



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

**RAUL FELIX ALVES DE MOURA**

**Desenvolvimento de Algoritmo de Reamostragem para Dados LiDAR: Um  
Estudo de Caso com Base no Projeto PE3D**

**RECIFE**

**2024**

**RAUL FELIX ALVES DE MOURA**

**Desenvolvimento de Algoritmo de Reamostragem para Dados LiDAR: Um  
Estudo de Caso com Base no Projeto PE3D**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

**Orientador(a):** Dr. José Luiz Portugal

**RECIFE**

**2024**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Moura, Raul Felix Alves de.

Desenvolvimento de Algoritmo de Reamostragem para Dados LiDAR: Um Estudo de Caso com Base no Projeto PE3D / Raul Felix Alves de Moura. - Recife, 2024.

54 : il., tab.

Orientador(a): José Luiz Portugal

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Cartográfica e de Agrimensura - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. Algoritmo. 2. Generalização cartográfica. 3. LiDAR. 4. Nuvem de pontos.. I. Portugal, José Luiz. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

RAUL FELIX ALVES DE MOURA

**Desenvolvimento de Algoritmo de Reamostragem para Dados LiDAR: Um  
Estudo de Caso com Base no Projeto PE3D**

Trabalho de Conclusão de Curso,  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Cartográfica e de  
Agrimensura, da Universidade Federal de  
Pernambuco como requisito parcial para a  
obtenção de grau de Bacharel em  
Engenharia Cartográfica e de  
Agrimensura.

Aprovado em: 20/03/2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

Dr<sup>a</sup>. Lúgia Albuquerque de Alcântara Ferreira (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha mãe, Lêda, e à minha família, pelo apoio e carinho.

À minha companheira de vida, Clara, que sempre esteve ao meu lado.

Ao meu orientador, José Luiz Portugal, expresso meus agradecimentos por sua orientação.

Um agradecimento especial a José Gabriel, parceiro nas produções acadêmicas e nos desafios profissionais, uma amizade que foi essencial na minha formação como Engenheiro Cartógrafo e Agrimensor. Aos docentes do DECART e aos meus colegas de curso, expresso minha gratidão pela contribuição na jornada.

Ao meu amigo Otacílio Maia, cujo o auxílio técnico foi a semente que pode germinar este trabalho.

A Heloíza, Dimitri, Gabriel “Bibika”, Vladson, Ruany, Hannah, pelos momentos, todas histórias, risadas e brindes. A Amanda por me mostrar o quanto ainda posso me divertir. Aos amigos da dança, por cada música e conexão que ajudaram a manter minha mente sã.

A todos que estiveram ao meu lado durante essa trajetória, inclusive aos que partiram e, principalmente, aos que decidiram ficar.

Por fim, às lágrimas derramadas, agradeço, pois foram essenciais para adubar os sorrisos do futuro.

*“...En aquel Imperio, el Arte de la Cartografía logró tal Perfección que el mapa de una sola Provincia ocupaba toda una Ciudad, y el mapa del Imperio, toda una Provincia. Con el tiempo, estos Mapas Desmesurados no satisficieron y los Colegios de Cartógrafos levantaron un Mapa del Imperio, que tenía el tamaño del Imperio y coincidía puntualmente con él. Menos Adictas al Estudio de la Cartografía, las Generaciones Sigüientes entendieron que ese dilatado Mapa era Inútil y no sin Impiedad lo entregaron a las Inclemencias del Sol y los Inviernos. En los desiertos del Oeste perduran despedazadas Ruinas del Mapa, habitadas por Animales y por Mendigos; en todo el País no hay otra reliquia de las Disciplinas Geográficas. Suárez Miranda, Viajes de Varones Prudentes, Libro Cuarto, Cap. XLV, Lérida, 1658.*

Borges, 1960

## RESUMO

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de um algoritmo de reamostragem para dados LiDAR, com ênfase no projeto PE3D. O objetivo central é a simplificação de dados obtidos por *laserscanners*, visando à geração de modelos digitais de terreno (MDT) mais leves atendendo aos requisitos da PEC-PCD. Para alcançar esse propósito, foram aplicadas técnicas de generalização cartográfica, simplificação de superfícies, seleção de pontos significativos e remoção de pontos redundantes. O método desenvolvido na linguagem python fundamenta-se em conceitos avançados de interpolação de dados, visando à redução do número de pontos tridimensionais mantendo a fidelidade de representação. A abordagem matemática adotada demonstrou eficiência na reamostragem de nuvens de pontos, resultando na geração de uma nuvem de pontos com redução de 45% até 99%, variando de acordo com a declividade. Os resultados obtidos demonstraram a relevância e a aplicabilidade do algoritmo de reamostragem, contribuindo significativamente para a área de cartografia e sensoriamento remoto.

**Palavras-chave:** algoritmo; generalização cartográfica; LiDAR; nuvem de pontos.

## **ABSTRACT**

The present work addresses the development of a resampling algorithm for LiDAR data, with a focus on the PE3D project. The central objective is the simplification of data obtained by laser scanners, aiming to generate lighter Digital Terrain Models (DTMs) that meet the requirements of PEC-PCD. To achieve this purpose, techniques such as cartographic generalization, surface simplification, selection of significant points, and removal of redundant points were applied. The method developed in the Python language is based on advanced concepts of data interpolation, aiming to reduce the number of three-dimensional points while maintaining representation fidelity. The adopted mathematical approach demonstrated efficiency in resampling point clouds, resulting in a point cloud generation with a reduction ranging from 45% to 99%, depending on the slope. The obtained results underscore the relevance and applicability of the resampling algorithm, making a significant contribution to the fields of cartography and remote sensing.

**Keywords:** algorithm; cartographic generalization; LiDAR; point cloud.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 — Padrão de Exatidão Cartográfico e Erro Padrão planimétrico.	19
Quadro 2 — Padrão de Exatidão Cartográfico e Erro Padrão altimétrico.	19
Quadro 3 — Padrão de Exatidão Cartográfico e Erro Padrão planimétrico para Produtos Cartográficos Digitais.	20
Quadro 4 — Padrão de Exatidão Cartográfico e Erro Padrão altimétrico para Produtos Cartográficos Digitais.	20
Figura 1 — Princípio do funcionamento do Laser Scanner aerotransportado.	22
Figura 2 — Fluxograma da metodologia	28
Figura 3 — Mapa de Localização APA Chapada do Araripe e da cidade de Araripina	30
Figura 4 — Mapa altimétrico e de localização do maciço da Serra da Baixa Verde	31
Figura 5 — Representação do MDT em formato XYZ.	32
Figura 6 — Mapa de localização e declividade de Triunfo	33
Figura 7 — Mapa de localização e declividade de Araripina	33
Figura 8 — Construção das faixas de análise com distanciamento INT.	35
Figura 9 — Exemplo do espaçamento em função da declividade	36
Figura 10 — Exemplo do perfil gerado a partir de uma faixa de pontos.	36
Figura 11 — Funcionamento da classificação de pontos significativos através do programa	37
Figura 12 — Representação gráfica do funcionamento da seleção de pontos significativos.	38
Figura 13 — Etapa posterior na seleção de pontos significativos.	38
Figura 14 — Comparação da superfície natural e a superfície gerada com pontos significativos.	39
Figura 15 — Pontos filtrados e Pontos armazenados	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — PEC da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais	21
Tabela 2 — EP da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais	21
Tabela 3 — PEC Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais	21
Tabela 4 — EP Altimétrico dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais	21
Tabela 5 — Resultado da redução do tamanho do arquivo de pontos via processamento	40
Tabela 6 — Resultado da redução do número de pontos via processamento	40
Tabela 7 — Resultado da verificação de erros	41
Tabela 8 — Padrão de Exatidão Cartográfica pelo método proposto	42

## LISTA DE ABREVIações

APA	Área de Proteção Ambiental
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EC	Equidistância das Curvas de Nível
EP	Erro-Padrão
ET-ADGV	Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
FPDEMS	<i>Feature-Preserving DEM Smoothing</i>
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IA	Inteligência Artificial
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMU	Unidade de Medição Inercial
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>

MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
PE3D	Projeto Pernambuco Tridimensional
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2 EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Generalização Cartográfica</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Dimensionamento do pixel e sua influência na produção cartográfica</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)</b>	<b>18</b>
<b>2.4 Laser Scanner / Perfilamento a laser</b>	<b>22</b>
<b>2.5 Pernambuco Tridimensional (PE3D)</b>	<b>24</b>
<b>2.6 Python</b>	<b>25</b>
<b>2.7 Determinação da amostragem para avaliação da qualidade posicional</b>	<b>26</b>
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Área de estudo</b>	<b>28</b>
3.1.1 Araripina	28
3.1.2 Triunfo	30
<b>3.2 Acesso aos dados e identificação da declividade</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Seleção de pontos significativos</b>	<b>34</b>
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>40</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>43</b>
<b>APÊNDICE A – CÓDIGO DO PROGRAMA</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cartografia desempenha um papel fundamental no campo da geoinformação, contribuindo significativamente para a compreensão, representação e comunicação das características geográficas do nosso mundo. Seu impacto abrange uma ampla gama de setores, desde a administração do território até a tomada de decisões estratégicas em áreas como gestão ambiental, transporte, urbanismo e planejamento territorial (Reginato *et al.*, 2022, e Santos, 2020).

Entretanto, a produção de mapas que atendam às necessidades específicas de cada processo é um desafio constante enfrentado por cartógrafos e profissionais da geoinformação, uma vez que frequentemente é necessário simplificar dados complexos. Isso nos leva a um dos conceitos centrais da cartografia: a generalização cartográfica, um processo que consiste na representação de informações geoespaciais para diferentes escalas, de modo que seja possível representá-las em mapas e sistemas de informação, conforme as necessidades e objetivos (Freiman e Dos Santos, 2022).

No contexto da cartografia nacional, o Decreto-Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984 (Brasil, 1984), estabeleceu diversas instruções técnicas a respeito de normas e critérios para avaliação produtos cartográficos analógicos. Posteriormente, a ET-ADGV (Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais) foi publicada pelo Ministério da Defesa (Brasil, 2016), complementando os critérios de qualidade e limites de erros para dados cartográficos digitais, conhecido como PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais) (Brasil, 2016).

Com o avanço tecnológico, novas ferramentas como os laserscanners surgiram, trazendo consigo novos desafios. O LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é uma tecnologia de sensoriamento remoto que realiza varreduras tridimensionais de regiões, gerando uma grande quantidade de pontos e, conseqüentemente, arquivos muito grandes. Isso pode dificultar o processamento, a visualização e a representação em escalas menores (Cao *et al.*, 2015).

O projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) teve origem em resposta a enchentes que atingiram o Estado entre 2010 e 2011 (Cirilo *et al.*, 2015). O mapeamento consistia no levantamento aerofotogramétrico e varredura a laser para

o desenvolvimento de projetos, totalizando cerca de 75 bilhões de pontos, o que em média representa um ponto a cada 1,3 metros quadrados em todo o território de Pernambuco.

Ao manipular a nuvem de pontos oriunda do PE3D para a elaboração de projetos, os desafios relacionados à alta densidade de pontos e tamanho dos arquivos se fizeram presentes. Somado às dificuldades de interpolação de dados para geração de modelos digitais de terreno (MDT), transferências e espaço no armazenamento em nuvem, surgiu a necessidade de construir uma técnica que consiga reduzir o número de dados mantendo a fidelidade de representação.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é simplificar os dados obtidos por *laserscanners*. Isso será efetuado por meio da aplicação de técnicas de generalização cartográfica e da utilização de dados LiDAR coletados pelo PE3D. Será realizado um estudo para reamostrar os pontos tridimensionais, além de gerar uma nova malha mais leve e otimizada, adequada para representar áreas mais extensas, visando atender aos requisitos da PEC-PCD.

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Nesta seção, será abordado a perspectiva da literatura e o embasamento teórico essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Discutido os temas centrais, como generalização cartográfica, padrões de exatidão cartográfica e fundamentos matemáticos para a formulação do algoritmo, que apoiará outras construções teóricas relacionadas aos parâmetros.

### 2.1 Generalização Cartográfica

O desafio inerente ao processo de generalização cartográfica reside na necessidade de reduzir o ambiente para uma representação em uma escala menor. Isso se deve ao fato de que a representação da Terra em escala 1:1 é inviável, sendo toda representação cartográfica uma redução. Tal redução acarreta consequências como a perda de clareza ao transitar de um contexto específico para um mais geral (McMaster e Shea, 1992). Para realizar esse tipo de alteração é demandado a aplicação de operadores como simplificação, agregação e deslocamentos (Sester, 2020).

