

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E**  
**TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

**JOÃO ALBERTO BATISTA DE CARVALHO**

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA DE MODELOS DIGITAIS DE**  
**ELEVAÇÃO NO BRASIL: UM ESTUDO SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS**  
**ALTIMÉTRICOS E A INFLUÊNCIA DE VALORES *OUTLIERS* PARA O PROCESSO**  
**DE ANÁLISE**

**RECIFE**

**2017**

**JOÃO ALBERTO BATISTA DE CARVALHO**

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA DE MODELOS DIGITAIS DE  
ELEVAÇÃO NO BRASIL: UM ESTUDO SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS  
ALTIMÉTRICOS E A INFLUÊNCIA DE VALORES *OUTLIERS* PARA O PROCESSO  
DE ANÁLISE**

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

Área: de Concentração: Sistemas de Informações Geográficas

Orientador: Prof. Dr. Daniel Carneiro da Silva

**RECIFE**

**2017**

- C331a Carvalho, João Alberto Batista de.  
Avaliação da acurácia altimétrica de modelos digitais de elevação no Brasil: um estudo sobre a distribuição dos erros altimétricos e a influência de valores outliers para o processo de análise / João Alberto Batista de Carvalho - 2016.  
93 folhas, Il. e Tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Daniel Carneiro da Silva.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2016.  
Inclui Referências e Anexos.
1. Ciências Geodésicas. 2. Qualidade. 3. Modelos Digitais de Elevação. 4. Acurácia. 5. Altimetria. I. Silva, Daniel Carneiro da (Orientador). II. Título.

UFPE

526.1CDD (22. ed.)

BCTG/2017 - 95

**JOÃO ALBERTO BATISTA DE CARVALHO**

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA DE MODELOS DIGITAIS DE  
ELEVAÇÃO: UM ESTUDO SOBRE INFLUÊNCIA DE VALORES *OUTLIERS* PARA  
O PROCESSO DE ANÁLISE**

**Aprovado em: 12 / 12 / 2016.**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Profº Dr. Daniel Carneiro da Silva (Orientador)**

**Universidade Federal de Pernambuco**

---

**Profº Dr. José Luiz Portugal (Examinador Interno)**

**Universidade Federal de Pernambuco**

---

**Profº Dr. João Rodrigues Tavares Junior (Examinador Interno)**

**Universidade Federal de Pernambuco**

---

**Profº Dr. Raydonal Ospina Martínez (Examinador Externo)**

**Universidade Federal de Pernambuco**

## RESUMO

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) podem ser definidos como uma superfície matemática que representa de forma contínua a superfície terrestre. Estes possuem diversas aplicações em várias áreas das Geociências. Devida a sua importância, o MDE necessita ter um rigoroso processo de avaliação de qualidade, de forma a garantir o seu grau de aderência a superfície topográfica. No Brasil, o estimador de qualidade utilizado consiste no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), atualizado posteriormente para Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). De forma complementar, também são utilizados para avaliação da acurácia testes de precisão e tendência. Diversas normas internacionais abordam a avaliação da qualidade altimétrica do MDE. Em especial, percebe-se nestas normas que a distribuição dos erros altimétricos é considerada não necessariamente como normal, o que gera padrões baseados em medidas como o percentil. Alguns autores consideram que a presença de valores *outliers* afetam a distribuição dos erros altimétricos, tornando-as não normal, além de influenciar em medidas como média e desvio-padrão. Este trabalho tem como objetivo verificar a hipótese de que a distribuição dos erros altimétricos de MDE não segue necessariamente a distribuição normal, bem como analisar a influência dos valores *outliers* em medidas estatísticas de dispersão e tendência central, nos valores dos testes de tendência e precisão e no processo de classificação do PEC-PCD.

**Palavras-Chave:** Qualidade. Modelos Digitais de Elevação. Acurácia. Altimetria.

## ABSTRACT

Digital Elevation Models (DEM) can be defined as a mathematical surface that represents the Earth's surface continuously. These have diverse applications in various areas of Geosciences. Due to its importance, the DEM needs to have a rigorous process of quality evaluation, in order to guarantee its degree of adherence to the topographic surface. In Brazil, the quality estimator used consists of the Cartographic Accuracy Standard (PEC), later updated to Cartographic Accuracy Standard of Digital Cartographic Products (PEC-PCD). In addition, accuracy and trend tests are also used to evaluate the accuracy. Several international standards cover the assessment of the altimetric quality of the DEM. In particular, it can be seen in these rules that the distribution of altimetric errors is considered not necessarily normal, which generates patterns based on measures such as the percentile. Some authors consider that the presence of outliers affects the distribution of altimetric errors, making them non-normal, in addition to influencing measures such as mean and standard deviation. The aim of this work is to verify the hypothesis that the distribution of the MDE altimetric errors does not necessarily follow the normal distribution, as well as to analyze the influence of the outliers values on statistical measures of dispersion and central tendency, on the values of the trend and precision tests and In the PEC-PCD classification process.

**Keywords:** Quality. Digital elevation models. Accuracy.

## LISTA DE SIGLAS

ASPRS *America Society of Photogrammetry and Remote Sensing*

DSG Diretoria do Serviço Geográfico

DP Desvio Padrão

EC Equidistância das Curvas de Nível

EMQ Erro Médio Quadrático

EP Erro Padrão

ET-CQDG Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais

FGDC *Federal Geographic Data Committee*

IFSAR *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

IQR Intervalo Quartílico

LIDAR *Light Detection and Ranging*

MDE Modelos Digitais de Elevação

MDS Modelo Digital de Superfície

MDT Modelo Digital do Terreno

MNS Modelo Numérico de Superfície

MNT Modelo Numérico do Terreno

NDEP *National Digital Elevation Program*

NMAD Desvio Absoluto Normalizado da Mediana

PEC Padrão de Exatidão Cartográfica

PEC-PCD Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais

RBMC Rede Brasileiro de Monitoramento Contínuo

REMQ Raiz do Erro Médio Quadrático

RPA Aeronaves Remotamente Pilotadas

RTK *Real Time Kinematic*

SIFT *Scale Invariant Feature Transform*

SIRGAS 2000 Sistema de Referência Geodésico para as Américas

SONAR *Sound Navigation and Ranging*

UFPE Universidade Federal de Pernambuco

USGS *United States Geological Survey*

UTM *Universal Transversa de Mercator*

WGS-84 *World Geodetic System*

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA.....	12
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	12
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	12
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	12
<b>2. EMBASAMENTO TEÓRICO</b> .....	14
2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO.....	14
<b>2.1.1 Amostragem</b> .....	15
<b>2.1.2 Geração do Modelo</b> .....	17
<b>2.1.3 Controle de Qualidade</b> .....	18
2.2 CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS ALTIMÉTRICOS.....	21
<b>2.2.1 Conceitos de Estatística</b> .....	21
2.2.1.1 Medidas Estatísticas.....	21
2.2.1.2 Inferência Estatística.....	26
2.2.1.3 Distribuição Normal.....	27
2.2.1.4 Teste de Hipóteses.....	29
2.2.1.5 Testes de Normalidade.....	31
2.2.1.6 Detecção de valores <i>outliers</i> .....	33
<b>2.2.2 Padrões de Qualidade Altimétrica no Brasil</b> .....	35
2.2.2.1 PEC e PEC-PCD Altimétricos.....	35
2.2.2.2 Procedimentos de análise definido no Brasil.....	37
<b>2.2.3 Normas Internacionais de Qualidade para Dados Altimétricos</b> .....	39
<b>3. METODOLOGIA DE PESQUISA</b> .....	44
3.1 ÁREA DE TRABALHO.....	44
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	45
3.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	46
<b>3.3.1 Obtenção dos Dados</b> .....	46
3.3.1.1 Câmera de Pequeno Formato.....	46
3.3.1.2 <i>Lidar</i> .....	48
<b>3.3.2 Aquisição dos pontos para verificação altimétrica</b> .....	49
3.3.2.1 Pontos para verificação altimétrica: Câmera de Pequeno Formato.....	49
3.3.2.2 Pontos para verificação altimétrica: <i>Lidar</i> .....	50

<b>3.3.3 Análise da Nuvem de Pontos.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.4 Geração dos Modelos Digitais de Elevação.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.5 Realização dos Experimentos.....</b>	<b>60</b>
<b>4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>61</b>
4.1 TESTE DE NORMALIDADE.....	62
4.2 DETECÇÃO DE OUTLIERS.....	64
4.3 MEDIDAS ESTATÍSTICAS.....	68
4.4 CLASSIFICAÇÃO PEC-PCD.....	71
4.5 ANÁLISE DE TENDÊNCIA.....	74
4.6 ANÁLISE DE PRECISÃO.....	75
4.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ACURÁCIA A PARTIR DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA E PRECISÃO.....	78
4.8 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR EM UMA SUPERFÍCIE SIMULADA.....	79
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO A - VALORES CRÍTICOS PARA O TESTE DE SHAPIRO WILK.....</b>	<b>92</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A superfície física da Terra é formada por um relevo com uma série de variações altimétricas em sua superfície, que inclui desde as cadeias montanhosas, como o Everest, localizado no Himalaia, às depressões, como a Fossa das Marianas, no Pacífico.

Diferentes tipos de valores de altimetria podem ser calculados, dependendo do referencial a ser utilizado. Quando este é referenciado ao elipsoide tem-se a altitude geométrica e quando referenciado ao geoide tem-se a altitude ortométrica. Na Cartografia, a coordenada altimétrica é usualmente identificada através de curvas de nível e de pontos cotados.

Com os avanços computacionais vivenciados nestes últimos anos, a possibilidade em se gerar Modelos Digitais de Elevação (MDE) a partir de dados coletados no terreno tornou-se uma realidade dentro da Geomática, Engenharia Cartográfica e Agrimensura, transformando o MDE em uma das principais formas de representação de valores altimétricos.

Conceitualmente, um MDE pode ser definido como uma representação matemática de uma superfície tridimensional, onde o valor das coordenadas X e Y representa os valores referentes à planimetria, enquanto Z representa os valores de altimetria. Dentro do universo das Geotecnologias, MDE possui diversas aplicações, como por exemplo, a criação de imagens ortorretificadas (imagem com projeção ortogonal), definição de bacias hidrográficas, geração de curvas de nível, entre outras.

A construção de MDE baseia-se no uso de técnicas de interpolação espacial a partir de dados amostrais obtidos do terreno. Estes podem ser obtidos através de levantamentos topográficos, pontos obtidos por Fotogrametria (ciência que permite realizar medições de um objeto a partir de imagens) e, atualmente, no mapeamento tridimensional usando técnicas de geração de nuvem de pontos, como sistemas *Light Detection and Ranging (LIDAR)* e de Visão Computacional. Esta última é usada principalmente no processamento de imagens de câmeras de pequeno formato, como por exemplo, a obtida por sensores embarcados em Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA).

Durante o processo de construção de um MDE, existe a acumulação de erros, desde a aquisição até o processamento dos dados. Por este motivo, os modelos gerados devem ser submetidos a um controle de qualidade que permita avaliar o nível de acurácia em comparação com a superfície topográfica e com as especificações exigidas para o produto de mapeamento. Para isto, são utilizadas técnicas de análise estatística para a análise da qualidade de um produto geoespacial. Estas técnicas estão presentes em normas e padrões técnicos nacionais e internacionais.

No Brasil, o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) é definido como sendo o indicador estatístico utilizado como valor padrão para classificar dados planialtimétricos (decreto nº 89.817 de 20 de Junho de 1984). Este indicador foi atualizado para Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) pela Diretoria do Serviço Geográfico (DSG), em 2015,

passando a considerar dados digitais. Em 2016, a DSG apresenta como norma de controle de qualidade a Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG).

