Resultado do método de filtragem a partir da identificação de bordas por declividade.



Fonte: o autor.

### 4.3 IDENTIFICAÇÃO DE BORDAS BASEADA NOS PONTOS ATÍPICOS

Pontos atípicos são pontos que apresentam medidas de elevação ou declividade com diferença significativa em relação ao conjunto de pontos da vizinhança. O limiar de tolerância é definido através da definição de três parâmetros:

- Tolerância elevação: parâmetro que define limiar de tolerância para diferença de elevação entre pontos vizinhos;
- Tolerância declividade: define o limiar de tolerância de declividade entre pontos vizinhos, expresso em porcentagem;
- Tolerância de limiares excedidos: define a quantidade de pontos da vizinhança que precisam exceder os limiares de altitude e declividade para que o ponto seja considerado atípico.

A configuração padrão dos parâmetros apresentou resultado satisfatório para a área de estudo:

- Tolerância elevação: 0 m;
- Tolerância declividade: 150%;
- Tolerância de limiars excedidos: 0,5 (50%).

A Figura 26 apresenta o resultado obtido pelo método usando estes parâmetros.

Figura 26 - Identificação de bordas por pontos atípicos com os parâmetros na configuração padrão.



Fonte: o autor.

O conjunto de pontos identificados foi agregado em polígonos, porém o limiar de distância que apresentou melhor resultado para esse conjunto de pontos foi de 2 metros. O resultado dessa operação é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Polígonos criados a partir da agregação do conjunto de pontos de borda.



Fonte: o autor.

Da mesma forma do que foi feito no método de identificação de bordas por declividade, é preciso preencher os polígonos de agregação dos pontos de bordas. A Figura 28 apresenta os polígonos que se propõem a sobrepor todos os pontos dos acidentes naturais e artificiais identificados pelo método de identificação de bordas através dos pontos atípicos.

Figura 28 - Polígonos que se propõem a sobrepor todos os pontos dos acidentes naturais e artificiais identificados pelo método de identificação de bordas por pontos atípicos.



Fonte: o autor.

Como pode ser visto na Figura 28, o preenchimento dos polígonos de agregação desse método não foi capaz de sobrepor todos os acidentes artificiais da área de estudo. Para que isso fosse possível seria necessário agregar pontos mais distantes que 2 metros, parâmetro utilizado nesse método, porém isso faria com que pontos do solo exposto fossem agregados também.

Com o objetivo de obter a nuvem de pontos correspondente ao solo exposto, resultante deste método, foram retirados todos os pontos contidos nos polígonos representados na Figura 28. A Figura 29 representa o resultado final do método.

Figura 29 - Resultado do método de filtragem a partir da identificação de bordas por pontos atípicos.



Fonte: o autor.

Estão presentes ainda na nuvem de pontos elementos que não fazem parte do solo exposto, pois o resultado obtido não foi capaz de identificar e eliminar todos os pontos de alguns elementos artificiais sobre o solo exposto. A Figura 30 apresenta o TIN gerado pelos pontos classificados como solo exposto por esse método.

Figura 30 – MDT criado a partir do TIN do Resultado do método de filtragem a partir da identificação de bordas por pontos atípicos.



Fonte: o autor.

#### 4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos até o momento, observa-se que os métodos resolveram o conteúdo do problema da identificação dos pontos do solo exposto. Porém é preciso verificar qual dos métodos se aproximou mais do padrão ouro da área de estudo.

O padrão ouro, utilizado para análise dos métodos, foi obtido através de fotointerpretação, reambulação e a consequente digitalização dos polígonos representativos do solo exposto. Entende-se por padrão ouro o conjunto de dados ideal, aceito como o padrão de referência ao qual os outros devem ser comparados. O padrão ouro adotado por essa pesquisa apresenta um total de 79.757 pontos e é apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Padrão ouro utilizado para análise dos resultados.



Fonte: o autor.