A aplicação desses operadores no processo de compatibilização dos elementos geoespaciais com as restrições gráficas, em uma determinada escala, configura o conjunto de práticas denominado generalização cartográfica. Nesse contexto, um fluxo de trabalho é implementado para a confecção de mapas (Freiman e Dos Santos, 2022). A generalização cartográfica, portanto, consiste no processo utilizado para tratar dados geoespaciais de entrada e representá-los em escalas diversas, resultando em representações facetadas, desenvolvidas e aplicadas conforme as necessidades e objetivos do produtor de um mapa, alinhadas às regras impostas por um determinado nível de abstração (Sester, 2020).

Enquanto na Cartografia analógica a generalização era realizada visando manter o processo de visualização e comunicação cartográfica de maneira adequada (Müller *et al.*, 1995), na perspectiva digital, o paradigma é expandido. O propósito passa a ser a generalização para reduzir a base de dados ao mínimo necessário, preservando as propriedades espaciais relevantes do conjunto (McMaster e Shea, 1992; Stoter *et al.*, 2014; Rocca, Jenny e Puppo, 2017; Schiewe,

2021). Ambas as abordagens estão relacionadas à coleta e comunicação de informações espaciais. No entanto, ao utilizar uma abordagem computacional, há uma separação entre o conteúdo de informação do sistema e a apresentação dessas informações de forma gráfica, seja em uma imagem (mapa) ou em um modelo cartográfico.

Nos últimos anos, tem-se observado uma consolidação das atividades de pesquisa relacionadas a essa temática, impulsionada pelas crescentes demandas por visualização em ambientes virtuais em comparação com produtos impressos (Sester, 2020). Esse fenômeno é atribuído, em grande parte, ao desenvolvimento do Sistema de Informação Geográfica (SIG), que emprega ferramentas para ampliação e redução de camadas monotemáticas simultaneamente (Müller *et al.*, 1995).

Contudo, diante dos recentes avanços tecnológicos e da introdução de novos processos e metodologias complexas para a aquisição de dados geoespaciais, torna-se evidente que a pesquisa sobre generalização cartográfica assume um papel crucial para os desenvolvimentos científicos e a automação computacional. Nessa perspectiva, surge a questão central: se o desenvolvimento de novas tecnologias de aquisição de dados geoespaciais e processamento computacional de geodados exige a aplicação de processos de generalização cartográfica, então novas lacunas e desafios científicos associados à temática devem ser abordados em uma perspectiva global (Freiman e Dos Santos, 2022).

No contexto brasileiro, diversas iniciativas discutem a temática da generalização cartográfica, especialmente no contexto da produção automatizada de cartas topográficas, embora ainda não sejam operacionalmente aplicadas no país. Essas iniciativas orientam-se por avaliações cartométricas, detectando problemas geométricos resultantes da redução de escala, definindo operadores e adotando simbologias adequadas, seguindo os princípios de McMaster e Shea (1992), como em Taura, Sluter e Firkowski (2010) e Comé e Sluter (2015). Essas perspectivas também são abordadas em ambientes web, através de discussões sobre multiescala, simbolização e aplicação de operadores de generalização, como em Graça e Fiori (2015). A implementação de operadores de generalização por meio de algoritmos computacionais também é explorada, como exemplificado por Gruppi *et al.* (2016) e Firkowski (2002), ambos abordando a implementação de operadores de simplificação, o primeiro para feições lineares e o segundo para superfícies topográficas. Andrade e Silva e Dos Santos (2022) discutiram o processo de

simplificação aplicado a nuvens de pontos LiDAR para a extração de informações de vegetação.

No âmbito geral, os algoritmos de generalização cartográfica demonstram eficiência para a maioria das tarefas relacionadas à construção de representações tradicionais. No entanto, para o contexto digital, ainda são necessários avanços significativos para tarefas específicas. A interdependência das operações e a necessidade de implementação de meios de controle de qualidade automática impõem limitações (Freiman e Dos Santos, 2022). De acordo com Jones e Ware (2005), trabalhos científicos nas últimas décadas buscaram resolver essa problemática, mas parte das limitações está associada às inadequações das implementações dos operadores de generalização em face da dificuldade de estabelecer um conjunto de regras adequado para situações específicas.

Atualmente, alguns esforços estão concentrados na implementação de técnicas de Inteligência Artificial (IA), Redes Neurais e generalização cartográfica tridimensional (Sester, 2020). A generalização cartográfica tridimensional demanda avanço científico, uma vez que, ao contrário do processo usual que visa aprimorar a legibilidade do produto, neste caso, busca-se a redução da demanda de armazenamento, a simplificação do processamento dos dados e a possibilidade de análise de um nível grosseiro para um refinado (Biljecki *et al.*, 2016; Tang *et al.*, 2020). O desafio principal reside na falta de definição completa dos operadores, que dependerão da finalidade do aplicativo. Alguns esforços têm sido feitos, principalmente na generalização de edificações (Forberg, 2007; Biljecki *et al.*, 2016; Tang *et al.*, 2020), na construção de Modelos Digitais de Terreno (MDTs) e nos estudos da paisagem (Filin *et al.*, 2007; Jenny, 2021).

## **2.2 Dimensionamento do pixel e sua influência na produção cartográfica**

Na imagem digital, a dimensão do pixel está relacionada à sua resolução espacial, isto é, sobre a parcela do terreno ou objeto que é representado, de acordo com a escala do produto (Almeida e De Oliveira, 2010).

Segundo Peaters (2017), um pixel representa o menor elemento constituinte em uma imagem digital, sendo a imagem formada pela concatenação dos elementos nas posições de linha e coluna. Essa organização é conhecida como *grid* ou *grade*,

de forma que o pixel representa uma tecnologia, enquanto a grade é um modelo, que apresenta propriedades como uma resolução.

Segundo Neuman, Da Silveira e Sampaio (2018) a influência da dimensão do pixel na criação de uma grade de superfície é significativa. A resolução espacial dos modelos digitais de elevação (MDEs) afeta diretamente a obtenção dos atributos topográficos derivados da superfície. Quanto menor a resolução espacial, ou seja, quanto maior o tamanho do pixel, maior é a perda de detalhes e menor é a precisão na representação das características do terreno.

Hengl (2006) em seu artigo discute regras empíricas e analíticas para selecionar uma resolução de grade adequada para mapas de saída e com base nas propriedades inerentes dos dados de entrada. A escolha da resolução da malha esteve relacionada com os conceitos cartográficos e estatísticos: escala, poder de processamento do computador, precisão posicional, tamanho dos delineamentos, densidade de inspeção, estrutura de autocorrelação espacial e complexidade do terreno. Estes foram ainda relacionados com os conceitos da estatística geral e teoria da informação, como o conceito de frequência de Nyquist do processamento de sinal e equações para estimar a função de densidade de probabilidade. A resolução da grade também foi relacionada com o espaçamento entre as curvas de nível, ou seja, a complexidade do terreno.

Concluiu-se que não existe uma resolução de grade ideal, mas sim uma gama de resoluções adequadas. Deve-se pelo menos tentar evitar o uso de resoluções que não estejam em conformidade com a escala efetiva ou propriedades inerentes do conjunto de dados de entrada.

### **2.3 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)**

O Decreto nº 89.817, de 20 de Junho de 1984 (Brasil, 1984), estabelece normas, procedimentos e padrões mínimos a serem observadas na elaboração de produtos cartográficos e correlatos, por todas as entidades públicas e privadas em território nacional.

Nele é classificado as cartas quanto a sua classe (A, B ou C), com base na escala da carta e na equidistância das curvas de nível (EC), ou seja, o espaçamento vertical entre as curvas cotadas. Dessa forma o Padrão de Exatidão Cartográfico

(PEC) é associado a uma classificação planimétrica (Quadro 1) e altimétrica (Quadro 2).

Quadro 1 — Padrão de Exatidão Cartográfica e Erro Padrão planimétrico

Categoria	PEC	EP
A	0,5 mm x Escala	0,3 mm x Escala
B	0,8 mm x Escala	0,5 mm x Escala
C	1,0 mm x Escala	0,6 mm x Escala

Fonte: Adaptado do Decreto 89.817/1984 (Brasil,1984).

Quadro 2 — Padrão de Exatidão Cartográfica e Erro Padrão altimétrico

Categoria	PEC	EP
A	$(1/2)*EC$	$(1/3)*EC$
B	$(3/5)*EC$	$(1/2)*EC$
C	$(3/4)*EC$	$(1/2)*EC$

Fonte: Adaptado do Decreto 89.817/1984 (Brasil,1984).

O Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão (EP).

Para que determinado dado geoespacial seja aceito, noventa por cento (90% ou  $1,6449*EP$ ) dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico, quando comparados com as suas coordenadas levantadas em campo, devem apresentar os valores iguais ou inferiores aos previstos ao PEC, devendo ainda apresentar os valores de EP também iguais ou inferiores aos previstos. O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

Considerando que a princípio, a PEC só contemplava produtos analógicos, e com o avanço da tecnologia, o advento do geoprocessamento e dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), surgiu a necessidade de se definir o modo de aquisição dentro dos padrões anteriores para a geometria dos dados geoespaciais e dos atributos correlatos oriundo de meios digitais.

Desta forma, o Ministério da Defesa (Brasil, 2016) publicou a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), uma norma que estabelece os valores de PEC para os produtos digitais, o PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica - Produtos Cartográficos Digitais). Os novos valores foram determinados considerando o ganho substancial que a modernização de equipamentos e metodologias computacionais permitem (Quadro 3 e 4).

Quadro 3 — Padrão de Exatidão Cartográfico e Erro Padrão planimétrico para Produtos Cartográficos Digitais

Categoria	PEC-PCD	EP
A	0,28 mm x Escala	0,17 mm x Escala
B	0,5 mm x Escala	0,3 mm x Escala
C	0,8 mm x Escala	0,5 mm x Escala
D	1,0 mm x Escala	0,6 mm x Escala

Fonte: Adaptado da ET-ADGV (Brasil, 2016).

Quadro 4 — Padrão de Exatidão Cartográfico e Erro Padrão altimétrico para Produtos Cartográficos Digitais

Categoria	PEC	EP
A	0,27*EC	(1/6)*EC
B	(1/2)*EC	(1/3)*EC
C	(3/5)*EC	(1/2)*EC
D	(3/4)*EC	(1/2)*EC

Fonte: Adaptado da ET-ADGV (Brasil, 2016).

Em quesito de valores, temos o PEC-PCD da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais na Tabela 1 e o EP na Tabela 2. Os valores do PEC Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais encontram-se na Tabela 3 e o EP na Tabela 4.

Tabela 1 — PEC da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais

PEC-PCD	1:1000	1:2000	1:5000	1:10.000	1:25.000	1:50.000
A	0,28 m	0,56 m	1,40 m	2,80 m	7,00 m	14,00 m
B	0,50 m	1,00 m	2,50 m	5,00 m	12,50 m	25,00 m
C	0,80 m	1,60 m	4,00 m	8,00 m	20,00 m	40,00 m
D	1,00 m	2,00 m	5,00 m	10,00 m	25,00 m	50,00 m

Fonte: Adaptado da ET-ADGV (Brasil, 2016).

Tabela 2 — EP da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais

EP	1:1000	1:2000	1:5000	1:10.000	1:25.000	1:50.000
A	0,17 m	0,34 m	0,85 m	1,70 m	4,25 m	8,51 m
B	0,30 m	0,60 m	1,50 m	3,00 m	7,50 m	15,00 m
C	0,50 m	1,00 m	2,50 m	5,00 m	12,50 m	25,00 m
D	0,60 m	1,20 m	3,00 m	6,00 m	15,00 m	30,00 m

Fonte: Adaptado da ET-ADGV (Brasil, 2016).

Tabela 3 — PEC Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais

PEC-PCD	1:1000	1:2000	1:5000	1:10.000	1:25.000	1:50.000
A	0,27	0,27	0,54	1,35	2,70	5,50
B	0,50	0,50	1,00	2,50	5,00	10,00
C	0,60	0,60	1,20	3,00	6,00	12,00
D	0,75	0,75	1,50	3,75	7,50	15

Fonte: Adaptado da ET-ADGV (Brasil, 2016).