A norma ISO 19113 (2002) estabelece cinco componentes da qualidade para dados geoespaciais: completude, que corresponde à ausência ou ao excesso de objetos; atributos ou relacionamentos; acurácia posicional que é a qualidade da posição espacial dos objetos em um sistema de referência; consistência lógica que corresponde ao grau de aderência da estrutura de dados, atributos e relacionamentos às regras lógicas; acurácia temática que é o grau de adesão entre os atributos quantitativos e atributos não-quantitativos à classificação dos objetos e seus relacionamentos; e acurácia temporal que corresponde à acurácia dos atributos temporais e relacionamentos temporais entre os objetos. A ISO 19114 (2003), por sua vez, apresenta os procedimentos a serem realizados para a avaliação da qualidade.

A *America Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) desenvolveu três normas referentes à acurácia de dados geoespaciais: a primeira *ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps* (ASPRS, 1990) apresenta definições sobre a acurácia espacial para mapas topográficos em grandes escalas; a segunda é a *ASPRS Guidelines Vertical Accuracy Reporting for LIDAR Data* (ASPRS, 2004) que apresenta normas referentes à acurácia de dados de elevação obtidos usando *LIDAR*; e a terceira tem como objetivo substituir as duas anteriores, tendo sido desenvolvida em 2014 com o nome *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data* (ASPRS, 2014).

Existem outras agências internacionais que também desenvolveram normas e padrões: o *Federal Geographic Data Committee* (FGDC); a *United States Geological Survey* (USGS); e *National Digital Elevation Program* (NDEP).

Existem algumas diferenças significativas entre a norma nacional oficial em vigor, referente ao PEC, e as normas internacionais recentes. Uma delas é que o PEC é definido com base no erro gráfico, ou seja, baseado na acuidade visual do operador e na resolução dos instrumentos de desenho analógico. Com o desenvolvimento do fluxo de trabalho digital, o erro gráfico perdeu significado, e no seu lugar passou a ser sugerido o tamanho representado do terreno em cada pixel digital, como na ASPRS (1990). Por conta desta evolução tecnológica, percebe-se que questões, como a distribuição dos erros altimétricos, até então considerada gaussiana, passam a ser revistas, conforme apresentado em ASPRS (2014).

Esta pesquisa objetiva realizar um estudo sobre os procedimentos metodológicos utilizados para a avaliação da acurácia altimétrica de Modelos Digitais de Elevação, presentes em normas e artigos internacionais e nacionais, visando principalmente a atualização de normas nacionais devido a inclusão das novas tecnologias de aquisição de dados altimétricos. Para isto, serão utilizados como

insumos modelos digitais gerados a partir de nuvem de pontos originárias de câmeras de pequeno formato e *LIDAR*.

Este trabalho terá a seguinte organização:

- Capítulo 2: Consistirá no embasamento teórico, onde serão apresentados os principais conceitos sobre Modelos Digitais de Elevação e vários processos de análises estatísticas usados para o controle de qualidade posicional.
- Capítulo 3: Este capítulo apresentará a metodologia de pesquisa e equipamentos utilizados.
- Capítulo 4: Análise dos resultados obtidos.
- Capítulo 5: Considerações finais.

## 1.1 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA

Os trabalhos realizados no Brasil sobre a análise e avaliação da qualidade posicional planimétrica e altimétrica, tanto acadêmicos como técnicos utilizam como referência as categorias do PEC (presentes no decreto nº 89.817 de 20 de Junho de 1984) e do PEC-PCD (DSG; 2015), além das análises de tendência e precisão propostos por Merchant (1982) e adotados por Galo e Camargo (1994).

Todavia, diversas normas e artigos internacionais estão propondo novos estudos estatísticos, mais apropriados para a análise para Modelos Digitais de Elevação, principalmente na componente vertical.

Torna-se essencial, então, rever os padrões e procedimentos adotados no Brasil, de forma a compatibilizar com os padrões mais atuais disponíveis e com as novas tecnologias de aquisição de dados geoespaciais.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a consistência dos principais procedimentos metodológicos, especificações e normas utilizadas no Brasil para a avaliação da acurácia posicional altimétrica de Modelos Digitais de Elevação, com base em métodos estatísticos robustos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar se a distribuição dos erros de uma Modelo Digital de Elevação, obtida a partir de uma nuvem de pontos, segue uma Distribuição Normal;
- Verificar a influência de valores *outliers* para a normalidade dos erros de um Modelo Digital de Elevação;
- Verificar a influência dos valores *outliers* nos testes e medidas estatísticas para a

avaliação de um Modelo Digital de Elevação;

- Analisar a adequação de métodos estatísticos robustos as normas brasileiras.

## 2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico no qual a pesquisa se fundamenta. As subseções ficam divididas da seguinte forma:

- Subseção 2.1: Conceitos referentes a Modelos Digitais;
- Subseção 2.2: Controle de Qualidade de Dados Altimétricos.

### 2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

No passado, os dados altimétricos eram representados de forma analógica, utilizando curvas de nível (obtidos a partir do processo de restituição fotogramétrica e interpolação de pontos altimétricos) e pontos cotados (obtidos por levantamentos topográficos e geodésicos). Com o desenvolvimento da cartografia digital, novas formas surgiram para representar a altimetria, como Modelos Digitais de Elevação e arquivo de Nuvem de Pontos. O Modelo Digital de Elevação (MDE) pode ser entendido como sendo uma superfície gerada a partir de um conjunto de dados amostrais que representam a distribuição espacial altimétrica do terreno (LI, ZHU e GOLD, 2005). Em DSG (2016), o MDE é definido como sendo um modelo matemático que representa um fenômeno, de forma contínua, a partir de dados adequadamente estruturados e amostrados do mundo real. Entende-se como sendo uma superfície contínua  $f(x_o, y_o)$  aquela na qual para qualquer ponto  $(x_o, y_o)$  pertencente ao domínio de  $f$ , tem-se que (GUIDORIZZI, 2001):

$$f \text{ é contínua em } (x_o, y_o) \Leftrightarrow \lim_{(x, y) \rightarrow (x_o, y_o)} f(x, y) = f(x_o, y_o) \quad (1)$$

Os Modelos Digitais de Elevação podem ser classificados, conforme DSG (2016), em quatro categorias, apresentado no quadro 1, a seguir.

Quadro 1: Divisão dos Modelos Digitais (DSG, 2016).

Tipo	Característica	Apresentação da Superfície
Modelo Digital do Terreno (MDT)	Não considera os acidentes naturais e artificiais acima do solo	Função Matemática Suave
Modelo Digital de Superfície (MDS)	Considera os acidentes naturais e artificiais acima do solo	
Modelo Numérico do Terreno (MNT)	Não considera os acidentes naturais e artificiais acima do solo	Matriz de Células
Modelo Numérico de Superfície (MNS)	Considera os acidentes naturais e artificiais acima do solo	

Fonte: PCDG (2016)

O termo digital é utilizado quando o modelo é apresentado a partir de uma função matemática suave, enquanto que o termo numérico é usado quando este é apresentado a partir de uma matriz discreta, tendo sido atribuído para cada valor de sua grade um valor altimétrico (DSG, 2016).

Em relação à suavização, uma superfície é dita suavizada quando exibe continuidade em sua derivada de primeira ordem e ordens superiores (LI, ZHU e GOLD, 2005).

Felgueiras e Câmara (2004) apresentam como etapas para a construção de um Modelo Digital:

- Amostragem: processo de seleção de pontos dentro da região de interesse;
- Geração do modelo ou interpolação: criação da estrutura de dados e definição de uma superfície de ajuste tal qual possa se gerar uma representação contínua a partir das amostras.

Além destas etapas de construção de um MDE, acrescenta-se ao processo o controle de qualidade.

### 2.1.1 Amostragem

A coleta de amostras pode ser realizada a partir de diversas fontes de dados. A *National Digital Elevation Program* (NDEP, 2004) apresenta como fontes de informação para a construção de um Modelo Digital:

- Documentos Cartográficos: digitalização de elementos de relevo (curvas de nível e pontos cotados), bem como de outras categorias que possam ajudar na construção, como hidrografia

e transportes;

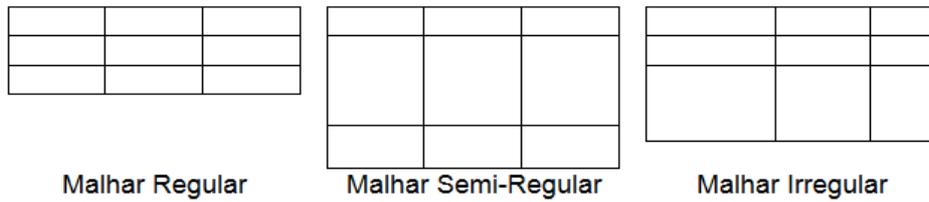
- Sensores Remotos Passivos: são aqueles que não possuem fonte própria de energia para sensibilizar os alvos no qual se deseja mapear. Temos, então como exemplo, as imagens aerofotogramétricas e de satélite;
- Sensores Remotos Ativos: diferentemente dos sistemas passivos, são aqueles que possuem fonte própria de energia para sensibilizar os alvos. Temos como exemplo de Sensores Ativos: *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (IFSAR), os sistemas de *LIDAR* e *Sound Navigation and Ranging* (SONAR);
- Plataformas de Levantamento: tem-se como fonte de dados os levantamentos topográficos utilizando receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS), tanto estáticos quanto cinemáticos, e as técnicas de topografia (irradiação, poligonização, nivelamento, etc.).

O procedimento de coleta de dados geoespaciais é importante durante o processo de construção de MDE, visto que a qualidade deste está diretamente ligada à quantidade e à distribuição de pontos selecionados em uma região. Em relação à quantidade de pontos a serem coletados, isto dependerá principalmente do tipo de superfície a ser mapeada. Quanto mais irregular for a superfície, mais pontos devem ser coletados.

No que diz respeito a distribuição dos pontos amostrais, esta é realizada utilizando uma estrutura em malha bidimensional. Estas malhas não correspondem a resolução da grade de interpolação do modelo digital, mas, sim, a forma na qual serão coletadas as amostras no terreno. As malhas, conforme visto em Felgueiras e Câmara (2004), podem ser divididas (Figura 1):

- Malhas regulares: são aqueles que os pontos são equidistantes em ambas as dimensões. No exemplo apresentado na figura 1 percebe-se que os pontos encontram-se equidistantes uns dos outros, em todas as direções;
- Malhas semi-regulares: são aquelas que os pontos são equidistantes em apenas uma dimensão. Na figura 1 percebe-se que os pontos são equidistantes no eixo horizontal, o que não ocorre no eixo vertical;
- Malhas irregulares: a seleção dos pontos não são equidistantes em qualquer dimensão. Na figura 1 percebe-se que para qualquer direção, os pontos não são equidistantes.

Figura 1: Tipos de malha para coleta das amostras.

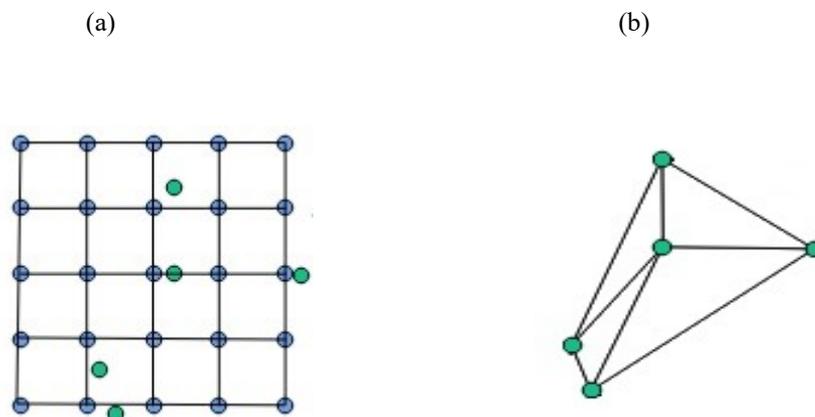


Fonte: O autor.