Testaram-se todas as combinações possíveis dos três métodos cujas respostas são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado dos métodos combinados.

MÉTODO	PONTOS DO SOLO EXPOSTO
Método 1	76.591 pontos
Método 2	67.151 pontos
Método 3	79.004 pontos

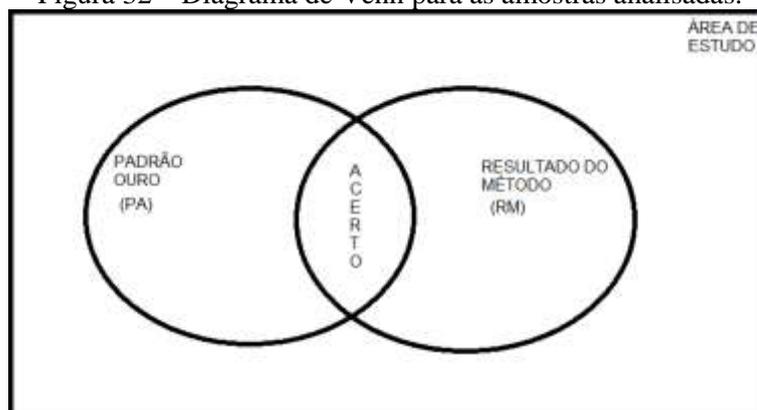
**Método 1:** índice de Moran Local, baseado no método da segmentação;

**Método 2:** Identificação de bordas baseada na declividade;

**Método 3:** Identificação de bordas baseada nos pontos atípicos.

A probabilidade condicional foi o método estatístico empregado na análise de desempenho. As duas amostras independentes utilizadas foram a nuvem de pontos contida no padrão ouro e a resultante de cada método. A interseção entre elas representa o conjunto de pontos classificados corretamente como solo exposto. A Figura 32 apresenta o diagrama de Venn dessa situação.

Figura 32 – Diagrama de Venn para as amostras analisadas.



Fonte: o autor.

Os dois parâmetros analisados foram:

- i. A probabilidade de um ponto pertencer ao padrão ouro, dado que ele pertence à nuvem resultante do método (percentual de acerto em relação ao tamanho da nuvem de pontos resultante do método);
- ii. A probabilidade de um ponto pertencer à nuvem resultante do método, dado que ele pertence ao padrão ouro (percentual de acerto em relação ao tamanho da nuvem de pontos contida no padrão ouro).

As Equações 4 e 5 relacionam as variáveis do parâmetro i e ii, respectivamente:

$$P(PA|RM) = \frac{|PA \cap RM|}{|RM|} \tag{4}$$

$$P(RM|PA) = \frac{|PA \cap RM|}{|PA|} \tag{5}$$

Onde *PA* representa a nuvem de pontos contida no padrão ouro e *RM* a nuvem de pontos resultante de cada método.

A Tabela 5 apresenta o resultado da probabilidade condicional aplicada a cada método.

Tabela 5 - Análise da probabilidade condicional dos resultados dos métodos combinados.

MÉTODO	RM	PA	ACERTO	PERC. ACERTO RM (i.)	INTERVALO DE CONF. ACERTO RM	PERC. ACERTO PA (ii.)	INTERVALO DE CONF. ACERTO PA
Método 1	76.591	79.757	73.354	0,96	0,92 <= P <= 1,00	0,92	0,87 <= P <= 0,97
Método 2	67.151	79.757	65.201	0,97	0,94 <= P <= 1,00	0,82	0,74 <= P <= 0,90
Método 3	79.004	79.757	72.177	0,91	0,85 <= P <= 0,97	0,90	0,84 <= P <= 0,96

**RM:** Resultado do método.

Ao analisar os percentuais de acerto, pode-se afirmar que o método 1 obteve o melhor desempenho. Esse método apresentou o maior percentual de acerto em relação ao padrão ouro e menor intervalo de confiança para esse mesmo parâmetro. Já em relação ao percentual de acerto em relação ao resultado do método obteve um valor 1% menor que o do método 2, porém o intervalo de confiança do método 1 é menor que o apresentado pelo mesmo parâmetro no método 2.