Tabela 4 — EP Altimétrico dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais

EP	1:1000	1:2000	1:5000	1:10.000	1:25.000	1:50.000
A	0,17	0,17	0,34	0,84	1,67	3,33
B	0,33	0,33	0,66	1,67	3,33	6,66
C	0,40	0,40	0,80	2,00	4,00	8,00
D	0,50	0,50	1,00	2,50	5,00	10,00

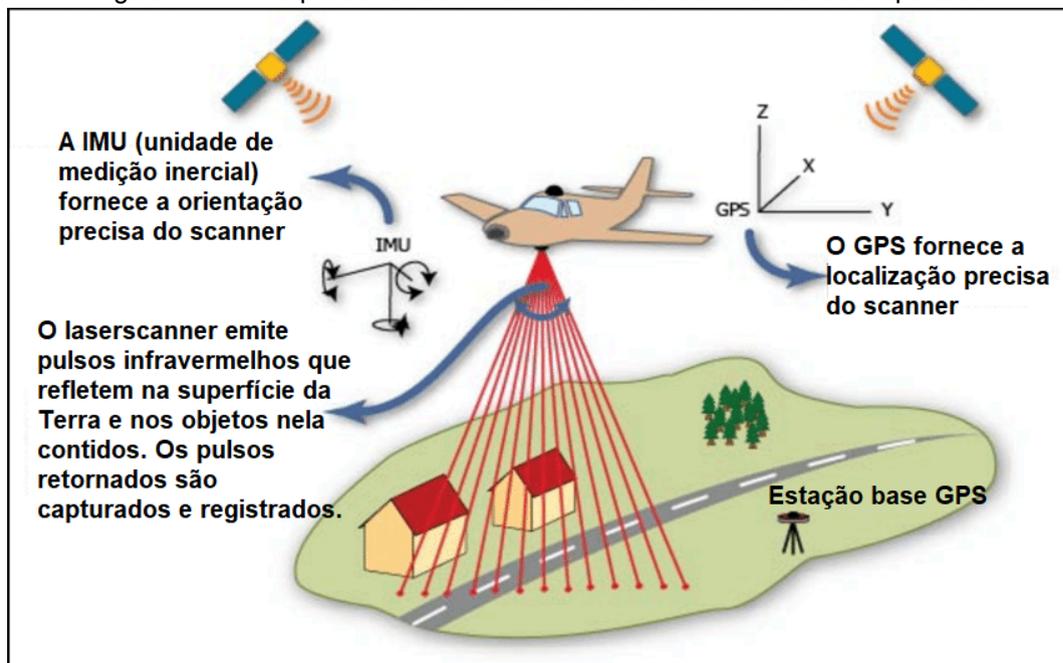
Fonte: Adaptado da ET-ADGV (Brasil, 2016).

## 2.4 Laser Scanner / Perfilamento a laser

O sistema de *laser scanner* aerotransportado, também conhecido como LiDAR (Light Detection And Ranging), é um sistema de sensoriamento remoto ativo que possibilita a determinação de coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) de pontos na superfície terrestre. Sua abordagem é fundamentada na emissão de um pulso de laser (feixe infravermelho) disparado na direção da superfície. Quando o pulso atinge o alvo, uma porção do sinal emitido é refletida para o sensor. Dessa forma, o dispositivo mede a intensidade do sinal e o tempo decorrido entre a emissão e o retorno do sinal. Essa medição permite que o sistema calcule a distância sensor-objeto, considerando que o pulso laser se propaga com a velocidade da luz (Baltsavias, 1999).

Com base na distância sensor-objeto calculada, na orientação do sensor no momento da emissão/registro do pulso e na posição da aeronave, é possível determinar a posição tridimensional do local onde o pulso foi refletido (Centeno e Mitishita, 2007). A Figura 1 ilustra o princípio de funcionamento do *Laser Scanner*.

Figura 1 — Princípio do funcionamento do *Laser Scanner* aerotransportado



Fonte: Adaptado de Fruchart (2014).

O posicionamento do sensor durante a emissão/captação de pulsos no sistema LiDAR é determinado pelo sistema de GPS diferencial (DGPS), que obtém

as coordenadas (X, Y, Z) em intervalos fixos. A unidade de medição inercial (IMU) calcula os ângulos de atitude ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) do sensor em torno dos eixos X, Y, Z definidos pelo DGPS (Centeno, 2003).

A coleta de dados do IMU e DGPS ocorre simultaneamente à medição da distância pelo laser, exigindo sincronização entre IMU, GPS e pulso laser para o funcionamento adequado do sistema LiDAR (Dalmolin e Santos, 2004).

Contudo, diversos fatores, como material da superfície, altitude do sensor e qualidade dos dados GPS/IMU, influenciam na qualidade da informação altimétrica fornecida pelo LiDAR, conforme apontado por Crombaghs, Brugelman e De Min (2000).

O sistema LiDAR pode medir diferentes retornos de sinal, refletidos por vários alvos no terreno. Isso inclui a medição do primeiro e último retorno do pulso, ou até mesmo a variação completa do retorno, se necessário (Centeno e Mitishita, 2007).

O mapeamento com *laser scanner* permite a coleta de dados topográficos e estruturais, possibilitando a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Elevação (MDE). O MDT refere-se aos dados gerados pelos feixes que atingem o terreno, enquanto o MDE leva em consideração as estruturas verticais sobrepostas ao terreno.

Segundo Alex, Víctor e Jesús (2020), os resultados obtidos comparando a utilização do LiDAR com aerofotogrametria tradicional, conclui que o *laser scanner* fornece uma melhor descrição da topografia, particularmente sob florestas e em áreas com topografia complexa.

Apesar dos avanços na melhoria da precisão e densidade de pontos, é uma ocorrência frequente identificar variações na densidade desses pontos. Essas discrepâncias podem sinalizar desafios nas nuvens de pontos, acarretando potencialmente em imprecisões nos produtos derivados, como modelos topográficos e geoespaciais. Em seu artigo, Petras (2023) aborda estratégias voltadas à minimização das variações na densidade de pontos, destacando técnicas como decimações e homogeneizações. A técnica de decimação, também conhecida como redução, redução da resolução ou simplificação, consiste na diminuição do número de pontos em uma nuvem de pontos, com o intuito de preservar determinadas propriedades específicas dessa nuvem. Embora a maioria das operações de decimação resulte na homogeneização da densidade de pontos na nuvem, é importante ressaltar que a homogeneização completa ou verdadeira pode envolver a

inclusão de pontos adicionais em áreas onde a densidade é baixa, processo conhecido como preenchimento.

As técnicas de decimação abrangem desde abordagens simples, como a amostragem aleatória, até algoritmos mais complexos baseados na forma dos objetos representados pela nuvem de pontos (Leal *et al.*, 2021). No contexto da homogeneização total, a reamostragem utilizando grades regulares pode ser empregada para adicionar pontos em áreas com baixa densidade, gerando uma grade tridimensional (raster) ou voxelização espacial (Li e Sun, 2018).

Lindsay, Francioni e Cockburn (2019), destacam a importância de abordagens mais sofisticadas na manipulação de dados LiDAR para preservar informações valiosas e melhorar a precisão das representações topográficas. Considerando que os métodos tradicionais de suavização, como filtros médios, medianos e gaussianos, podem resultar na perda de detalhes cruciais, prejudicando a identificação de características importantes da paisagem, em seu artigo, introduz um método, o FPDEMS (*feature-preserving DEM smoothing*). Conforme essa metodologia, a suavização do MDE é realizada, primeiramente, a partir dos vetores normais para cada célula da grade do MDE, utilizando um esquema de ajuste de superfície de diferenças finitas de 3ª ordem. Em seguida, os vetores normais são suavizados através de um filtro de passa-baixa, levando em consideração a orientação dos vetores normais vizinhos. Por fim, as elevações são iterativamente atualizadas utilizando os vetores normais suavizados, mantendo um limiar de diferença angular entre os vetores normais para assegurar a preservação de características importantes da superfície.

Dessa maneira, o artigo propõe uma abordagem que não apenas minimiza a rugosidade, mas também preserva as quebras de inclinação e mantém a complexidade topográfica em escalas mais amplas.

Outras linhas de pesquisa sobre *laser scanner* analisam quais formatos existentes são mais eficientes para cada aplicação, como Bunting *et al.* (2013), que discorre sobre a utilização do formato HDF5. Paralelo a isso, estudos como o de Vo *et al.* (2019), constroem novas formas de armazenar os arquivos, aplicando protocolos de codificação, otimizando o armazenamento de forma textual para o método binário, visando representar os dados LiDAR de maneira compacta e suportando mutações e a interoperabilidade necessária.

## 2.5 Pernambuco Tridimensional (PE3D)

O projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) teve origem em resposta às enchentes devastadoras que afetaram gravemente os municípios da região da Mata Sul do Estado de Pernambuco entre 2010 e 2011. Para enfrentar essa situação, foram conduzidos trabalhos de mapeamento das áreas afetadas e da calha dos principais rios nas bacias hidrográficas impactadas. Esse mapeamento foi realizado através da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE) e incluiu uma varredura a laser do terreno, permitindo a rápida e precisa coleta de dados altimétricos para a criação de projetos de barragens de controle de enchentes, bem como o desenvolvimento de um sistema de prevenção e alerta de inundações para a bacia do rio Una (Cirilo *et al.*, 2015). As informações e os produtos do projeto podem ser acessados através do site oficial: <https://www.pe3d.pe.gov.br/>.

Os serviços abrangidos por este projeto incluíram o levantamento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de todo o território pernambucano, com coordenação planimétrica e altimétrica, totalizando cerca de 75 bilhões de pontos. Isso significa que, em média, um ponto foi registrado a cada 1,3 metros quadrados em todo o território de Pernambuco.

Os produtos resultantes do projeto foram gerados em dois níveis de precisão. O primeiro nível abrangeu todo o território de Pernambuco e incluiu um levantamento aerofotogramétrico com a geração de ortofotos na escala 1:5.000, perfilamento a laser (com uma precisão altimétrica inferior a 25 centímetros) e a criação de Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e imagens de Intensidade Hipsométrica. O segundo nível abrangeu uma área de 870 quilômetros quadrados distribuídos por 26 municípios e incluiu um levantamento aerofotogramétrico com a geração de ortofotos na escala 1:1.000, perfilamento a laser (com uma precisão altimétrica inferior a 10 centímetros) e a criação de Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e Imagens Hipsométricas. Todos produtos foram referenciados no Sistema de Coordenadas Projetadas UTM SIRGAS 2000, nos fusos 24S e 25S.

O levantamento do Pernambuco Tridimensional passou por três etapas de validação: Análise de Completude, Análise de Consistência e Análise Estatística da Precisão Planialtimétrica. A precisão planimétrica das ortofotos e a precisão altimétrica do perfilamento a laser foram avaliadas por meio de amostragem. As

ortofotos estão em conformidade com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), Classe A, nas escalas 1:5.000 e 1:1.000. A validação dos dados do PE3D foi conduzida pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP).

## 2.6 Python

Python é uma linguagem de programação orientada a objetos que vem ganhando crescente adoção em diversas áreas, tanto no ambiente profissional quanto em pesquisas científicas. Sua popularidade tem se destacado especialmente nos campos de ciência de dados e big data, sendo reconhecida como uma ferramenta poderosa para a criação de aplicativos complexos e análise de dados extensiva (Butwall, Ranka e Shah, 2019). A linguagem destaca-se pela presença de extensas e robustas bibliotecas padrão, as quais desempenham um papel fundamental na análise e visualização de dados. Os cientistas de dados, que frequentemente lidam com volumes massivos de dados, encontram no Python uma escolha eficaz e acessível.

Porém, por ser bastante versátil, ela pode ser utilizada em diversos ramos da ciência, como na área da cartografia.

Um exemplo de utilização da linguagem python na cartografia é a experiência de Stojanović *et al.* (2020) que dentro do tema de generalização cartográfica, produziu um mapa topográfico digital na escala de 1:50.000 a partir de um mapa topográfico digital na escala de 1:25.000.

Bakrač, Mrlješ e Basarić (2022) expõem a automatização do procedimento de elaboração de mapas digitais a partir de mapas topográficos já existentes. Essa transformação envolve a transição da digitalização e georreferenciamento manual desses mapas para um método que se vale de algoritmos, permitindo a identificação e extração automática de pontos de interesse, como poços, em mapas georreferenciados.