### 2.1.2 Geração do Modelo

Os Modelos Digitais de Elevação são armazenados em uma estrutura de dados. Os dois tipos de estruturas mais usuais (FELGUEIRAS; CÂMARA, 2004), são as grades regulares, criada a partir de técnicas de interpolação espacial, e grades irregulares, geradas usando técnicas de triangulação (figura 2).

Figura 2: Exemplo de grades. Em (a) tem-se uma grade regular enquanto em (b) uma grade irregular.



Fonte: O autor.

Entende-se por interpolação o procedimento matemático utilizado para determinar um valor desconhecido a partir de dados amostrais. Quando os interpoladores utilizam todos os dados amostrais para determinar um valor, estes são ditos globais. Quando estes utilizam apenas um grupo de valores da amostra para se estimar um ponto, são classificados como locais. Também é possível

classificar os interpoladores de acordo com o método utilizado como interpoladores não geoestatísticos, geoestatísticos e combinados (LI; HEAP, 2008). No quadro 2 são apresentados exemplos de interpoladores espaciais. Os interpoladores não geoestatísticos, também chamados de determinísticos, são aqueles que não utilizam técnicas probabilísticas para determinação de um valor, diferentemente dos geoestatísticos ou heurísticos. Os métodos combinados usam as duas técnicas juntas.

Quadro 2: Tipos de Interpoladores Espaciais.

Tipo	Exemplo
Não geoestatístico	Vizinho Mais Próximo Vizinho Natural Inverso do Quadrado da Distância Modelos de Regressão
Geoestatístico	Krigagem Simples Krigagem Ordinária
Combinado	Krigagem com regressão Análise de Superfície de Tendência com Krigagem

Fonte: O autor.

### 2.1.3 Controle de Qualidade

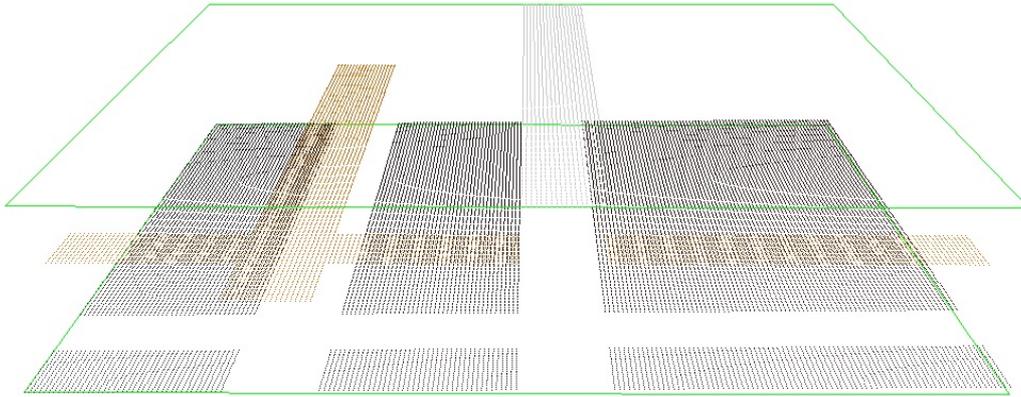
Durante o processo de construção de um MDE, erros são acumulados desde o processo de amostragem e coleta de dados, processo de interpolação e construção do modelo. Mais detalhes sobre os métodos estatísticos de avaliação da qualidade serão dados na seção 2.2.

Diferentes tipos de interpoladores espaciais, bem como diferentes tipos de grades, geram resultados diferentes para o mesmo conjunto de dados. Isto ocorre devido ao fato de que diferentes valores interpolados são obtidos conforme o método de interpolação utilizado e tamanho da grade escolhido.

Uma forma de ilustrar os efeitos de diferentes resoluções de grade e o tipo de interpolador pode ser observado nas figuras 4 e 5. Nestas são apresentados os resultados de interpolação dentro de uma nuvem de pontos simulada (figura 3), onde são observadas a presença de uma superfície plana com a presença de edificações. A figura 4.a e 4.b são apresentados os efeitos dos interpoladores da Triangulação e o de Regressão Linear, onde percebe-se que o interpolador da triangulação apresentou um resultado mais próximo a superfície original. Já nas figuras 5.a, 5.b e 5.c são apresentados os efeitos da mudança resolução da grade sobre o resultado. Percebe-se pelas figuras que quanto menor o tamanho da grade, mais próximo o resultado da interpolação se

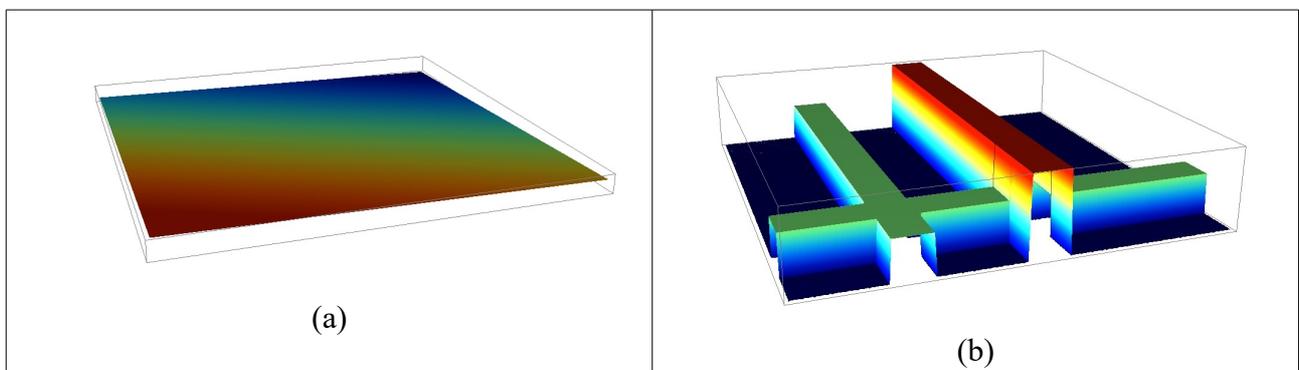
aproxima do original.

Figura 3: Arquivo de nuvem de pontos simulado representado uma área plana com edificações.



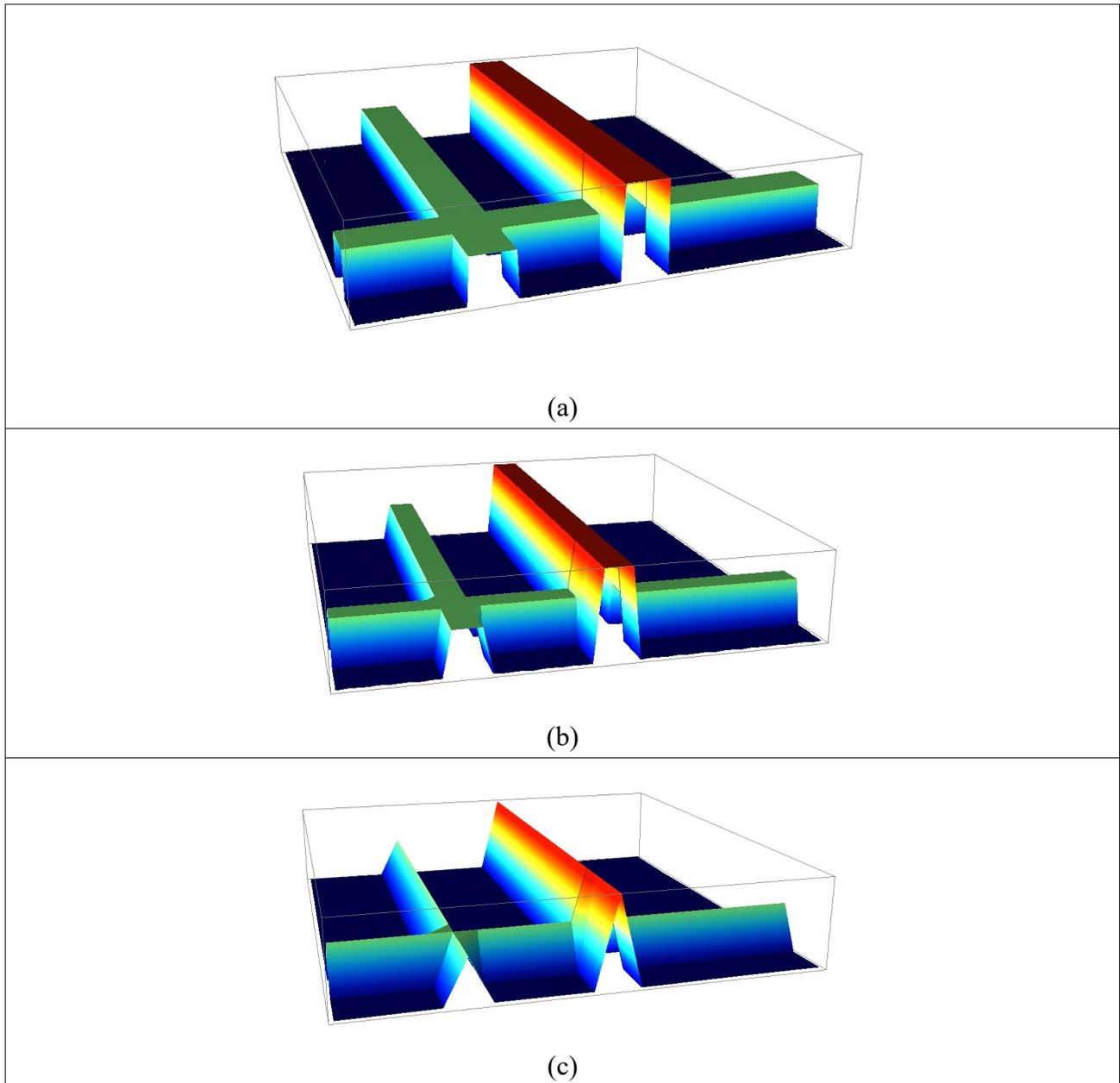
Fonte: O autor.

Figura 4: Efeito do tipo de interpolador espacial na geração da grade.



Fonte: O autor.

Figura 5: Efeito da resolução da grade no processo de construção do MDE.



Fonte: O autor.

## 2.2 CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS ALTIMÉTRICOS

### 2.2.1 Conceitos de Estatística

Esta subseção tem como objetivo apresentar os conceitos estatísticos utilizados no decorrer da pesquisa. Inicialmente, serão abordadas as medidas estatísticas, conceitos sobre inferência estatística, conceitos referentes à distribuição normal, testes de hipótese para média e variâncias, e testes de normalidade. Por último, os métodos para a detecção de *outliers*.