Para verificar a significância da pequena discrepância entre os métodos para o percentual de acerto em relação ao resultado do método, os volumes das superfícies geradas por cada um deles, são comparados com o volume da superfície gerada pelo padrão ouro, mostrada na Figura 33.

Figura 33 – MDT criado a partir do TIN da nuvem de pontos do padrão ouro.



Fonte: o autor.

A Tabela 9 identifica os volumes das superfícies, observando-se que seus percentuais em relação ao padrão ouro são bastante distintos. Isso demonstra que apesar da sobreposição dos intervalos de confiança as superfícies geradas pelos métodos não são equivalentes. Tal fato decorre de que mesmo que o método consiga identificar e eliminar 90% dos pontos que não representam o solo exposto, caso algum ponto da copa da árvore ou até mesmo de telhado permaneça, o volume dessa superfície será bem maior do que o da superfície do padrão ouro.

Como pode ser observado para o método 3 na Tabela 6. Entretanto, a superfície criada pelo método 1 é a que mais se aproxima do volume gerado pela superfície do padrão ouro.

Tabela 6 - Volume das superfícies.

<b>MDT</b>	<b>Volume em m<sup>3</sup></b>	<b>Perc. em Relação ao Padrão Ouro</b>
<b>Padrão Ouro</b>	10.378,86	1
<b>Método 1</b>	7.533,56	0,72
<b>Método 2</b>	6.592,45	0,64
<b>Método 3</b>	13.368,83	1,29

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O avanço tecnológico do sistema sensor LIDAR impulsiona o uso desse e torna seus produtos cada vez mais acessíveis a profissionais e pesquisadores. O Modelo Digital do Terreno é um importante produto, aplicado a diversas aplicações de análises do terreno. A extração automática desse modelo a partir do Modelo Digital de Superfície através, entre outras etapas, da filtragem dos elementos que representam o solo exposto tem sido um desafio, principalmente para regiões íngremes. Esses métodos de filtragem têm como objetivo a identificação dos pontos que não representam o solo exposto e sua posterior eliminação. A sua aplicação em regiões de relevo plano não apresentou dificuldades na identificação e filtragem desses pontos, porque a influência do relevo é menos significativa que a diferença de elevação entre os elementos sobre o solo exposto e o solo exposto.

Com o objetivo de analisar os resultados obtidos por diferentes técnicas, foi utilizada a declividade e os pontos atípicos como métodos de identificação de bordas, além do método de segmentação baseado no índice de Moran Local. Estes métodos conseguiram identificar tais elementos de forma satisfatória e pode-se concluir que o método de segmentação baseado no Índice de Moran Local foi o que apresentou o melhor desempenho para a área de estudo. Essa afirmação pôde ser feita através da análise dos percentuais de acerto em relação ao padrão ouro e ao resultado do método. Além desses parâmetros foi analisado o volume gerado pela superfície de cada método e a do Índice de Moran Local foi a que mais se aproximou da do padrão ouro.

Através do preenchimento dos polígonos de agregação dos pontos de bordas, é possível identificar além das bordas, a região interna a elas, melhorando significativamente a identificação dos pontos representativos do solo exposto. Para as bordas identificadas pelos pontos atípicos o preenchimento não foi capaz de cobrir todos os elementos sobre o solo exposto. Ao que tudo indica esse problema ocorre porque esse método não foi capaz de identificar todas as bordas dos elementos.

O emprego dos métodos separadamente foi capaz de identificar de forma satisfatória o solo exposto. Portanto, não foram testadas as combinações entres os métodos de identificação de bordas e segmentação.