## 2.7 Determinação da amostragem para avaliação da qualidade posicional

A determinação do tamanho da amostra é um aspecto de extrema importância no controle de qualidade de produtos cartográficos. Busca-se uma

amostra que seja concisa, mas que ao mesmo tempo represente adequadamente a população em questão. Adicionalmente, quase todas as etapas relacionadas a esse processo estão condicionadas a essa determinação. A avaliação da acurácia de uma carta, por meio de um teste de campo com base em uma amostra de pontos da mesma, é conduzida de maneiras diversas em cada situação. Esse tipo de controle é fortemente influenciado pelas particularidades do processo, como dimensão e situação econômica, entre outros (Nogueira Júnior, Monico e Tachibana, 2003).

No contexto brasileiro, apesar da existência de legislação específica, como o Decreto Lei 89.817/84, não há uma especificação que estipule o número de pontos de referência a ser utilizado na análise (Brasil, 1984).

Levando em consideração esses aspectos e com o intuito de agregar ao tema, Nogueira Júnior, Monico e Tachibana (2003) conduziram uma pesquisa sobre amostragem, fundamentando-se nos trabalhos de Pereira (1979) e Rocha (2002). O objetivo era identificar critérios científicos para determinar a quantidade de pontos a serem amostrados em uma avaliação de um produto cartográfico, com uma análise aprofundada dos aspectos teóricos e práticos relacionados ao tema. O estudo apresenta alguns resultados experimentais obtidos por meio de simulações em cartas na escala 1:2.000, considerando diferentes tamanhos de população, intervalos de confiança e erro máximo permissível (1%, 10% e 33%).

Segundo Pereira (1979), a equação 1 é aplicável se a população de interesse for extremamente grande (N infinito) ou se são seleccionadas amostras com reposição.

$$n = \frac{z^2 \sigma^2}{\varepsilon^2} (1)$$

Sendo:

n= tamanho da amostra

z= variável aleatória normal padrão

$\sigma$ = desvio padrão da distribuição

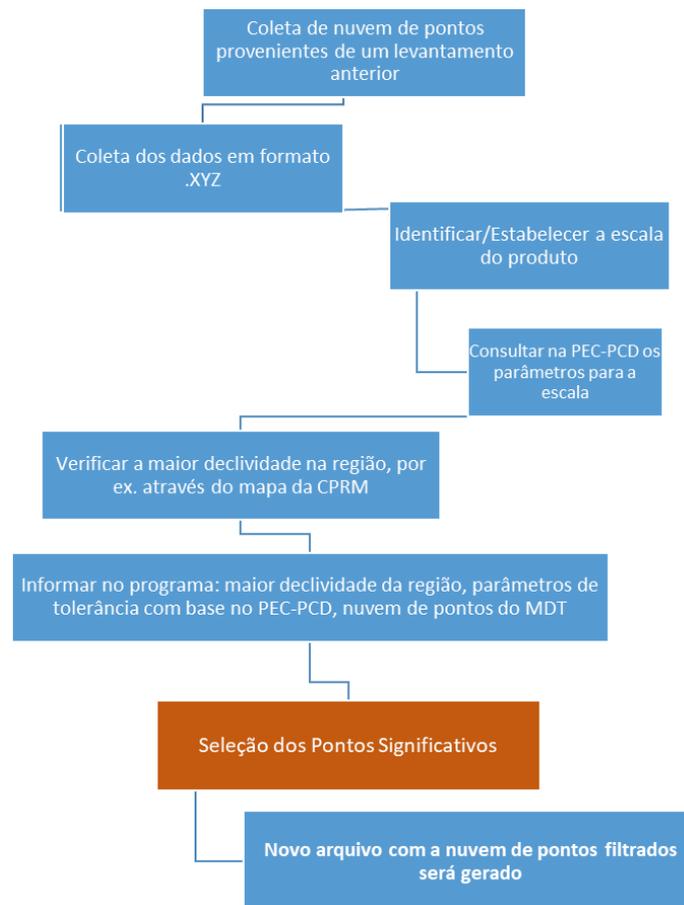
$\varepsilon$ = valor de erro máximo permissível (% do desvio padrão)

### 3 METODOLOGIA

O método proposto visa utilizar uma nuvem de pontos provenientes de um voo embarcado com a tecnologia laserscanner, ou caso já tenha sido realizado o

voo, a nuvem de pontos já processada representando o MDT. Seguente a isso, é necessário identificar a escala do produto, os valores aceitáveis do PEC relacionado a esta esta escala (Tabela 3 e Tabela 4), e qual a maior declividade na área de estudo. Com base nesses dados, o programa realizará a seleção dos pontos significativos e retornará com um novo arquivo de nuvem de pontos, apenas com os pontos selecionados.

Figura 2 — Fluxograma da metodologia



Fonte: Autor (2024).

### 3.1 Área de estudo

Explorando diversas situações em declividades variadas, as áreas de estudo foram selecionadas com base na formação geográfica, visando representar diferentes níveis de declividade para testar o programa em vários cenários.

### 3.1.1 Araripina

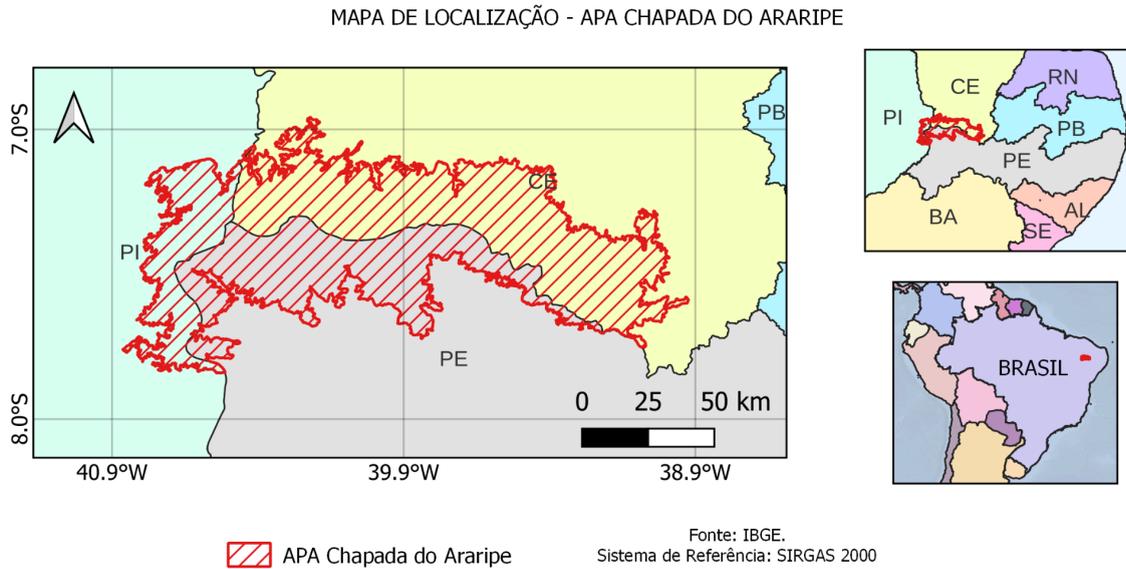
Araripina é um município localizado no estado de Pernambuco, no Nordeste do Brasil, a uma distância de 690 quilômetros da capital, Recife. Situado na tríplice divisa entre Pernambuco, Piauí e Ceará. Com uma população de 88 mil habitantes, é a maior cidade da região do Araripe e se destaca como polo produtor de gesso (IBGE, 2023).

A geomorfologia em Araripina é influenciada por processos erosivos e deposicionais ligados à geologia regional da Bacia do Araripe e ao embasamento pré-cambriano da Província Borborema. O município está situado entre duas unidades geoambientais distintas: a Chapada do Araripe, ao norte, e a depressão sertaneja, ao sul. A Chapada do Araripe é uma feição geomorfológica alongada na direção leste-oeste, com topo plano mergulhante suavemente para o oeste. Essa chapada é formada por sequências pós-rifte e morros testemunhos, que representam relevos residuais de um período em que a área abrangida pela chapada era maior. As formações superficiais incluem escarpa erosiva, encosta e pedimentos (Arruda, 2013).

A Chapada do Araripe possui uma estabilidade predominante em sua dinâmica superficial, caracterizada por material geológico permeável (arenito), latossolos de média ou grande profundidade, maior propensão à infiltração do que ao escoamento, baixa declividade (inferior a 3%) e cobertura vegetal densa (Araújo, 2004).

A APA da Chapada do Araripe, criada em 1997, abrange uma extensa área de 1.063.000 hectares nos estados do Ceará, Pernambuco e Piauí. Com o objetivo principal de preservar fauna, flora e espécies ameaçadas, busca conservar remanescentes de mata, leitos naturais de águas e reservas hídricas. Além disso, protege sítios cênicos, arqueológicos e paleontológicos da Bacia do Araripe. A APA visa ordenar o turismo ecológico, científico e cultural, promovendo manifestações culturais e resgatando a diversidade regional.

Figura 3 — Mapa de Localização APA Chapada do Araripe



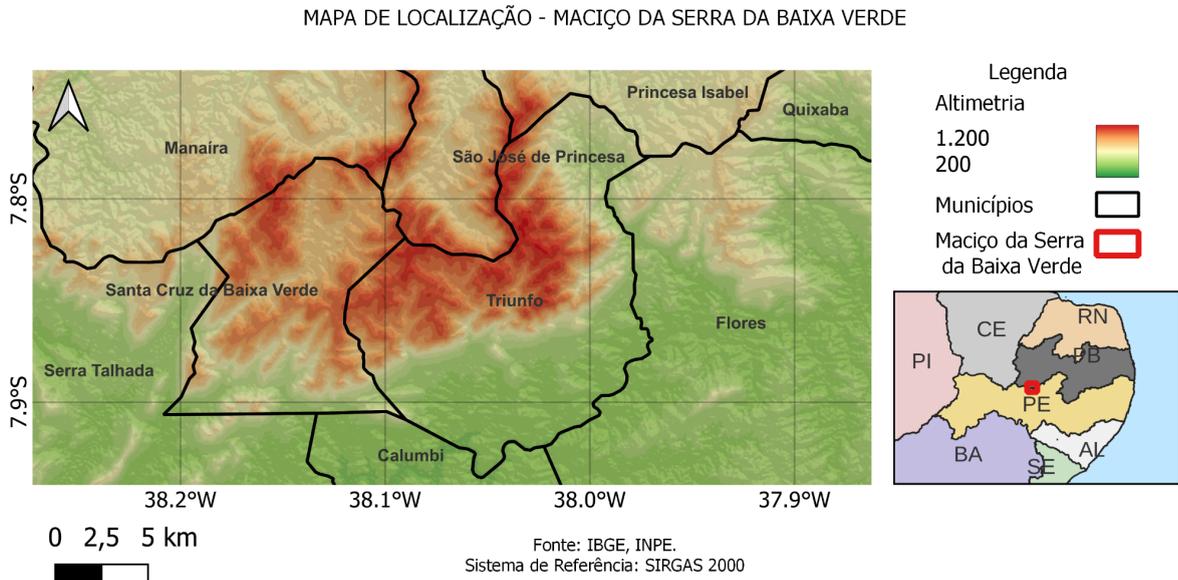
Fonte: Autor (2024).

### 3.1.2 Triunfo

Triunfo é um município pernambucano localizado próximo a Paraíba. Com boa parte de sua geografia compreendida pela Serra da Baixa Verde. A cidade está a 405 quilômetros de Recife e 380 quilômetros de Petrolina, com uma população de 14 mil habitantes (IBGE, 2023). Situada a mais de mil metros acima do nível do mar, Triunfo é a cidade mais alta de Pernambuco, destacando-se por seu clima ameno e chuvoso, em contraste com outras localidades circunvizinhas de clima semiárido. Além disso, Triunfo é um dos principais destinos turísticos em Pernambuco, atraindo visitantes pelo clima, arquitetura, culinária, festivais e geografia.

Localizado no limite Pernambuco-Paraíba e centrada nas encostas e patamares com altitudes superiores a 700 metros, o maciço residual da Serra da Baixa Verde, compreende as cidades de Triunfo e Santa Cruz da Baixa Verde, em Pernambuco, enquanto na Paraíba o maciço compreende os limites municipais de Manaíra, São José de Princesa e Princesa Isabel (Tavares, 2020).

Figura 4 — Mapa altimétrico e de localização do maciço da Serra da Baixa Verde



Fonte: Autor (2024).

O maciço da Serra da Baixa Verde está localizado sobre os terrenos do embasamento cristalino da Província Estrutural Borborema. Essa região está confinada pela zona transversal, também conhecida como "*Median Shear Corridor*", conforme descrito por De Brito Neves, Santos e Van Schmus (2000) e Almeida *et al.* (2000). De acordo com Corrêa (2001), o maciço é composto por corpos sieníticos de tamanhos variados, formando batólitos, stocks e diques, que se encontram tanto em conformidade quanto em discordância com as tendências regionais.