#### 2.2.1.1 Medidas Estatísticas

Durante a pesquisa, diversas medidas estatísticas são utilizadas para descrever a qualidade de um dado altimétrico. A seguir, serão apresentadas estas medidas. Como critério de padronização, adotam-se as seguintes convenções:

- $x$ : Variável aleatória;
  - $f$ : Função de Probabilidade;
  - $n$ : Tamanho da Amostra;
  - $x_i$  : Elemento  $i$ -ésimo de uma amostra;
  - Resíduo:  $e_i = x_i^{\text{estimado}} - x_i^{\text{observado}}$  (GEMAEL, 1994);
  - $\mu$  : Média Populacional;
  - $\sigma$  : Desvio Padrão Populacional.
  - $\hat{\Theta}$  : Estimador
  - $\theta$  : Parâmetro
- 
- Esperança Matemática para uma variável aleatória discreta (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

$$\mu = E(X) = \sum_x f(x) \cdot x \quad (2)$$

- Variância Matemática para uma variável aleatória discreta (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

$$\sigma^2 = V(X) = \sum_x f(x) \cdot (x - \mu)^2 \quad (3)$$

- Desvio Padrão para uma variável aleatória discreta (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

$$\sigma = \sqrt{V(\bar{X})} \quad (4)$$

- Média Amostral (WALPOLE et al, 2009):

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (5)$$

- Mediana de uma amostra (WALPOLE et al, 2009):

$$\tilde{X} = med(x) = x_{\frac{(n+1)}{2}} \text{ se } n \text{ for ímpar.} \quad (6)$$

$$\tilde{X} = med(x) = \frac{1}{2} \left( x_{\frac{n}{2}} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right) \text{ se } n \text{ for par.}$$

- Variância Amostral (WALPOLE et al, 2009):

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (7)$$

- Desvio Padrão Amostral (WALPOLE et al, 2009):

$$DP = s = (s^2)^{1/2} \quad (8)$$

- Desvio Absoluto Normalizado da Mediana (ROUSSEEUW; CROUX, 1993):

$$\hat{\sigma} = NMAD_n = 1,4826 \cdot med\{|x_i - med\{x_i\}|\} = 1,4826 \cdot MAD \quad (9)$$

$$MAD = med\{|x_i - med\{x_i\}|\}$$

Prova:

Seja  $Y$  uma variável aleatória tal que seu valor é calculado como sendo:

$$Y = |X - \text{med}(X)|$$

Considere  $X$  como sendo uma variável aleatória com distribuição normal. Logo tem-se que:

$$\begin{aligned} P(Y \leq \text{med}(Y)) &= \frac{1}{2} \Rightarrow P(|X - \text{med}(X)| \leq \text{med}(|X - \text{med}(X)|)) = \frac{1}{2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow P(|X - \text{med}(X)| \leq \text{MAD}) = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Se  $X$  tem distribuição normal então  $\mu = \text{med}(X)$

$$P(|X - \mu| \leq \text{MAD}) = \frac{1}{2} \Rightarrow P\left(\left|\frac{(X - \mu)}{\sigma}\right| \leq \frac{\text{MAD}}{\sigma}\right) = \frac{1}{2}$$

$$\frac{(X - \mu)}{\sigma} = Z$$

$$P\left(|Z| \leq \frac{\text{MAD}}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} \Rightarrow P\left(\frac{\text{MAD}}{\sigma}\right) - P\left(\frac{-\text{MAD}}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P\left(\frac{\text{MAD}}{\sigma}\right) - 1 + P\left(\frac{\text{MAD}}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} \Rightarrow P\left(\frac{\text{MAD}}{\sigma}\right) = \frac{3}{4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\text{MAD}}{\sigma} = P^{-1}\left(\frac{3}{4}\right) \Rightarrow \frac{\text{MAD}}{\sigma} = 0,6745 \Rightarrow \sigma = 1,4826 \cdot \text{MAD}$$

- Percentil (ASPRS, 2014):

$$n = 1 + \left[ \left( \frac{P}{100} \right) \cdot (N - 1) \right]$$

$$Q_p = A[n_w] + n_d \cdot (A[n_w + 1] - A[n_w]) \quad (10)$$

Em que:

P= Número do percentil no qual se deseja calcular. Ex: 95;

N= Tamanho da amostra;

$Q_p$  = Valor do percentil da amostra;

$A[n_w]$  = Valor da amostra localizado na posição  $n_w$  ;

$n_w$  = Primeiro número inteiro menor ou igual ao valor de n;

$A[n_w + 1]$  = Valor da amostra localizado na posição  $n_w + 1$  ;

$n_w + 1$  = Primeiro número inteiro maior ou igual ao valor de n;

$n_d = n - n_w$  .

- Intervalo Quartílico (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

$$IQR = Q_{75} - Q_{25} \quad (11)$$

- Erro Padrão de um Estimador (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

$$\sigma(\hat{\Theta}) = \sqrt{V(\hat{\Theta})} \quad (12)$$

- Erro Médio Quadrático de um Estimador (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

$$EMQ(\hat{\Theta}) = E(\hat{\Theta} - \theta)^2 \quad (13)$$

- Relação entre o Erro Médio Quadrático, Variância e o Viés de um Estimador (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

$$EMQ(\hat{\Theta}) = V(\hat{\Theta}) + Viés^2 \quad (14)$$

Prova:

$$\begin{aligned}
 EMQ(\hat{\Theta}) &= E[\hat{\Theta} - \theta]^2 = E[\hat{\Theta} - E(\hat{\Theta}) + E(\hat{\Theta}) - \theta]^2 \Rightarrow \\
 &\Rightarrow E[\hat{\Theta} - E(\hat{\Theta})]^2 + 2E[(\hat{\Theta}) - E(\hat{\Theta})][E(\hat{\Theta}) - \theta] + E[E(\hat{\Theta}) - \theta]^2 \Rightarrow \\
 &\Rightarrow V(\hat{\Theta}) + 2[E(\hat{\Theta}) - E(\hat{\Theta})][E(\hat{\Theta}) - \theta] + [E(\hat{\Theta}) - \theta]^2 \Rightarrow \\
 &\quad \Rightarrow V(\hat{\Theta}) + [E(\hat{\Theta}) - \theta]^2 \\
 EMQ(\hat{\Theta}) &= V(\hat{\Theta}) + (\text{viés})^2
 \end{aligned}$$

O termo viés do estimador, visto na equação 14, é apresentado em Montgomery e Runger (2003). Todavia este termo também pode ser definido em artigos acadêmicos como sendo o vício ou tendência do estimador, como, por exemplo, em Monico et al (2009).

- Relação entre o Erro Médio Quadrático e a Média Quadrática do Erro para uma amostra:

$$EMQ = \frac{(n-1)}{n} \cdot s^2 + (\bar{e} - \theta)^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \theta)^2}{n} \quad (15)$$

Prova:

$$\begin{aligned}
 EMQ &= \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \theta)^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e} + \bar{e} - \theta)^2}{n} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2 - 2 \cdot \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}) \cdot (\bar{e} - \theta) + \sum_{i=1}^n (\bar{e} - \theta)^2}{n} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1} - \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}) \cdot (\bar{e} - \theta)}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{e} - \theta)^2}{n} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot s^2 - \frac{2 \cdot (\bar{e} - \theta) \cdot \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})}{n} + \frac{n \cdot (\bar{e} - \theta)^2}{n} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot s^2 - 2 \cdot (\bar{e} - \theta) \cdot (\bar{e} - \bar{e}) + \frac{n \cdot (\bar{e} - \theta)^2}{n} \Rightarrow \\
 &\quad \Rightarrow \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot s^2 + (\bar{e} - \theta)^2
 \end{aligned}$$

$$\text{Considerando } \theta = 0 \Rightarrow EMQ = \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot s^2 + (\bar{e})^2 = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}$$

- Raiz do Erro Médio Quadrático (ASPRS, 2014):

$$REMQR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}} \quad (16)$$

Sobre as equações apresentadas tem-se:

- As equações 2 a 8 e 2 a 16 são as mais encontradas em trabalhos de avaliação da qualidade posicional publicados no Brasil;
- As equações 9 a 11 são usadas nesta pesquisa como soluções alternativas e robustas para medidas estatísticas;
- A equação 13 e 14 tem grande utilidade pois permite avaliar a qualidade posicional em uma única expressão, unindo a variância com o viés de um estimador.
- As equações 13 e 16 apresentam algumas divergências em alguns autores. Em Gemael (1994), a equação 16 é tratada como sendo o erro médio quadrático. Já em Monico et al (2009) o erro médio quadrático é tratado como sendo a equação 13. Neste trabalho o termo erro médio quadrático será utilizado conforme a equação 13 enquanto que a raiz do erro médio quadrático conforme a equação 16;
- O erro padrão (equação 12) será igual ao erro médio quadrático (equação 13) apenas quando o viés tiver valor zero e calculado o valor da raiz quadrada.

#### 2.2.1.2 Inferência Estatística

Entende-se por inferência estatística como sendo os métodos pelos quais são realizadas inferências ou generalizações sobre uma população (WALPOLE et al, 2009). Para realizar estas inferências são calculadas estatísticas amostrais com o objetivo de inferir sobre parâmetros populacionais. A estatística utilizada para estimar um parâmetro populacional é definido como estimador. Um exemplo de estimador para o parâmetro media populacional é a média amostral. O resultado de um estimador é definido como estimativa.

Dentro do estudo dos estimadores, existem medidas que servem para avaliar a qualidade destes. Por exemplo temos medidas como o erro padrão (equação 12) e erro médio quadrático (equação 13) de um estimador. O primeiro serve para avaliar o grau de variabilidade enquanto que o segundo serve para avaliar a acurácia.

### 2.2.1.3 Distribuição Normal

A distribuição normal (também conhecida como distribuição gaussiana) é uma das mais importantes distribuições de probabilidade em todo o campo da estatística, principalmente por esta descrever muitos dos fenômenos que ocorrem na natureza e em pesquisas (WALPOLE et al, 2009).

Seja  $x$  uma variável aleatória contínua de uma população com distribuição de probabilidade  $f$  e com parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  sendo valores correspondentes à média e desvio padrão populacionais.

Matematicamente, se  $x$  tem distribuição normal, a função de densidade de probabilidade de  $x$  pode ser expressa pela equação 17 (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

$$N(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (17)$$

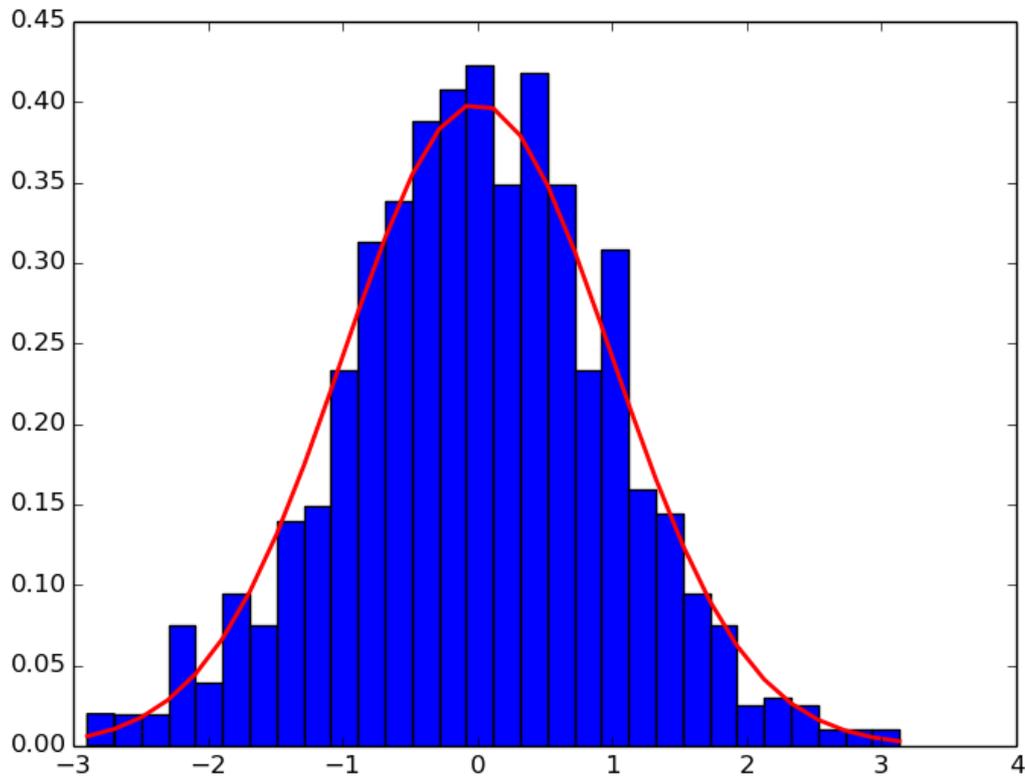
Seja variável aleatória  $z$  descrita de tal forma que  $z = \frac{(x-\mu)}{\sigma}$ . Tem-se então que  $z$  é normalmente distribuída, com  $\mu=0$  e  $\sigma=1$ , passando a ser conhecida como variável aleatória normal padronizada. Esta é matematicamente expressa pela equação 18.

$$N(0,1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} \quad (18)$$

Graficamente, a distribuição normal pode ser expressa pela figura 6. Uma propriedade importante da distribuição normal é que a área total abaixo da curva corresponde à probabilidade 100% e tem valor igual a 1 (equação 19).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} . dz = 1 \quad (19)$$

Figura 6: Gráfico representado a curva normal em vermelho.