Por fim, recomenda-se a pesquisa de outras técnicas, individuais e associadas, que sejam mais automáticas. Salienta-se também que sejam utilizados os métodos de identificação de bordas com a técnica de preenchimento de polígonos para regiões íngremes, com grande

variação de relevo e diversidades de alvos. Essas sugestões têm por finalidade aproximar a pesquisa da grande variabilidade das superfícies do terreno.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM, D. C. R.; SILVA, P. N. Sensoriamento remoto e suas técnicas de análise: uma comparação entre novas e velhas tecnologias, um estudo de caso sobre a tecnologia lidar (o mapeamento de território através das árvores). In: XXI Encontro Nacional de Geografia Agrária – Territórios em disputa: Os desafios da Geografia Agrária nas contradições do desenvolvimento brasileiro, 2012, Uberlândia. **Anais eletrônicos...** Uberlândia: UFU, 2012. Disponível em: <[http://www.lagea.ig.ufu.br/xx1enga/anais\\_enga\\_2012/eixos.html](http://www.lagea.ig.ufu.br/xx1enga/anais_enga_2012/eixos.html)>. Acesso em: 21 jan. 2016.
- ANTERO, A. O.; TOMMASELLI, A. M. G. Detecção e afinamento de bordas em direções previamente conhecidas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 15, n. 2, p. 157-177, 2009.
- ARUN, P. V. *A comparative analysis of different DEM interpolation methods. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, Índia, v.16, n. 2, p.133-139, 2013.
- ASSUNÇÃO, M. G. T. **Desenvolvimento de métodos de filtragem e classificação de pontos LIDAR para a geração automática do modelo digital do terreno**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- AXELSSON, P. *DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models*. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Proceedings...* Amsterdã, p.110– 117, 2000.
- BATER, C.W.; COOPS, N.C. *Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation*. **Comput. Geosciences**, Reino Unido, v. 35, n. 2, p. 289-300, 2009.
- 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**, v. 65, n. 4, p. 651-659, 2013.
- BIFFI, L. J.; JARENKOW, G. L.; FRANCHINI, R. L.; VIEIRA, R. M.; RAFAELI NETO, S. L.; CORDEIRO, M. T. A. Comparação de modelos digitais de elevação de SRTM e ASTER com modelo de elevação de grande escala do município de Lages - SC. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 1384 – 1390.
- BROVELLI, M. A.; CANNATA, M.; LONGONI, U. M. *Managing and processing LIDAR data within GRASS*. In: *GRASS Users Conference, Proceedings...* Trento, Italia, 2002.
- BURROUGH, P.; MCDONNELL, R. **Principles of geographical information systems**. 2. Ed. New York, Oxford University Press, 1998.
- CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: a experiência da UFPR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO

REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3645-3652.

DAL POZ, A. P. Filtragem de dados de varredura a laser: princípios e exemplos. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. v. 16. p. 6057-6064.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. 3. ed. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2004.

DIRETORIA DE SERVIÇOS GEOGRÁFICOS. **Norma da Especificação Técnica Para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais**. 2. ed. Brasília, 2016.

EBERT, C. E.; PRUFER, K. M.; MACRI, M. J.; WINTERHALDER, B.; KENNETT, D. J. **Terminal long count dates and the disintegration of classic period maya polities**. In: *Ancient Mesoamerica*, Cambridge, v. 25, p. 337-356, 2014.

JABOYEDOFF, M.; OPPIKOFER, T.; ABELLÁN, A.; DERRON, M.; LOYE, A.; METZGER, R.; PEDRAZZINI, A. *Use of LIDAR in landslide investigations: a review*. **Natural Hazards**, v. 61, n. 1, p.5-28, 2012.

KHALID, N. F.; DIN, A. H. M.; OMAR, K. M.; KHANAN, M. F. A.; OMAR, A. H.; HAMID, A. I. A.; PA'SUYA, M. F. *Open-Source Digital Elevation Model (DEMs) Evaluation With GPS And LIDAR Data*. **International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ISPRS**, v. 42, p. 277-286, 2016.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. *Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data*. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, p. 193-203, 1998.