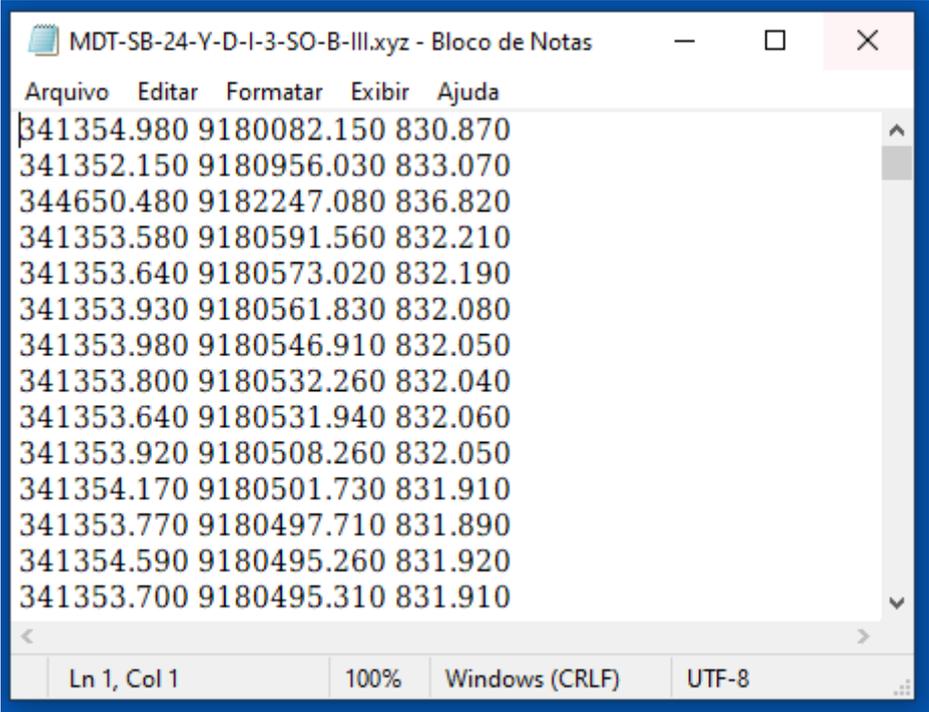
### 3.2 Acesso aos dados e identificação da declividade

As informações do PE3D se encontram no site institucional do Pernambuco Tridimensional. Nele é possível baixar dados raster de MDE, MDT e ortomagem e dados brutos em formato de texto de MDT e MDE, na escala 1:5.000 conforme publicado no site do programa.

É com base nos dados textuais do modelo digital de terreno, no formato XYZ que será desenvolvido o trabalho.

No interior do arquivo é apresentada uma sequência de coordenadas, organizadas em três colunas, que representam os eixos X (Este), Y (Norte) e Z (Altimetria).

Figura 5 — Representação do MDT em formato XYZ.



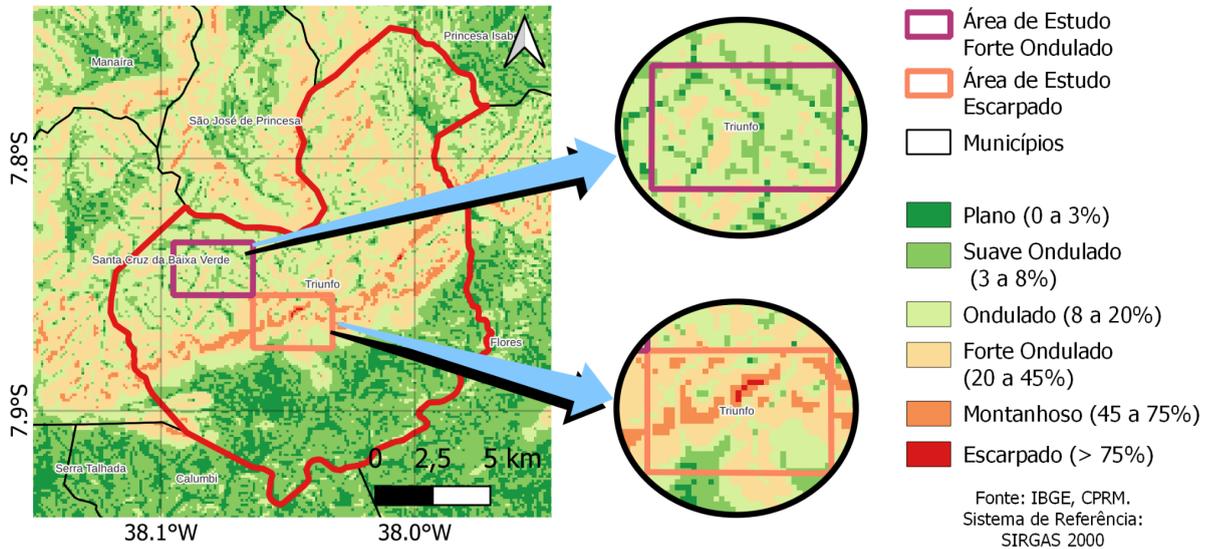
```
MDT-SB-24-Y-D-I-3-SO-B-III.xyz - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
341354.980 9180082.150 830.870
341352.150 9180956.030 833.070
344650.480 9182247.080 836.820
341353.580 9180591.560 832.210
341353.640 9180573.020 832.190
341353.930 9180561.830 832.080
341353.980 9180546.910 832.050
341353.800 9180532.260 832.040
341353.640 9180531.940 832.060
341353.920 9180508.260 832.050
341354.170 9180501.730 831.910
341353.770 9180497.710 831.890
341354.590 9180495.260 831.920
341353.700 9180495.310 831.910
Ln 1, Col 1  100%  Windows (CRLF)  UTF-8
```

Fonte: Autor (2024).

Introduzindo o arquivo em uma plataforma SIG e sobrepondo com o mapeamento da declividade disponibilizado pelo CPRM (2010), é possível identificar qual a maior variação angular no terreno na região. Isso pode ser observado nos mapas de declividade de Triunfo (Figura 6) e Araripina (Figura 7), destacadas as regiões de estudo.

Figura 6 — Mapa de localização e declividade de Triunfo

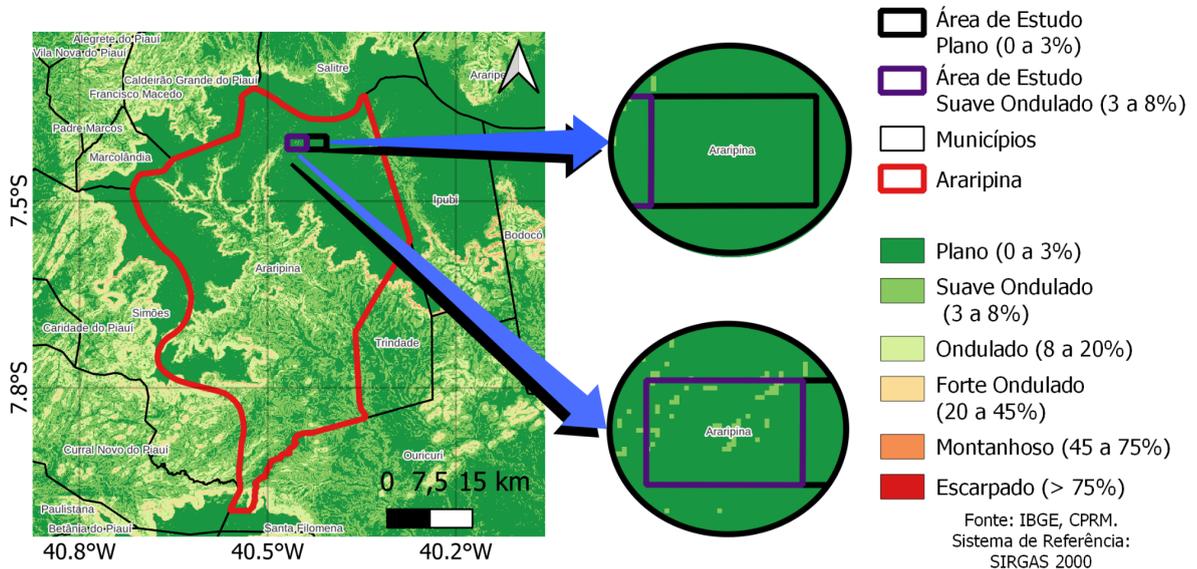
MAPA DE LOCALIZAÇÃO TRIUNFO - ÁREAS DE ESTUDO



Fonte: Autor (2024).

Figura 7 — Mapa de localização e declividade de Araripina

MAPA DE LOCALIZAÇÃO ARARIPINA - ÁREAS DE ESTUDO



Fonte: Autor (2024).

O mapa de declividade, elaborado pelo CPRM, emerge como uma ferramenta de grande potencial para a comunidade geocientífica, oferecendo suporte a estudos nas áreas de geologia, hidrologia, ecologia e geomorfologia em todo o território brasileiro.

Desenvolvido a partir do mosaico de imagens do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), o mapa utiliza essa base de dados e classifica a declividade em categorias específicas: Plano (0 a 3%), Suave Ondulado (3 a 8%), Ondulado (8 a 20%), Forte Ondulado (20 a 45%), Montanhoso (45 a 75%) e Escarpado (> 75%).

### 3.3 Seleção de pontos significativos

A declividade (D) é um fator que tem relação com a variação de altitude (DZ) em um determinado intervalo planimétrico (DX), que pode ser expressado na equação 2.

$$D = (DZ/DX) * 100 \quad (2)$$

DZ = a variação de altimétrica entre 2 pontos

DX = a variação planimétrica entre 2 pontos

D = Declividade

Quando consideramos que a declividade é uma variável conhecida a priori através do mapeamento do CPRM, temos duas variáveis para avaliar, o DZ e o DX. Ora, se temos um valor da PEC-PCD para a altimetria (Tabela 3), isto é, um valor aceitável máximo para a variação em Z, ou seja o DZp, podemos obter um DX, isto é, um intervalo planimétrico mínimo utilizando o mesmo fato de declividade e DZ (Equação 3).

$$DX = (DZp/Dp) * 100 \quad (3)$$

DX = a variação planimétrica

DZp = a variação altimétrica a priori

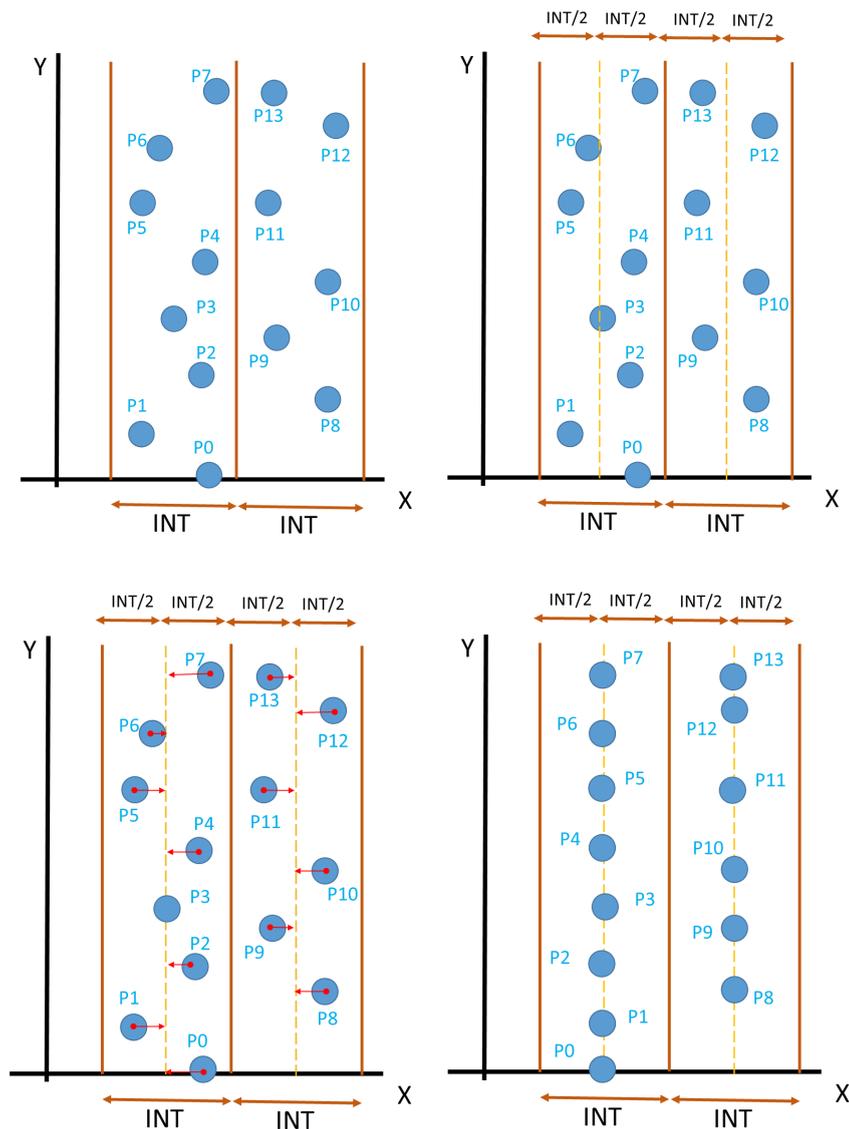
Dp = Declividade a priori

Onde o DZp será considerado como Intervalo de Tolerância ou Tolerância altimétrica (TOL), fornecendo a precisão altimétrica buscada no algoritmo de processamento de reamostragem, e a Dp será considerada como Parâmetro de Declividade (PD), fornecendo os insumos necessários para o cálculo do intervalo das faixas (INT), obtendo assim a equação 4.

$$\text{INT}=(\text{TOL}/\text{PD})\cdot 100 \quad (4)$$

A primeira etapa no processo de seleção de pontos significativos, é a criação de faixas de análise para construção de perfis. Dentro das faixas com o determinado intervalo (INT), os pontos serão considerados como sobre um mesmo alinhamento (Figura 8).