Fonte: O autor.

Alguns valores de probabilidade podem ser retirados da curva, conforme visto na tabela 1.

Uma aplicação da distribuição normal é que esta permite inferir valores de probabilidade para uma população usando exclusivamente os valores da média e desvio padrão.

Alguns métodos de avaliação e padrões para dados altimétricos foram criados partindo do princípio que a distribuição das discrepâncias destes, ou seja, a diferença entre o valor altimétrico medido no terreno e o obtido medido no modelo digital ou carta topográfica segue este tipo de distribuição.

Tabela 1: Probabilidades da curva normal.

$\left  \frac{x-\mu}{\sigma} \right  < P$	Probabilidade
$\left  \frac{x-\mu}{\sigma} \right  < 1,6449 \rightarrow \mu - 1,6449\sigma < x < \mu + 1,6449\sigma$	90%
$\left  \frac{x-\mu}{\sigma} \right  < 2 \rightarrow \mu - 2\sigma < x < \mu + 2\sigma$	95,44%
$\left  \frac{x-\mu}{\sigma} \right  < 3 \rightarrow \mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma$	99,74%

Fonte: O autor.

#### 2.2.1.4 Teste de Hipóteses

Conforme apresentado em Montgomery e Runger (2003), os testes de hipóteses podem ser entendidos como os procedimentos a serem adotados para se decidir sobre uma determinada afirmação estatística.

Estes procedimentos se baseiam em determinar inicialmente uma hipótese nula, que é a que desejamos testar. Se esta é verdadeira, então a hipótese estatística a ser testada é verdadeira. Se rejeitada, então não rejeita-se a hipótese alternativa, ou seja, contrária à hipótese estatística.

O teste de hipótese é realizado baseado em um nível de significância ( $\alpha$ ), que mede a probabilidade em se rejeitar a hipótese nula, sendo esta verdadeira. Este tipo de erro é conhecido como erro tipo I. O segundo tipo de erro consiste em aceitar a hipótese nula, sendo esta falsa. Este erro é chamado de erro tipo II, sendo calculado sua significância como  $\beta$ .

Para esta pesquisa serão utilizados três testes de hipóteses: o primeiro será para determinar a hipótese de normalidade de uma amostra; o segundo para se determinar se há tendência em um conjunto de dados; e o terceiro para se verificar se uma amostra pode ser considerada precisa. O primeiro teste será apresentado de forma mais detalhada na próxima seção, onde são descritos os testes de normalidade. Os outros dois testes são baseados na distribuição t e qui-quadrado, descritos a seguir:

- Teste T para comparar médias: Este teste baseia-se no cálculo da variável aleatória T (equação 20) que possui distribuição t quando a variável aleatória x tem distribuição normal. O objetivo deste teste é verificar se a média populacional do conjunto de dados ( $\mu$ ) no qual se deseja testar pode ser considerada igual a um valor de referência ( $\mu_0$ ). Para que a

hipótese nula seja aceita (equação 22) o valor do módulo de T calculado deve ser inferior ao valor de t (distribuição t) para um nível de significância  $\alpha$  e com n-1 graus de liberdade (equação 21). Caso contrário, será aceita a hipótese alternativa (equação 23).

$$T_x = \frac{(\Delta \bar{X} - \mu_0)}{S_{\Delta X}} \cdot \sqrt{n} \quad (20)$$

$$|T_x| < t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} \quad (21)$$

$$H_o: \mu = \mu_0 \quad (\text{Hipótese Nula}) \quad (22)$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0 \quad (\text{Hipótese Alternativa}) \quad (23)$$

- Teste para comparar variâncias: Este teste baseia-se no cálculo da variável aleatória de teste  $X_0^2$  (equação 24), onde esta terá distribuição qui-quadrado, quando a variável aleatória x tem distribuição normal. Tem como objetivo verificar a igualdade entre duas variâncias. O valor da variável de teste é comparado com o valor  $\chi^2$  (distribuição qui-quadrado) com um grau de liberdade  $(v-1)$  e nível de significância  $\alpha$ . A hipótese nula (equação 26) será aceita se a desigualdade apresentada na equação 25 for aceita. Caso contrário será aceita a hipótese alternativa (equação 27).

$$X_o^2 = \frac{(n-1) \cdot S^2}{\sigma^2} \quad (24)$$

$$X_0^2 \leq \chi_{(v-1, \alpha)}^2 \quad (25)$$

$$H_o: \sigma^2 = \sigma_0^2 \quad (\text{Hipótese Nula}) \quad (26)$$

$$H_1: \sigma^2 > \sigma_0^2 \quad (\text{Hipótese Alternativa}) \quad (27)$$

### 2.2.1.5 Testes de Normalidade

Diversos testes de normalidade vem sendo desenvolvidos de forma a verificar se um conjunto de dados possui distribuição normal, como por exemplo, o gráfico quantil-quantil normal, os coeficientes de curtose e assimetria e o teste de Shapiro-Wilk.

O gráfico quantil-quantil normal é construído de tal forma que nas abscissas encontram-se os quantis previstos para uma distribuição normal, enquanto nas ordenadas estão os valores dos quantis amostrais. A forma de construção deste gráfico segue o seguinte algoritmo (WALPOLE et al, 2009):

- Primeiramente são ordenados os dados da amostra  $x_i$  em ordem crescente;
- É calculado o valor de  $f$ , que corresponde a fração dos valores da amostra que é menor ou igual ao valor de um quantil da amostra,  $q(f)$ . Esta fração é calculada pela equação 28;

$$f_i = \frac{i - \frac{3}{8}}{n + \frac{1}{4}} \quad (28)$$

Onde:

$i$ =valor do quartil;

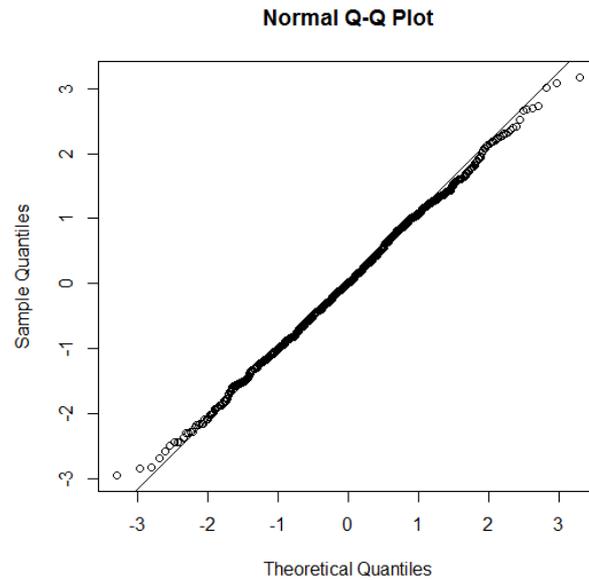
$n$ =Tamanho da amostra.

- É calculado o valor do quantil  $q_{0,1}(f)$  correspondente a uma variável aleatória  $N(0,1)$ . Este quantil é dado pela aproximação obtida pela equação 29;

$$q_{0,1}(f) = 4,91 \cdot [f^{0,14} - (1 - f^{0,14})] \quad (29)$$

- O gráfico é plotado confrontado o valor de  $q_{0,1}(f_i)$  (abscissas) e  $x_i$  (ordenadas);
- Quanto mais próximo de uma reta os pontos estiverem, maior a possibilidade dos dados pertencerem a uma distribuição normal (Figura 7).

Figura 7: Gráfico quantil-quantil.



Fonte: O autor.

Outra forma de se verificar a normalidade é utilizando os coeficientes de curtose e assimetria. Seja uma amostra com  $n$  valores, define-se o momento para uma amostra como sendo (COX, 2010):

$$m_r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^r}{n} \quad (30)$$

O coeficiente de curtose é calculado conforme a equação 31 e o de assimetria, pela equação 32 (COX, 2010).

$$K = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (31)$$

$$AS = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \quad (32)$$

Conforme apresentado em Cox (2010), se uma população possui distribuição normal, então  $K=3$  e  $AS = 0$ .

O teste de Shapiro-Wilk, proposto em 1965 (SHAPIRO; WILK, 1965) tem como objetivo verificar a hipótese de normalidade de uma população a partir de uma amostra. Este tem como vantagem ser bastante sensível, mesmo para pequenas amostras (SHAPIRO; WILK, 1965).

Para uma variável aleatória  $x$ , com  $n$  dados, a variável estatística de teste  $W$  é calculada pela equação 33. Os coeficientes  $a_i$  podem ser definidos conforme a equação 34.

O valor  $m$  é definido como um vetor de dimensão  $n$  correspondendo aos valores esperados de  $x$  enquanto que  $V$  é a matriz de covariância de  $x$ , de dimensão  $n \times n$ . Os valores críticos de  $W$  estão apresentados na tabela 26, no Anexo A.

$$W = \frac{\left( \sum_{i=1}^n a_i x_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (33)$$

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_n) = \frac{m' \cdot V^{-1}}{\left( m' \cdot V^{-1} \cdot V^{-1} \cdot m \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (34)$$

Onde:

$$m' = (E(x_1), E(x_2), \dots, E(x_n))$$

$$v(i, j) = cov(x_i, x_j), (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

O teste de hipótese é definido da seguinte forma:

- A hipótese nula é aceita, ou seja, a hipótese que a amostra vem de uma distribuição normal, se o valor da estatística  $W$  for maior que o valor crítico de  $W$ , para um determinado nível de significância ( $\alpha$ );
- A hipótese alternativa será aceita se o valor da estatística  $W$  for inferior ao valor crítico de  $W$ , para um nível de significância ( $\alpha$ ).

#### 2.2.1.6 Detecção de valores *outliers*

Entende-se por valores *outliers* como sendo uma ou mais observações presentes em uma amostra, com valores distantes do conjunto de dados, de tal forma que demonstram fazer parte de

outra população (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

De acordo com processo de análise estatística a ser realizado, pode haver a necessidade que este tipo de valor seja removido da amostra.

Uma forma de detectar outliers, apresentado por Leys et al (2013), é através da média e desvio padrão (equação 35). Todos os pontos pertencentes a amostra que tiver resultado maior que 3 serão considerados como valores *outliers*. Este método possui como principais desvantagens: há necessidade que a distribuição de  $x$  seja normal, visto que se baseia na probabilidade que 99,87% dos dados estejam dentro deste intervalo (valor originado pela curva normal); e valores da média e desvio-padrão sofrem bastante influência dos valores *outliers*.

$$\left| \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right| < 3 \quad (35)$$

Por conta disso, Leys et al (2013) sugere substituir o desvio padrão pelo NMAD (equação 9), por este ser um estimador do desvio padrão menos sensível aos *outliers*, bem como substituir a média amostral pela mediana. O método de detecção passa a ser expresso conforme a equação 36.

$$\left| \frac{x_i - \text{med}\{x_i\}}{NMAD_n} \right| < 3 \quad (36)$$

Todavia este método ainda tem o problema de depender que a distribuição da variável aleatória  $x$  seja normal. Por este motivo este método não é recomendado em dados onde a distribuição não é próxima a normal.