LIU, X. *Airborne LIDAR for DEM generation: some critical issues*. **Progress in Physical Geography**, v. 32, n. 1, p. 31-49, 2008.

MANUEL, P. *Influence of DEM interpolation methods in Drainage Analysis*. **GIS Hydro**, 4, Texas, 2004.

MUCHERONI, M. L.; CRUVINEL, P. E.; MINATEL, E. R. Identificação automática de bordas com o uso de Transformadas Rápidas de Fourier. In: I SBAI, 1993, Rio Claro. **Anais eletrônicos...** São Carlos: 1993. Disponível em <<http://fei.edu.br/sbai/SBAI1993/>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

PACHECO, A. P.; CENTENO, J. A. S.; ASSUNÇÃO, M. G. T.; BOTELHO, M. F. Classificação de pontos LiDAR para a geração do MDT. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n. 3, p. 417-438, 2011.

PEREIRA, J. P. **Mensuração automática de copas de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze a partir de dados LiDAR para estimativa de variáveis dendrométricas**.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

PFEIFER, N.; KOSTLI, A.; KRAUS, K. *Interpolation and filtering of laser scanner data—implementation and first results. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ISPRS*, v. 32, p. 153-159, 1998.

PODOBNIKAR, T.; VREČKO, A. *Digital Elevation Model from the Best Results of Different Filtering of a LiDAR Point Cloud Transactions in GIS. Transactions in GIS*, v. 16, n. 5, p.603-617, 2012.

PREFEITURA DO RECIFE. **Relatório de Atividades Executadas**: 2013, n.2. Recife, 2013.

ROBINSON, N.; REGETZ, J.; GURALNICK, R. P. *A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 87, p. 57-67, 2014.

SCHIMALESKY, V. **Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a laser em uma região coberta por vegetação**: um estudo de caso. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SILVA, I.; SEGANTINE, P. C. L. **Topografia para Engenharia**: teoria e prática de geomática. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. ISBN 978-85-352-7748-7.

SITHOLE, G. *Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. In: International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 34, n. 3/W4, p. 22-24, 2001.

SITHOLE, G.; VOSELMANN, G. *Automatic Structure Detection in a Point-Cloud of an Urban Landscape. In: Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (URBAN2003)*, 2003, Berlin. **Anais...** Berlin: 2003, p. 67-71.

VOSELMAN, G. *Slope based filtering of laser altimetry data. In: International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Amsterdã, v. 33, n. B3/2, p. 935-942, 2000.

WACK, R.; WIMMER, A. *Digital terrain models from airborne laser scanner data - a grid based approach. In: International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 34, p. 293-296, 2002.

WERBROUCK, I.; ANTROP, M.; VAN EETVELDE, V.; STAL, C.; DE MAEYER, P.; BATS, M.; BOURGEOIS, J.; COURT-PICON, M.; CROMBÉ, P.; DE REU, J.; DE SMEDT, P.; FINKE, P.A.; VAN MEIRVENNE, M.; VERNIERS, J.; ZWERTVAEGHER, A. *Digital elevation model generation for historical landscape analysis based on LiDAR data: a case study in Flanders (Belgium). Expert Systems with Applications*. v. 38, n. 7, p. 8173–8185, 2011.

ZANDONÁ, D. F. **Potencial uso de dados Laser Scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia

Florestal) – Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ZHANG, K.; CHEN, S. C.; WHITMAN, D.; SHYU, M. L., YAN, J.; ZHANG, C. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, n. 4, p. 872-882, 2003.

ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; LI, X. automatic extraction of dtm from low resolution dsm by twosteps semi-global filtering. In: *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. III, n. 3, p. 249-255, 2016.

ZHAO, X; GUO, Q; SU, Y; XUE, B. Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas. *International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. v. 117:p. 79–91, 2016.