Figura 8 — Construção das faixas de análise com distanciamento INT.

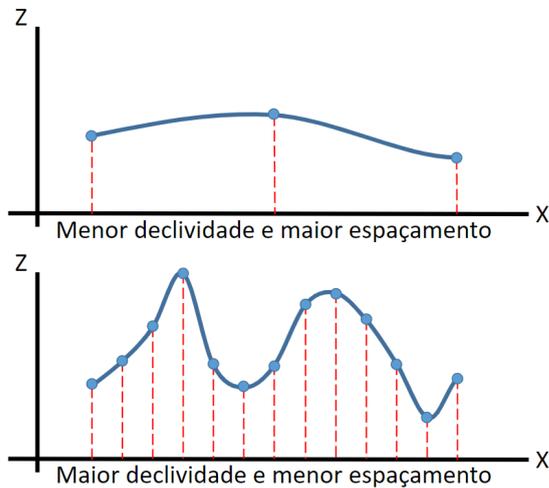


Fonte: Autor (2024).

Importante ressaltar, que quanto maior a declividade, menor será o intervalo entre as faixas, maior será o nível de detalhes do terreno, e menor será a capacidade de filtragem. O mesmo vale para declividades menores, que refletem um

intervalo maior, e por consequência, uma maior capacidade do programa de filtrar os pontos significativos (Figura 9).

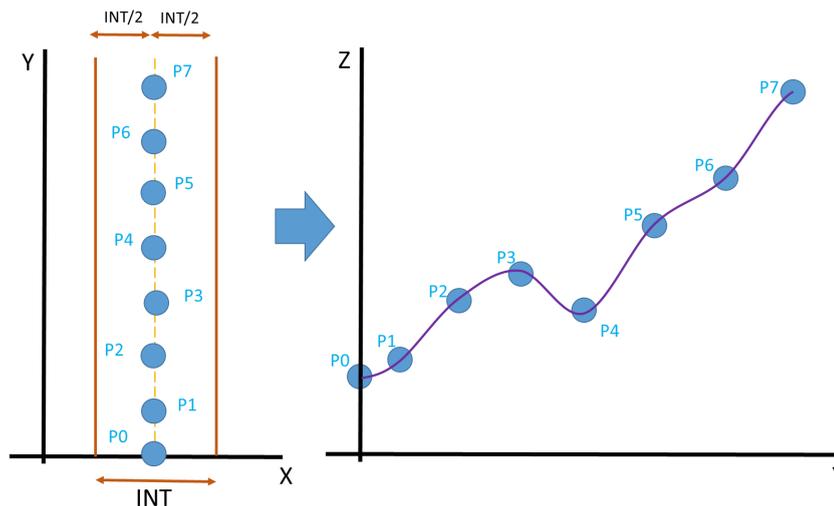
Figura 9 — Exemplo do espaçamento em função da declividade



Fonte: Autor (2024).

Dentro de cada intervalo, ou faixa, que será interpretado como um perfil, teremos uma distribuição de pontos, que representará o terreno com um grande nível de detalhamento (Figura 10).

Figura 10 — Exemplo do perfil gerado a partir de uma faixa de pontos



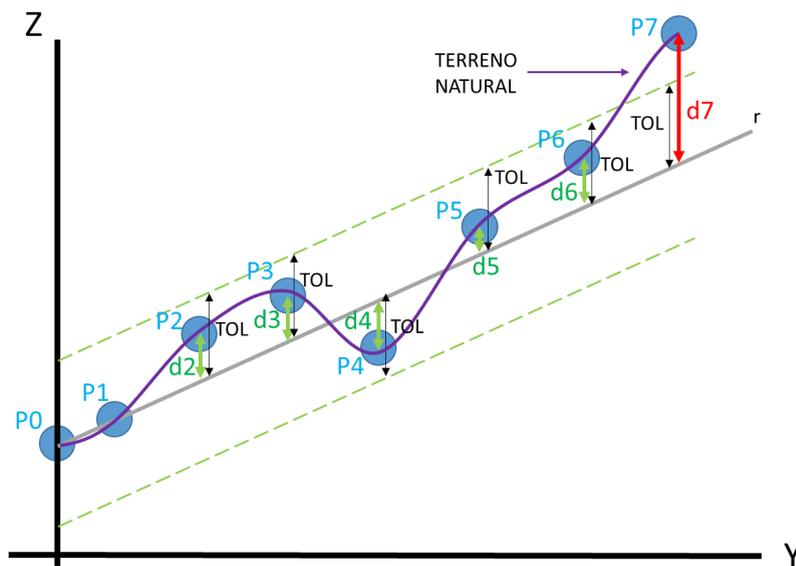
Fonte: Autor (2024).

Considerando sempre os dois pontos iniciais (P0 e P1), será estabelecido uma reta  $r$ . Para os pontos subsequentes (P2, P3,..., Pn), será realizado uma

comparação entre o valor absoluto de  $Z(Y)$  menos o valor de  $Z$  do ponto ( $|Z(Y)-Z(P_n)|$ ), identificado na Figura 11 como a discrepância ( $d$ ). Essa discrepância deverá ser menor que o valor de aceitação, ou tolerância (TOL), proveniente da tabela do PEC-PCD.

Esse procedimento gera duas linhas imaginárias, paralelas a linha  $r$ , que delimitam a tolerância de maneira gráfica.

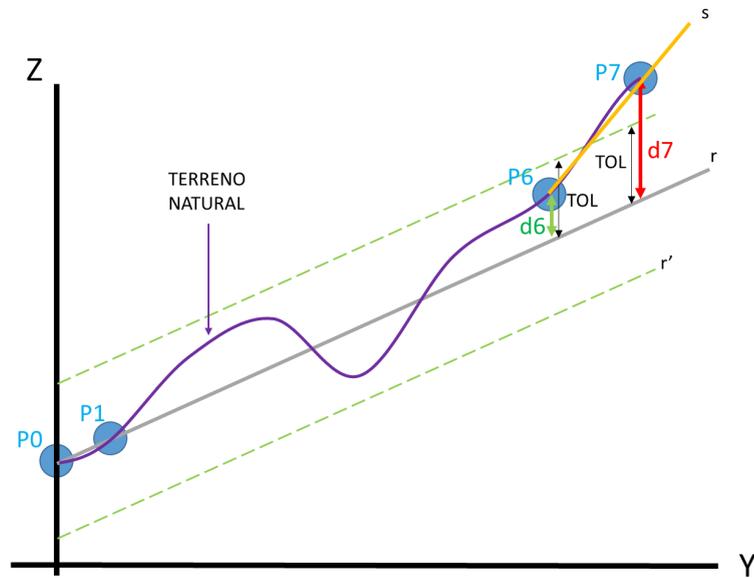
Figura 11 — Funcionamento da classificação de pontos significativos através do programa



Fonte: Autor (2024).

Quando ocorre da tolerância ser menor que o fator de discrepância ( $TOL < d$ ) em um ponto  $P_n$ , o programa irá utilizar o ponto anterior,  $P_{n-1}$ , para gerar uma nova reta (reta  $s$ ), eliminando os pontos de  $P_2$  até  $P_{n-2}$  (Figura 12).

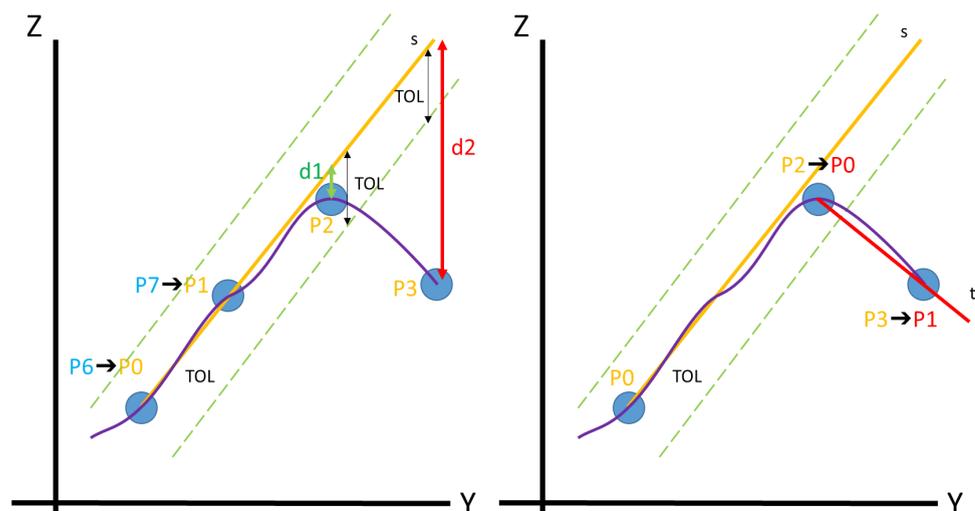
Figura 12 — Representação gráfica do funcionamento da seleção de pontos significativos



Fonte: Autor (2024).

A partir desse momento o ponto  $P_n$  assumirá a função do ponto  $P_1$  e o ponto  $P_{n-1}$  assumirá a função do ponto  $P_0$  (Figura 13), esse processo se dará até que se caminhe por todo o perfil, eliminando os pontos considerados excessivos e armazenando os pontos significativos.

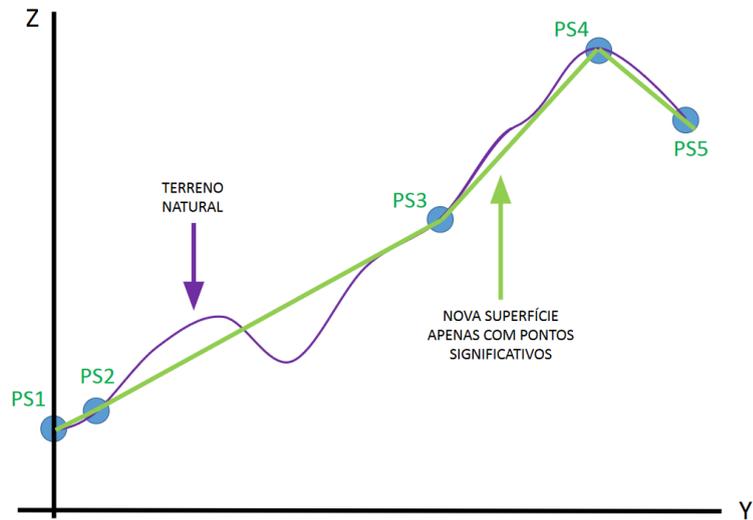
Figura 13 — Etapa posterior na seleção de pontos significativos



Fonte: Autor (2024).

Tomando os pontos significativos do exemplo, seria possível determinar uma superfície com os pontos significativos (Figura 14).