Um método que não depende do tipo distribuição dos dados, proposto por Hubert e Vandervieren (2008), é o método Boxplot Ajustado. Este método consiste em uma derivação do método Boxplot. O método Boxplot pode ser descrito da seguinte forma (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

- Calcula-se o valor do intervalo quartílico para a amostra de dados (Equação 11);
- Os intervalos para remoção de *outliers* ficam definidos pela equação 37.

$$\text{Dados sem outliers} = [Q_{25} - 1,5 \cdot IQR, Q_{75} + 1,5 \cdot IQR] \quad (37)$$

Em Hubert e Vandervieren (2008) este método é desaconselhado, por dificilmente conseguir diferenciar o que é um potencial *outlier* de um verdadeiro *outlier*, além de classificar todos os pontos fora deste intervalo como *outlier*, o que para isto precisaria supor que a distribuição dos dados é normal. Para evitar estes problemas, o método Boxplot foi ajustado da seguinte forma:

- Inicialmente calcula-se o valor da medida medcouple (MC), conforme a equação 38;

$$MC = med(h(x_i, x_j)), x_i \leq Q_{50} \leq x_j$$

$$h(x_i, x_j) = \frac{(x_j - Q_{50}) - (Q_{50} - x_i)}{(x_j - x_i)} \quad (38)$$

- Em seguida são definidos os intervalos de corte para eliminação de *outliers*. Estes ficam da seguinte forma:

$$MC \geq 0$$

$$\text{Dados sem outliers} = [Q_{25} - 1,5 \cdot IQR \cdot e^{-4 \cdot MC}, Q_{75} + 1,5 \cdot IQR \cdot e^{3 \cdot MC}] \quad (39)$$

$$MC < 0$$

$$\text{Dados sem outliers} = [Q_{25} - 1,5 \cdot IQR \cdot e^{-3 \cdot MC}, Q_{75} + 1,5 \cdot IQR \cdot e^{4 \cdot MC}] \quad (40)$$

Para esta pesquisa, visto que deseja-se um método de detecção de *outliers* que independa do tipo de distribuição dos dados, será utilizado o método Boxplot Ajustado.

## 2.2.2 Padrões de Qualidade Altimétrica no Brasil

### 2.2.2.1 PEC e PEC-PCD Altimétricos

No Brasil, o decreto nº 89.817 de 20 de Junho de 1984 é responsável por definir os parâmetros de qualidade para os dados planialtimétricos. Neste é definido o conceito de PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica), em que se estabelecem os valores padrões de qualidade, divididos em classes (A, B e C).

O decreto estabelece que, para que um produto cartográfico seja considerado pertencente a uma determinada categoria, em relação a altimetria, deve ser aceita a seguinte condição:

- Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, interpolados a partir de curvas de nível,

quando testados com no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido;

Em termos de categorias, tem-se que os dados altimétricos são classificados de acordo com a equidistância das curvas de nível (EC), conforme apresentado na tabela 2. O termo equidistância aqui utilizado se refere ao espaçamento vertical entre cada curva de nível.

Tabela 2: Padrão de Exatidão Cartográfica para dados Altimétricos.

Classe	PEC	Erro Padrão (EP)
A	1/2. EC	1/3. EC
B	3/5. EC	2/5. EC
C	3/4. EC	1/2. EC

Fonte: Decreto n° 89.817 (1984)

Inicialmente o decreto n° 89.817 (1984) foi previsto somente para produtos analógicos e por isso não previa MDE. Em DSG (2015), é apresentada uma nova proposta de valores para o PEC, incluindo os produtos digitais. Este conjunto de padrões foi denominado como Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

Os produtos digitais, comparados aos analógicos, possuem um significativo ganho de qualidade devido à modernização dos equipamentos de aquisição e softwares de processamento de dados. O PEC-PCD estabelece novas categorias para a planimetria e altimetria. Com o PEC-PCD, o MDE passou a ter seus próprios padrões, conforme apresentado na tabela 3

Tabela 3: Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais para Modelos Digitais de Elevação.

Classe	PEC-PCD	Erro Padrão (EP)
A	0,27. EC	1/6. EC
B	1/2. EC	1/3. EC
C	3/5. EC	2/5. EC
D	3/4. EC	1/2. EC

Fonte: DSG (2015)

Pelo que foi apresentado, tanto pelo decreto n° 89.817 (1984), quanto o PEC-PCD (2015), pode-se inferir que a metodologia a ser aplicado para classificar um modelo digital em determinada classe deve ser o seguinte:

- Calcula-se o valor do módulo das discrepâncias entre os valores altimétricos de pontos de verificação medidos no terreno com o valor dos mesmos pontos medidos no Modelo Digital. O modelo será considerado dentro de uma determinada classe se 90% destas discrepâncias estiver menor que o valor do PEC-PCD previsto;

No entanto, essas normas não trazem detalhes de como os testes estatísticos devem ser realizados, não apresenta detalhes sobre a quantidade mínima de pontos a ser utilizado e ainda apresenta conflitos de definições como discutido nas próximas seções.

Uma questão a se levantar é que no decreto n° 89.817 (1984) o conceito de erro médio quadrático e erro padrão são tratados como equivalentes. Todavia, pelo que já foi apresentado na seção 2.2.2.1 estes não podem ser considerados equivalentes.

#### 2.2.2.2 Procedimentos de análise definido no Brasil

Possivelmente devido a falta de detalhes das normas brasileiras quanto aos testes para qualidade posicional, são usadas análises complementares sendo citados principalmente em Tomaselli, Monico e Camargo (1988), Galo e Camargo (1994) e Dalmolin e Leal (2001). Estas análises estatísticas se baseiam no estudo de Merchant (1982) e tem como objetivo verificar a existência de tendência e a precisão das coordenadas planialtimétricas em uma carta topográfica.

A verificação de existência de tendências dos dados é a base para análise de exatidão. Esta análise consiste em verificar se a média das discrepâncias (diferença entre o valor altimétrico obtido no campo e o mesmo obtido no modelo) pode ser considerado igual a zero. Para se realizar a análise de tendência é utilizado o teste t para comparação de médias. Serão avaliadas, segundo Galo e Camargo (1994), as seguintes hipóteses:

$$H_0: \Delta \bar{X} = 0 \quad (\text{Hipótese Nula}) \quad (41)$$

$$H_1: \Delta \bar{X} \neq 0 \quad (\text{Hipótese Alternativa}) \quad (42)$$

O valor  $\Delta \bar{X}$  corresponde ao valor da média das discrepâncias amostrais, sendo X corresponde à coordenada analisada. A análise de verificação de tendências apresentado realiza um

teste de hipótese bicaudal, ou seja, que possui uma região de teste dentro de um valor crítico superior e inferior. Em Dalmolin e Leal (2001) este teste é apresentado como sendo unicaudal, sendo a região de teste tendo apenas um valor crítico. Nesta dissertação o teste de hipótese será realizado como sendo bicaudal.

A segunda análise proposta pelos autores diz respeito à precisão dos dados. Esta análise se baseia em comparar o desvio padrão da amostra com o erro padrão previsto no decreto do PEC. Para isto, é utilizado teste de comparação entre variâncias, usado a distribuição qui-quadrado. As hipóteses a serem analisadas, segundo Galo e Camargo (1994), pode ser vistas nas equações 43 e 44. O valor de  $\sigma_X^2$  é o erro padrão (EP) previsto no PEC.

$$H_0: S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2 \quad (\text{Hipótese Nula}) \quad (43)$$

$$H_1: S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2 \quad (\text{Hipótese Alternativa}) \quad (44)$$

Em relação ao erro padrão usado na análise de precisão, existe uma discordância entre autores de como utilizá-lo para a análise de coordenadas planimétricas. Tando é possível observar o  $\sigma_X^2$  como sendo EP e também como  $\frac{EP}{\sqrt{(2)}}$ . Isto ocorre devido estes autores considerarem a análise das coordenadas planimétricas de forma separada enquanto outros consideram a sua resultante. No caso da altimetria este tipo de questão não será problema, pois somente será analisado uma coordenada.

Uma questão importante a se considerar é o uso do termo acurácia. Em Merchant (1984) o termo acurácia é definido como sendo a composição da análise de tendência com a precisão. Em Galo e Camargo (1994) precisão é definido como sendo a dispersão entre os valores observados e o valor médio, enquanto que exatidão é entendido aqui como sinônimo de acurácia e corresponde à proximidade entre os valores observados com os valores de referência. Em Quintino e Leal (2001) o termo acurácia é visto de forma a similar a Galo e Camargo (1994) sendo apresentado as análises como sendo acurácia e precisão. Em Monico et al (2009) o termo acurácia é definido como sendo a combinação da precisão mais a tendência (viés do estimador), o que implica que para um dado ser considerado acurado, deve ser preciso e livre de tendência. Nesta dissertação o termo acurácia será utilizado conforme apresentado em Monico et al (2009).

Também é importante destacar, como foi apresentado, que ambos as análises (tendência e precisão) consideram que a distribuição da variável aleatória de estudo tenha distribuição normal.

Logo o usuário deve ter de conferir que a distribuição dos valores das discrepâncias da coordenada de estudo seja normal.

Por último é importante corrigir a forma de expressar os testes de hipóteses proposto por Galo e Camargo (1994), visto que teste de hipóteses são realizados sobre parâmetros (médio e variância populacionais) e não sobre estatísticas (média e variância amostrais). Logo, estes devem ser realizados usando a média e variância populacional, conforme apresentado nas equações 22, 23, 26 e 27.

### 2.2.3 Normas Internacionais de Qualidade para Dados Altimétricos

Diversas normas internacionais foram desenvolvidas durante os anos referentes à acurácia de Modelos Digitais de Elevação, conforme apresentado no quadro 3.

Quadro 3: Normas Internacionais para Dados Altimétricos.

Sigla	Instituição	Nome da Norma	Ano
USGS	United States Geological Survey	United States National Map Accuracy Standards	1947
ASPRS	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing	ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps	1990
USGS	United States Geological Survey	Digital Elevation Model Standards Part 1: General	1997
USGS	United States Geological Survey	Digital Elevation Model Standards Part 3: Quality Control	1997
USGS	United States Geological Survey	Digital Elevation Model Standards Part 2: Specifications	1998
FGDC	Federal Geographic Data Committee	Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy	1998
NDEP	National Digital Elevation Program	Guidelines for Digital Elevation Data	2004
ASPRS	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing	ASPRS Guidelines Vertical Accuracy Reporting for LIDAR Data	2004
ASPRS	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing	ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data	2014

Fonte: O autor.

1. *United States Map Accuracy Standards*: Documento que apresenta as normas de acurácia

vertical e horizontal para mapas, bem como o teste de acurácia. A acurácia vertical é definida de tal forma que no mínimo 90% dos pontos amostrais devem ter erro inferior à metade do valor da equidistância das curvas de nível.