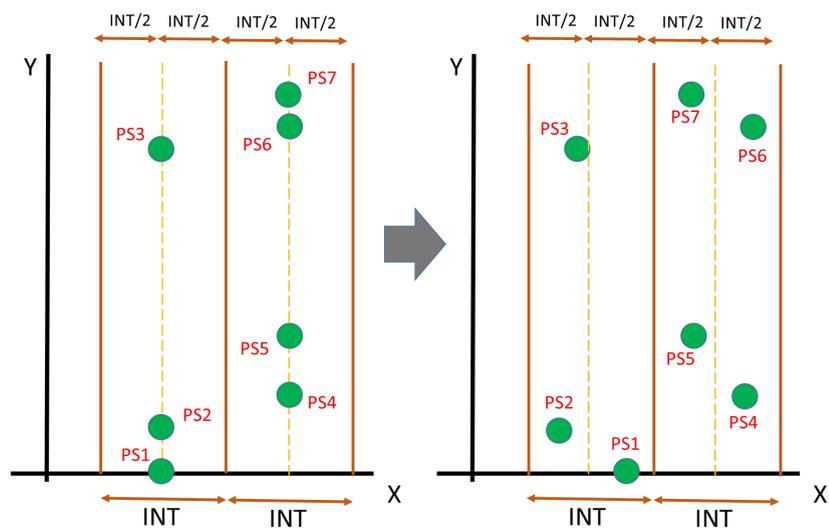
Figura 14 — Comparação da superfície natural e a superfície gerada com pontos significativos



Fonte: Autor (2024).

Apesar da utilização dos pontos em um único perfil, isto é, os valores distribuídos em intervalos exatos no eixo X, o valor dos pontos significativo que o programa armazena preserva as coordenadas X, Y e Z originais (Figura 15).

Figura 15 — Pontos filtrados e Pontos armazenados



Fonte: Autor (2024).

## 4 RESULTADOS

Como estabelecido anteriormente, pela característica topográfica, foram escolhidas regiões nas cidades de Araripina e Triunfo, de forma que pudesse ser analisado o programa em diversos tipos de classificação de declividade. Executando o algoritmo conforme metodologia, foi possível obter os resultados da redução do tamanho (Tabela 5) e da redução do número de pontos (Tabela 6).

Tabela 5 — Resultado da redução do tamanho do arquivo de pontos via processamento

Município	Folha	Declividade	Tamanho Original	Tamanho Processado	% da taxa de Redução
Araripina	MDT-SB-24-Y-D-I-3-SO-B-III	3%	68,9 Mb	0,57 Mb	99,7%
Araripina	MDT-SB-24-Y-D-I-3-SO-A-IV	8%	89,1 Mb	1,60 Mb	98,2%
Triunfo	MDT-SB-24-Z-C-V-4-NE-E-I	45%	41,0 Mb	9,48 Mb	72,8%
Triunfo	MDT-SB-24-Z-C-V-4-NE-E-IV	100%	29,1 Mb	15,7 Mb	46,1%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 6 — Resultado da redução do número de pontos via processamento

Município	Folha	Declividade	Número de pontos Original	Número de pontos Processado	% da Redução
Araripina	MDT-SB-24-Y-D-I-3-SO-B-II I	3%	2.260.450	19.605	99,1%
Araripina	MDT-SB-24-Y-D-I-3-SO-A-I V	8%	2.919.880	56.720	98,0%
Triunfo	MDT-SB-24-Z-C-V-4-NE-E-I	45%	1.316.341	297.935	77,3%
Triunfo	MDT-SB-24-Z-C-V-4-NE-E-I V	100%	954.893	503.605	47,2%

Fonte: Autor (2024).

Para a verificação da qualidade do produto gerado, foi utilizado a equação (1) para determinar a quantidade de pontos necessários para verificação, sendo estes pontos selecionados aleatoriamente da amostra inicial.

$$n = \frac{1,65^2 * 0,34^2}{(5\% * 0,34)^2} = 1089$$

Sendo:

n= tamanho da amostra

1,65 = Z, variável aleatória normal padrão para 95%

0,34 = erro padrão, para escala de 1:5.000, classe A, de acordo com o PEC-PCD

(5%\*0,34) = erro máximo permissível (  $\epsilon$  ) igual a 5% do erro padrão.

Utilizando o modelo de interpolação de Rede Irregular Triangular (TIN) linear do QGIS, foram produzidos MDT em formato de grade para 4 cenários, com declividades diferentes. Sobre cada uma dessas grades foram lançados os 1089 pontos aleatórios e calculadas as diferenças (erros) entre cada um deles e seus homólogos nas redes.

Em seguida foi verificado se esses erros contém componente sistemática ou não. Tal componente se caracteriza por apresentar média diferente de zero. Para essa verificação calcula-se o erro padrão da média das diferenças (erros) e respectivo intervalo de confiança com 95% de confiabilidade, conforme mostrado na Tabela 7. Considerando a hipótese do intervalo conter o zero, pode-se admitir este valor como média, caracterizando ausência de erro sistemático.

Tabela 7 — Resultado da verificação de erros

Declividade	Média ( $\mu$ )	Desvio padrão ( $\sigma$ )	EP	IC da média (95%)	lim inf — lim sup
Plano (3%)	-0,0104	0,0889	0,0027	0,0053	-0,0157 — -0,0051
Suave Ondulado (8%)	0,0008	0,0754	0,0023	0,0045	-0,0037 — 0,0053
Forte Ondulado (45%)	-0,0064	0,1107	0,0034	0,0066	-0,013 — 0,0002
Escarpado (100%)	-0,0052	0,1702	0,0052	0,0102	-0,0154 — 0,005

Fonte: Autor (2024).

Da Tabela 7, levando em consideração o rigor estatístico, observa-se que o intervalo de confiança definido pelo “lim inf — lim sup” da declividade “Plano” não contém o zero, identificando erro sistemático na amostra. Do ponto de vista prático, observa-se para essa declividade que o “lim sup” de -0,0051 é tão próximo do zero que pode ser considerado como tal. Assim sendo, pode-se considerar que erros sistemáticos inexistem nos 4 tipos de declividade e somente a componente aleatória, que corresponde ao desvio padrão ( $\sigma$ ), é identificada. Esse é exatamente o parâmetro EP que deverá ser enquadrado no PEC. Com isso o PEC para cada um dos tipos de relevo fica identificado na Tabela 8.

Tabela 8 — Padrão de Exatidão Cartográfica pelo método proposto

Declividade	Desvio padrão ( $\sigma$ ) (EP)	PEC (1,64*EP)
Plano (3%)	0,0889	0,1459
Suave Ondulado (8%)	0,0754	0,1237
Forte Ondulado (45%)	0,1107	0,1815
Escarpado (100%)	0,1702	0,2791

Fonte: Autor (2024).

Conforme evidenciado na Tabela 8, verifica-se que as superfícies caracterizadas por declividades inferiores ("Plano" e "Suave Ondulado"), exibiram valores de PEC menores. Isto ocorreu mesmo considerando que foram utilizados intervalos mais espaçados e obtido uma decimação mais eficaz.

À medida que a análise se desloca para regiões de declividades mais acentuadas (“Forte Ondulado” e “Escarpado”), nota-se o aumento da PEC e uma menor capacidade de redução dos pontos via metodologia proposta. Este fenômeno ocorre porque onde existem maiores declividades, mais detalhes são necessários para defini-las, mesmo considerando que os intervalos para classificação são menores.

Observando os resultados da Tabela 8, é possível notar que o método atendeu equidistância de curva de nível compatível com 1:1000 conforme Tabela 3.

## 5 CONCLUSÃO

A metodologia proposta revelou-se eficaz, alcançando com sucesso o objetivo de reduzir em até 99% a densidade da nuvem de pontos. A análise dos diferentes cenários evidenciou que a taxa de sucesso da metodologia é inversamente proporcional à declividade, destacando-se que em terrenos com menor inclinação, obteve-se maior eficiência. Por outro lado, constatou-se que a elevação da declividade resulta em uma diminuição no nível de filtragem dos pontos significativos, o que se explica pela dificuldade em representar detalhes complexos de maneira simplificada.

Na análise estatística dos resultados (Tabela 7), foi possível averiguar que as condições para inexistência de erros sistemáticos foram atendidas. De forma que o Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) e o Erro Padrão (EP) (Tabela 8), foram calculados e se mostraram menores que os valores sugeridos pela norma. Em relação aos modelos gerados pelo método, se comprovaram eficientes e similares.

Além disso, ressalta-se a simplicidade do método, que demandou baixo poder computacional, proporcionando um significativo aumento na eficiência da manipulação de dados e na produção de modelos digitais de terreno.

O potencial uso da metodologia da seleção de pontos significativos pode difundir e facilitar o uso dos produtos do PE3D e de outros projetos futuros, além de ser possível aplicar em outras nuvem de pontos para geração de modelos digitais de terreno.

Como sugestões para futuras pesquisas, sugere-se a aplicação do mesmo conceito de seleção de pontos significativos com parâmetros arbitrários, visando otimizar ainda mais o armazenamento de dados. Outra possibilidade seria explorar o uso de machine learning ou processos iterativos e de otimização, mantendo o mesmo conceito de seleção de pontos, para aprimorar ainda mais o desempenho do método em diferentes contextos e cenários. Essas perspectivas abrem caminho para a continuidade do desenvolvimento e refinamento da abordagem proposta, contribuindo para avanços significativos na área de processamento de dados geoespaciais.

## REFERÊNCIAS

ALEX, Martínez-Agirre; VÍCTOR, García-Morales; JESÚS, Álvarez-Mozos. Comparison of Digital Terrain Models Obtained with LiDAR and Photogrammetry. Em: **Advances in Design Engineering: Proceedings of the XXIX International Congress INGEGRAF, 20-21 June 2019, Logroño, Spain**. Springer International Publishing, 2020. p. 576-585. DOI [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5_63)

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques; BRITO NEVES, Benjamim Bley; CARNEIRO, Celso Dal Re. The origin and evolution of the South American Platform. **Earth-Science Reviews**, v. 50, n. 1-2, p. 77-111, 2000. DOI [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00072-0)

ALMEIDA, José Antonio Pacheco; DE OLIVEIRA, Paulo José. **Sensoriamento Remoto I**. 2010.

ANDRADE E SILVA, Daniel Luis.; DOS SANTOS, Daniel Rodrigues. Um Estudo de Caso sobre o Emprego da Técnica de Voxelização como Método para Generalização 3D de Arborização Urbana em Dados LiDAR Aerotransportado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 1, p. 50–66, 2022. DOI: <http://doi.org/10.14393/rbcv74n1-61577>

ARAÚJO, Sergio Murilo Santos., 2004. **O Pólo Gesseiro do Araripe: unidades geo-ambientais e impactos da mineração**. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.: [s.n.], 2004 DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2004.327594>

ARRUDA, Karlla Emmanuelle Cunha. **Geodiversidade do município de Araripina–PE, Nordeste do Brasil**. 2013. Dissertação de Mestrado.

BAKRAČ, Saša et al. Point Object Extraction from Scanned Topographic Maps for the Digital Topographic Maps Production. **Sinteza 2022-International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research**. Singidunum University, 2022. p. 49-57. DOI: <https://doi.org/10.15308/Sinteza-2022-49-57>

BALTSAVIAS, Emmanuel. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 199-214, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00015-5)

BILJECKI, Filip; LEDOUX, Hugo; STOTER, Jantien; VOSSELMAN, George. The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 116, p. 42–54, 2016. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.003>

BORGES, Jorge Luis. Del rigor en la ciencia. **El hacedor**, v. 45, 1960.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**, 2º edição, versão 1.1. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. 2016.

BRASIL. Decreto-lei nº 89.817, de 20 de junho de 1984. **Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Diário Oficial da União, Brasília, Brasil. 1984.

BRITO NEVES, Benjamim Bley; SANTOS, EJ dos; VAN SCHMUS, Williams Randall. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. **Tectonic Evolution of South America**, v. 1, p. 151-182, 2000.

BUNTING, Peter; ARMSTON, John; LUCAS, Richard M.; CLEWLEY, Daniel. Sorted pulse data (SPD) library. Part I: A generic file format for LiDAR data from pulsed laser systems in terrestrial environments. **Computers & Geosciences**, v. 56, p. 197-206, 2013.

BUTWALL, Mani; RANKA, Pragma; SHAH, Suchi. Python in Field of Data Science: A Review. **International Journal of Computer Applications**. v. 178, n. 49, p. 20-24, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2019919404>.