2. *ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps*: Esta norma foi desenvolvida pela ASPRS (1990), com o objetivo de normatizar a avaliação de acurácia de dados planimétricos e altimétricos para mapas topográficos em largas escalas com o propósito de ser usado em obras de engenharia. No que diz respeito à altimetria esta usa como medida estatística o REMQ. Os testes para altimetria são realizados comparando pontos medidos no mapa com pontos obtidos no terreno com alta acurácia.
3. *Digital Elevation Model Standards*: Norma produzida pela USGS (1997). É dividida em três partes, sendo que a parte um e três foram lançadas em 1997, enquanto que a parte dois em 1998. Esta usa como medida estatística o REMQ. Para a realização dos testes estatísticos, a norma recomenda que o usuário deva medir 28 pontos, no mínimo, sendo 20 pontos localizados no interior do modelo e 8 nas bordas. A avaliação consiste em comparar pontos interpolados do modelo digital com pontos medidos no terreno. Estes devem ser bem distribuídos, representativos no terreno e com acurácia das elevações coerentes com a acurácia do modelo.
4. *Geospatial Positioning Accuracy Standards*: Norma produzida pela FGDC em 1998. A parte três desta norma corresponde aos padrões nacionais para a acurácia de dados espaciais. Em termos de medida estatística, usa-se o REMQ. Nesta norma assume-se que os erros sistemáticos foram, da melhor forma possível, eliminados e que estes se encontram normalmente distribuídos. Logo, a acurácia vertical ( $Z$ ) passa a ser calculada como sendo  $Acurácia_z = 1,96.REMQ_z$  com um nível de confiança de 95%.
5. *Guidelines for Digital Elevation Data*: Este guia foi desenvolvido em 2004, pela NDEP, e, na verdade, é uma união dos padrões até então desenvolvidos pelas agências americanas para Modelos Digitais. Esta norma prevê dois tipos de testes para altimetria:
  - a. Teste Fundamental de Acurácia Vertical: Considera que os pontos de controle se encontram em terreno aberto, onde a probabilidade do sensor medir a coordenada do terreno é alta. Considera então que os erros estão normalmente distribuídos e o valor da acurácia vertical é calculado como sendo  $Acurácia_z = 1,96.REMQ_z$  com um

nível de confiança de 95%.

- b. Teste Suplementar de Acurácia Vertical: Usada para os casos em que os pontos de controle não estão em terreno aberto. Por conta disso, passa a considerar que a distribuição dos erros pode não estar normalmente distribuída. Neste caso, a acurácia vertical é calculada usando o valor do 95<sup>th</sup> percentil. O cálculo do percentil deve seguir a equação 15. É importante que deve ser utilizado no cálculo do percentil o módulo do valor das discrepâncias.
6. *ASPRS Guidelines Vertical Accuracy Reporting for LIDAR Data*: Norma desenvolvida pela ASPRS em 2004, com objetivo de servir como metodologia para análise de Modelos Digitais oriundos de tecnologia *LIDAR*. Em termos de metodologia, segue de forma análoga a NDEP (2004).
  7. *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*: Esta norma foi proposta pela ASPRS em 2014, com o objetivo de substituir as normas de 1990 e 2004. Em termos de análise, esta passa a considerar duas regiões de estudo para análise. Define-se então:
    - a. Non-vegetated Vertical Accuracy (NVA): Corresponde à acurácia para regiões sem vegetação. Considera-se neste caso que a distribuição das discrepâncias segue a distribuição normal. Uma região sem vegetação é definida como sendo aquela que possui terreno exposto, rochas, areia, grama baixa, asfalto e concreto. Para um intervalo de confiança de 95%, o valor de acurácia deve ser 1,96 vezes o REMQ;
    - b. Vegetated Vertical Accuracy (VVA): Acurácia para regiões com vegetação. Neste caso, a hipótese que a distribuição das discrepâncias segue uma distribuição normal pode não ser verdadeira. Um terreno com vegetação é definido como sendo aquele com culturas altas, cerrado e regiões totalmente arborizadas. Para se obter uma acurácia com 95% de confiança utiliza-se aqui o valor do 95<sup>th</sup> percentil. A norma apresenta que a acurácia VVA é 1,5 vezes superior a acurácia NVA. Os padrões de qualidade da ASPRS podem ser agrupados, conforme a tabela 4;

Os padrões da ASPRS também apresentam uma sugestão para quantidade de pontos a serem coletados no terreno, conforme a dimensão da área de estudo (quadro 4).

Tabela 4: Padrões da ASPRS para acurácia dos Modelos Digitais de Elevação.

Acurácia Absoluta			
Classes de Acurácia Vertical	$RMS_z$ Sem Vegetação (cm)	NVA com 95 % de Intervalo de Confiança (cm)	VVA com 95 <sup>th</sup> percentil (cm)
1-cm	1	2	3
2,5-cm	2,5	4,9	7,5
5-cm	5	9,8	15
10-cm	10	19,6	30
15-cm	15	29,4	45
20-cm	20	39,2	60
33,3-cm	33,3	65,3	100
66,7-cm	66,7	130,7	200
100-cm	100	196	300
333,3-cm	333,3	653,3	1000

Fonte: ASPRS (2014)

Quadro 4: Quantidade de pontos de verificação altimétrica necessários para análise de acurácia. (ASPRS, 2014)

Área do Projeto ( $km^2$ )	Número de pontos para testes de acurácia vertical		
	Nº pontos NVA	Nº pontos VVA	Nº total de pontos
≤500	20	5	25
501-750	20	10	30
751-1000	25	15	40
1001-1250	30	20	50
1251-1500	35	25	60
1501-1750	40	30	70
1751-2000	45	35	80
2001-2250	50	40	90
2251-2500	55	45	100

Fonte: ASPRS (2014)

A partir de uma análise das normas internacionais é possível tirar algumas conclusões:

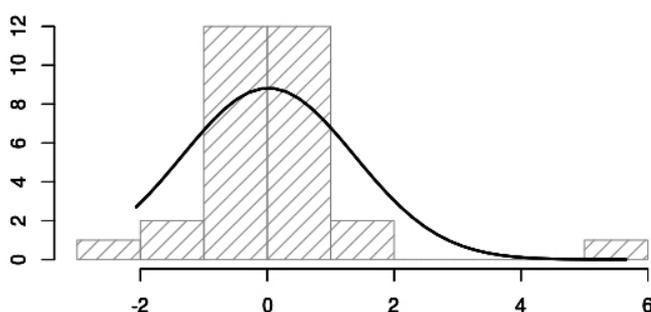
- No geral, as medidas estatísticas utilizadas nestas normas é REMQ (equação 16);
- O único tipo de distribuição dos erros altimétricos considerado antes pelas normas era a normal. Contudo, nas normas mais recentes distribuições diferentes da normal passaram a ser aceitas.

A hipótese que a distribuição dos erros altimétricos não segue a distribuição normal vem se mostrando adequado para Modelos Digitais de Elevação. Zandbergen (2008), apresenta que a distribuição dos erros posicionais em pontos levantados usando *LIDAR* pode ser aproximada a uma distribuição normal somente quando excluídos os erros *outliers* dos dados. Este destaca que as principais fontes de erros originados nos modelos gerados pelo *LIDAR* são introduzidas conforme os acidentes naturais e artificiais presente no terreno, bem como sua complexidade, efeitos do processamento de sinal e filtragem dos dados.

Em Höhle e Höhle (2009) é apresentado que Modelos Digitais de Elevação possuem diversas fontes de erros que geram valores *outliers* aos dados. Estes valores perturbam os resultados de medidas estatísticas e podem causar desvio da distribuição normal. Um exemplo pode ser observado no histograma da figura 8, onde a curva representa a distribuição normal. Devido à presença de *outliers* a direita, este histograma apresenta uma curtose e assimetria diferentes da distribuição normal.

Por conta da presença dos valores *outliers*, Höhle e Höhle (2009) sugerem que sejam utilizados estatísticas robustas, como o NMAD (equação 9) em modelos digitais derivados de Fotogrametria e *Lidar*.

Figura 8: Exemplo de efeito dos valores *outliers* em um histograma.



### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

#### 3.1 ÁREA DE TRABALHO

Para a realização da pesquisa foram utilizadas duas áreas distintas de trabalho.

Os modelos digitais gerados por técnica de Visão Computacional correspondem à região da 3ª Divisão de Levantamento (figura 9), localizada na cidade de Olinda-PE. A área levantada corresponde a aproximadamente  $0,1 \text{ km}^2$ .

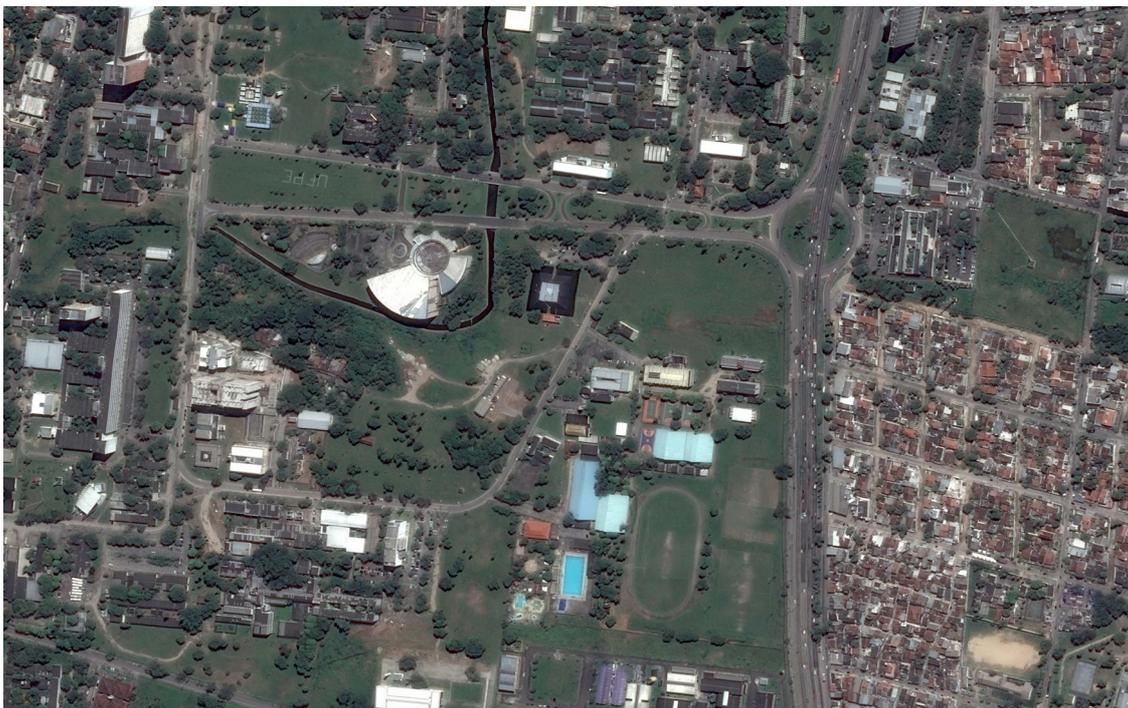
Os modelos oriundos do levantamento usando *LIDAR* correspondem à área da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), localizada em Recife-PE (figura 10). A área levantada corresponde a aproximadamente  $0,5 \text{ km}^2$ .

Figura 9 - Área de trabalho para câmera de pequeno formato.



Fonte: O autor.

Figura 10 - Área de trabalho do levantamento usando *LIDAR*.



Fonte: *Google*.

### 3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os programas utilizados durante a pesquisa para tratamento e processamento dos arquivos de nuvem de pontos, geração dos Modelos Digitais de Elevação e análise dos dados, foram os seguintes:

- *OpenDroneMap*: Software livre, utilizado para a construção da nuvem de pontos a partir de imagens obtidas por câmera de pequeno formato;
- *SAGA GIS*: Software gratuito utilizado para geração das grades regulares, no qual são gerados os MDE;
- *CloudCompare*: Software gratuito que permite georreferenciamento e manipulação de arquivo de nuvem de pontos;
- *QUANTUM GIS*: Software gratuito utilizado para manipulação dos arquivos de nuvem pontos e Modelos Digitais;
- *Anaconda*: Software científico gratuito para desenvolvimento em linguagem de

programação *Python*;

- Notebook *Core i3*, com 4GB de Memória RAM;
- Câmera de pequeno formato, modelo *Canon EOS Rebel T5* com resolução de 16 Megapixels;

### 3.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.3.1 Obtenção dos Dados

##### 3.3.1.1 Câmera de Pequeno Formato

Os arquivos de nuvem de pontos foram obtidos a partir do processamento das imagens de pequeno formato, utilizando-se o software *OpenDroneMap*.