CAO, Van-Hung; CHU, Khoi-Xuan; Le-Khac, Nhien-An; Kechadi, Tahar; Laefer, Debra; Truong-Hong, Linh. Toward a new approach for massive LiDAR data processing. Em **2015 2nd IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services (ICSDM)**. IEEE, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSDM.2015.7298040>

CENTENO, Jorge Antonio Silva; MITISHITA, Edson Aparecido. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 4, p. 3645-3652, 2007.

CIRILO, José Almir; ALVES, Fellipe Henrique Borba; SILVA, Bruno de Melo; CAMPOS, Pedro Henrique de Andrade Lima. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. **12th Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa**, 2015.

CORRÊA, Antonio Carlos de Barros. **Dinâmica geomorfológica dos compartimentos elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil**. Rio Claro, 386p. Tese de Doutorado IGCE, UNESP. 2001.

COMÉ, Sérgio; SLUTER, Cláudia Robbi. Uma proposição para detecção das condições geométricas em cartas topográficas de regiões urbanas na escala 1:10.000 derivadas de 1:2.000. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 6, p. 1091–1102, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv67n6-44630>

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa de Declividade em Percentual do Relevo Brasileiro**, 2010. Disponível em

<https://www.sgb.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Gestao-Territorial/Mapa-de-Declividade-em-Percentual-do-Relevo-Brasileiro-3497.html> . Acesso em: 23 de nov. 2023.

CROMBAGHS, Marc; BRÜGELMANN, Regine; DE MIN, Erik J. On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, n. B3/1, p. 230-237, 2000.

DALMOLIN, Quintino. **Sistema laserscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. UFPR. Curitiba/PR – Brasil. 2004.

FILIN, Sagi; AKEL, Nizar Abo; KREMEIKE, Katrin; SESTER, Monika; DOYTSHER, Yerach. Interpretation and generalization of 3d landscapes from lidar data.

**Cartography and Geographic Information Science**, v. 34, n. 3, p. 231-243, 2007. DOI. 10.1559/152304007781697857

FIRKOWSKI, Henrique. **Generalização cartográfica de grades retangulares regulares baseada na Teoria Matemática da Comunicação**. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

FORBERG, Andrea. Generalization of 3D building data based on a scale-space approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 62, n. 2, p. 104-111, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.01.002>

FREIMAN, Fabiano Peixoto; DOS SANTOS, Daniel Rodrigues. Generalização Cartográfica: Desafios e Perspectivas. **Rev. Bras. Cartogr**, v. 74, n. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv74n3-65431>

FRUCHART, Catherine. **Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours**. 2014. Tese de Doutorado. Université de Franche-Comté.

GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **PE3D. Pernambuco Tridimensional**. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: 11 set. 2023.

GRAÇA, Alan José Salomão; FIORI, Sérgio Ricardo. Proposal for a Tourist Web Map of the South area of Rio: Cartographic Communication and the Act of Representing the Landscape in Different scales and Levels of Abstraction. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 5, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv67n5-44629>

GRUPPI, Maurício Gouvêa; MAGALHÃES, Salles Viana Gomes de; ANDRADE, Marcus Vinícius Alvim; FRANKLIN, W. Randolph; LI, Wenli. Using rational numbers

and parallel computing to efficiently avoid round-off error in map simplification. **Revista Brasileira de Cartografia – Special Issue GEOINFO**, v. 68, n. 6, p. 1221-1230, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv68n6-44497>

HENGL, Tomislav. Finding the right pixel size. **Computers & geosciences**, v. 32, n. 9, p. 1283-1298, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Portal Cidades@**, em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: dezembro de 2023.

JENNY, Bernhard. Terrain generalization with line integral convolution. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 48, n. 1, p. 78-92, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/15230406.2020.1833762>

JONES, Christopher; WARE, J. Mark. Map generalization in the Web age. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 19, n. 8, p. 859–870, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658810500161104>

LINDSAY, John; FRANCONI, Anthony; COCKBURN, Jaclyn. LiDAR DEM smoothing and the preservation of drainage features. **Remote Sensing**, v. 11, n. 16, p. 1926, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11161926>

LEAL, Esmeide; TORRES, German Sanchez-; BEDOYA, John Branch-; ABAD, Francisco; LEAL, Nallig. A saliency-based sparse representation method for point cloud simplification. **Sensors**, v. 21, n. 13, p. 4279, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134279>

LI, Minglei; SUN, Changming. Refinement of LiDAR point clouds using a super voxel based approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 143, p. 213-221, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.010>

McMASTER, Robert Brainerd; SHEA, K. Stuart. **Generalization in Digital Cartography**. 1º ed. Association American Geography, Washington, 1992.

MÜLLER, Jean-Claude; LAGRANGE, Jean-Philippe; WEIBEL, Robert. Generalization-state of the art and issues. **GIS and Generalisation: Methodology and Practice**, p. 3-17, 1995.

NEUMAN, Gisele; DA SILVEIRA, Claudinei Tabora; SAMPAIO, Tony Vinicius Moreira. Análise da influência da escala na obtenção dos atributos topográficos derivados de MDE. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 43, p. 179-199, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v43i0.56278>

NOGUEIRA JÚNIOR, João Bosco; MONICO, João Francisco Galera; TACHIBANA,

Vilma Mayumi. Tamanho da amostra no controle de qualidade posicional de dados cartográficos. **Bulletin of Geodetic Sciences**, v. 10, n. 1, 2004.

PAES, Ângela Tavares. Itens essenciais em bioestatística. **Arquivos brasileiros de cardiologia**, v. 71, p. 575-580, 1998.

PEREIRA, Rivadavia. **A Estatística e Suas Aplicações**, Porto Alegre: Ed. Grafosul, 1979.

PETERS, James F. **Foundations of computer vision: computational geometry, visual image structures and object shape detection**. Springer, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52483-2>

PETRAS, Vaclav; PETRASOVA, Anna; McCARTER, James B.; MITASOVA, Helena; MEENTEMEYER, Ross K.. Point Density Variations in Airborne Lidar Point Clouds. **Sensors**, v. 23, n. 3, p. 1593, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23031593>

REGINATO, Vivian; SCHMITT, João; ZORZI, Ana de; PREVE, Fernanda; SORATO, Augusto; SÁ, Francisco; BOZIO, André. Cadastro territorial multifinalitário e suas facetas: o estado da arte no terceiro milênio. **Concilium**, v. 22, n. 6, p. 900-912, 2022. DOI: <https://doi.org/10.53660/CLM-611-677>

ROCCA, Luigi; JENNY, Bernhard; PUPPO, Enrico. A continuous scale-space method for the automated placement of spot heights on maps. **Computers & Geosciences**, v. 109, p. 216-227, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.09.003>

ROCHA, Ronaldo Dos Santos da. **Exatidão Cartográfica Para as Cartas Digitais Urbanas**. 2002. Tese (Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SANTOS, Ricardo dos. **Planejamento ambiental e ordenamento territorial: subsídios à gestão ambiental do município de Presidente Epitácio, estado de São Paulo**. Tese (Doutorado – Programa de Pós-graduação em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, São Paulo. 2020.

SESTER, Monika. Cartographic generalization. **Journal of Spatial Information Science**, n. 21, p. 5-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2020.21.716>

SCHIEWE, Jochen. The need for disciplinarity, interdisciplinarity and scientific societies-the cartographic perspective. **Geo-spatial Information Science**, v. 24, n. 1, p. 160-166, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1863748>

STOJANOVIĆ, Marko; DROBNJAK, Siniša; JOVANOVIĆ, Jasmina M.; GALJAK, Nenad; VUČIĆEVIĆ, Ana. Analysis of Cartographic Generalization based on

PYTHON Programming Language on Digital Topographic Maps. **GISTAM 2020-Proceedings of the 6th International Conference on Geographical Information Systems**. SciTePress, 2020. p. 191-198. DOI: <https://doi.org/10.5220/0009396501910198>

STOTER, Jantien; POST, Marc; ALTENA, Vincent van; NIJHUIS, Ron; BRUNS, Ben. Fully automated generalization of a 1: 50k map from 1: 10k data. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 41, n. 1, p. 1-13, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/15230406.2013.824637>

TANG, Lei; YING, Shen; LI, Lin; BILJECKI, Filip; ZHU, Haihong; ZHU, Yi; YANG, Fan; SU, Fei. An application-driven LOD modeling paradigm for 3D building models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 161, p. 194-207, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.01.019>

TAURA, Tatiana Ayako; SLUTER, Claudia Robbi; FIRKOWSKI, Henrique. Generalização cartográfica das cartas do mapeamento urbano nas escalas 1: 2.000, 1: 5.000 e 1: 10.000. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 16, p. 386-402, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702010000300002>

TAVARES, Kaio César de Oliveira. **Relações quimioestratigráficas entre os sedimentos quaternários do maciço Serra da Baixa Verde e seu significado geomorfológico**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

VO, Anh Vu; HEWAGE, Chamin Nalinda Lokugam; RUSSO, Gianmarco; CHAUHAN, Neel; LAEFER, Debra F.; BERTOLOTTI, Michela; LE-KHAC, Nhien-An; OFTENDINGER, Ulrich. Efficient LiDAR point cloud data encoding for scalable data management within the Hadoop eco-system. **2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)**. IEEE, 2019. p. 5644-5653. DOI: <https://doi.org/10.1109/BigData47090.2019.9006044>

## APÊNDICE A – CÓDIGO DO PROGRAMA

```
import math

scale = 5000

tolerancia = 0.54

declividade = 8

interval = (tolerancia/declividade)*100

#ENTRAR COM O ARQUIVO EM FORMATO .XYZ

with open("2_MDT-SC-24-X-A-II-3-NO-F-IV.xyz", "r") as file:

    points = []

    lowest_x_value = float('inf')

    lowest_y_value = float('inf')

    biggest_x_value = 0

    biggest_y_value = 0

    output_points = []

    file_corners = [(), (), (), ()]

    for line in file:        sx, sy, sz = line.split()

        x, y, z = float(sx), float(sy), float(sz)

        if (x < lowest_x_value):

            lowest_x_value = x

            file_corners[0] = (x, y, z)

        if (y < lowest_y_value):

            lowest_y_value = y

            file_corners[1] = (x, y, z)
```

```
    if (x > biggest_x_value):
        biggest_x_value = x
        file_corners[2] = (x, y, z)

    if (y > biggest_y_value):
        biggest_y_value = y
        file_corners[3] = (x, y, z)

    points.append((x, y, z))

# xmaior, ymaior(canto superior direito)
# xmenor, ymaior(canto superior esquerdo)
# xmaior, ymenor(canto inferior direito)
# xmenor, ymenor(canto inferior esquerdo)

    corners = [(biggest_x_value, biggest_y_value), (lowest_x_value,
biggest_y_value),
                (biggest_x_value, lowest_y_value), (lowest_x_value,
lowest_y_value)]

    total_x = biggest_x_value - lowest_x_value
    total_y = biggest_y_value - lowest_y_value

    new_total_x = int(math.ceil(total_x / interval))
    new_total_y = int(math.ceil(total_y / interval))

    mapa_fatiado_na_vertical = []

    for meridiano in range(0, new_total_x):
```

```
mapa_fatiado_na_vertical.append([])

for point in points:
    x, y, z = point
    meridiano = int((x - lowest_x_value) / interval)
    mapa_fatiado_na_vertical[meridiano].append(point)

# Equacao da reta
# z = coeficiente_angular*y + coeficiente_linear

for meridiano in range(0, new_total_x):
    output_points.append(mapa_fatiado_na_vertical[meridiano][0])
    coeficiente_linear = 0
    coeficiente_angular = 0
    prev_point = mapa_fatiado_na_vertical[meridiano][0]
    for point in mapa_fatiado_na_vertical[meridiano][1:]:
        x, y, z = point
        left_border = lowest_x_value + (interval * meridiano)
        novo_x = left_border + (interval / 2)

        z_projetado = coeficiente_angular*y + coeficiente_linear

        # É um ponto útil
        if(abs(z - z_projetado) > tolerancia):
            prev_x, prev_y, prev_z = prev_point
            if(y-prev_y == 0):
                coeficiente_angular = 0
                coeficiente_linear = z
            else:
```

```
        coeficiente_angular = (z - prev_z)/(y - prev_y)
        coeficiente_linear = z - coeficiente_angular*y

        output_points.append((x, y, z))

    prev_point = point

    with open("decli_2_esc_5000_int_270_tol_054.xyz", "w") as
output_file:
        for point in output_points:
            x, y, z = point
            output_file.write(str(x) + " " + str(y) +
                               " " + str(z) + "\n")

print(points[0], len(points))
```