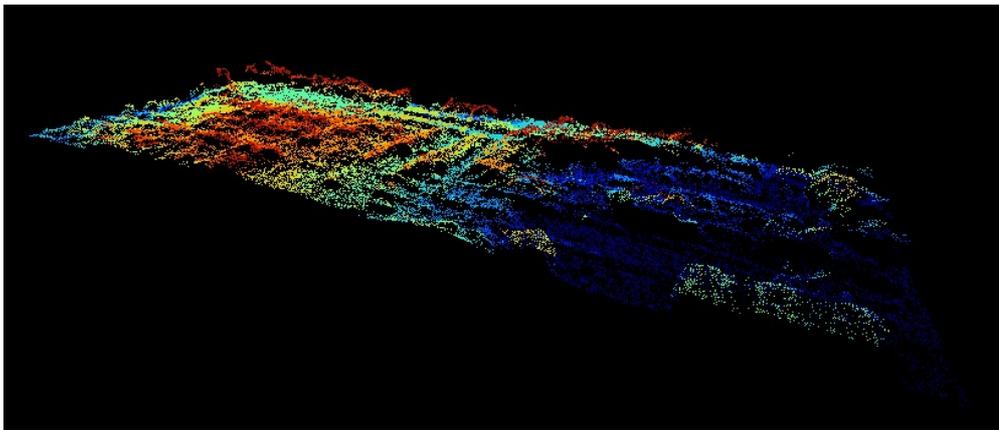
As imagens foram obtidas utilizando-se um conjunto de câmeras embarcadas em um helicóptero, totalizando 14 imagens em formato *JPEG*.

O processo de geração da nuvem de pontos segue o seguinte fluxo:

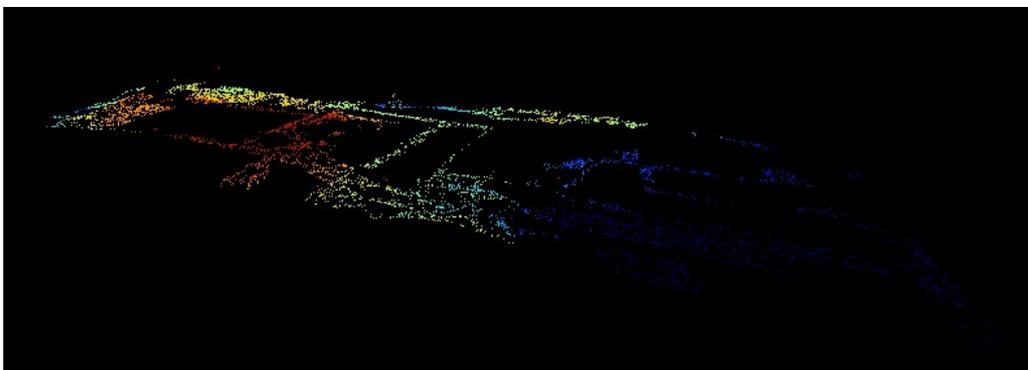
- Alinhamento do conjunto de fotos: O processo consiste em detectar pontos homólogos dentre cada uma das imagens. Estes pontos são detectados de forma automática. Neste processo são utilizados algoritmos como o *Scale Invariant Feature Transform (SIFT)*, proposto por Lowe (1999);
- Construção da nuvem de pontos esparsa: Tem como objetivo estimar a posição das câmeras e a posição tridimensional das feições do terreno;
- Densificação da nuvem de pontos: O processo de densificação utiliza os valores estimados a partir da nuvem de pontos esparsa e com estes densifica a nuvem de pontos, gerando assim uma maior quantidade de pontos para a nuvem;
- Georreferenciamento da nuvem: O georreferenciamento da nuvem foi realizado utilizando o software *CloudCompare*. O procedimento consiste em detectar pontos de controle medidos no terreno dentro do arquivo de nuvem de pontos. A nuvem de pontos foi georreferenciada usando como sistema de referência geodésico WGS-84 (*World Geodetic System*), com sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 25-S (EPSG: 32725). A grandeza altimétrica é representada pela altitude geométrica;

- Para a construção do MDT foi necessário retirar os acidentes naturais e artificiais do terreno. Este processo foi realizado a partir da vetorização destas feições, usando como referência a ortoimagem do terreno. Tendo sido gerado os polígonos, foi utilizada a ferramenta de intersecção espacial do *software QuantumGIS* com o objetivo de localizar os pontos pertencentes da nuvem que correspondiam a estes acidentes. Tendo sido localizado os pontos, estes foram então removidos do arquivo original;
- As nuvens de pontos geradas encontram-se presentes na figura 11.

Figura 11: Arquivos de nuvem de pontos. Em (a) têm-se os dados com todos os acidentes naturais e artificiais. Em (b) estes foram filtrados.



(a)



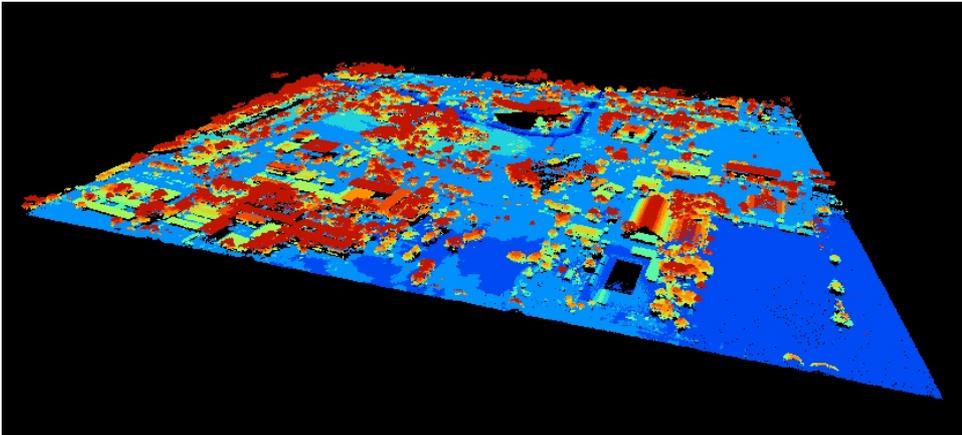
(b)

Fonte: O autor.

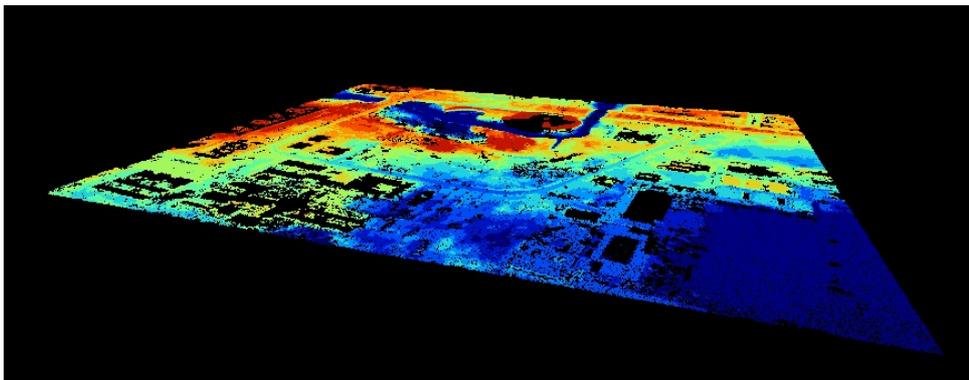
### 3.3.1.2 Lidar

Os arquivos de nuvem de pontos foram cedidos pela Prefeitura da cidade de Recife, Pernambuco. Estes arquivos são de dois tipos: o primeiro corresponde aos dados com todos os acidentes artificiais e naturais sobre a superfície do terreno (figura 12.a); e o segundo foi filtrado de tal forma que é apresentado somente a superfície do terreno (figura 12.b). Os dados foram recebidos no sistema de referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geodésico para as Américas), com sistemas de coordenadas UTM, zona 25-S. Em relação à grandeza altimétrica, esta é representada pela altitude ortométrica.

Figura 12: Arquivos de nuvem de pontos. Em (a) dados com todos os acidentes naturais e artificiais. (b) com os acidentes filtrados.



(a)



(b)

Fonte: O autor.

### 3.3.2 Aquisição dos pontos para verificação altimétrica

#### 3.3.2.1 Pontos para verificação altimétrica: Câmera de Pequeno Formato

Foram coletados 30 pontos para verificação altimétrica, utilizando-se receptores GNSS, através do método *Real Time Kinematic* (RTK), apresentados na tabela 5. Os pontos foram coletados usando como sistema de referência WGS-84, no sistema de coordenadas UTM, zona 25-S.

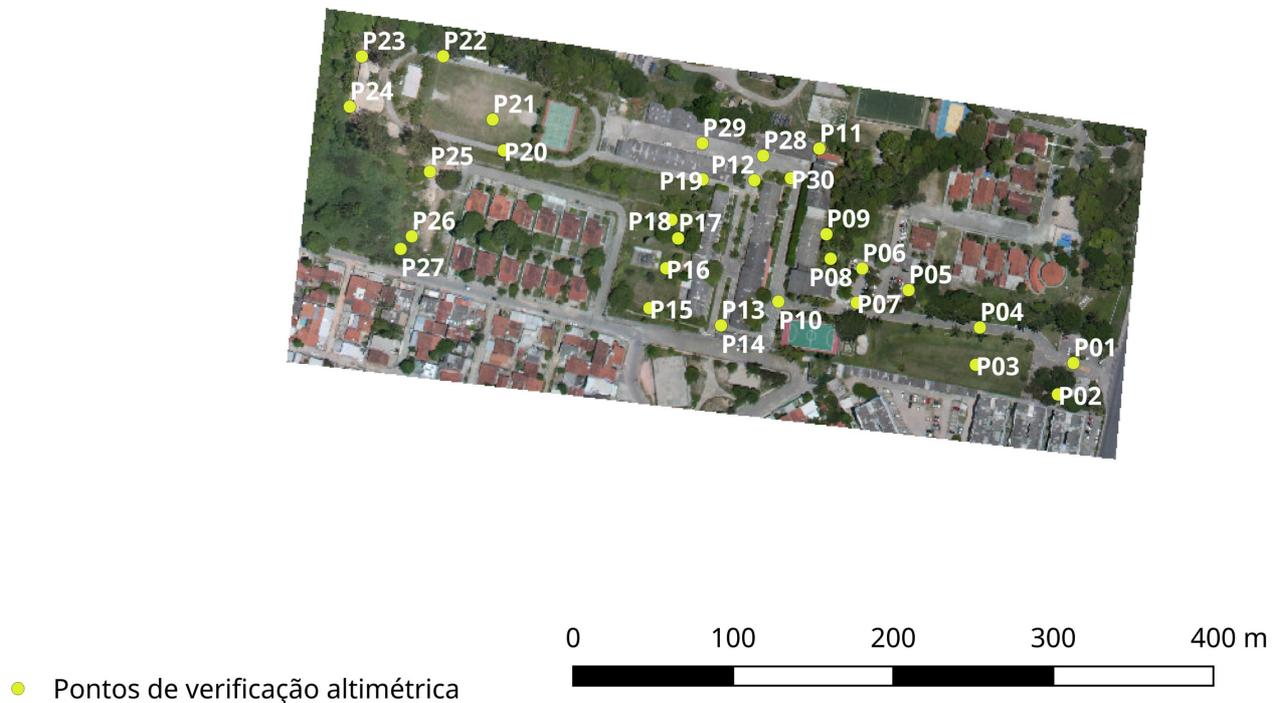
Os pontos foram distribuídos de forma aleatória, de forma a percorrer toda a região da área de estudo, estando estes localizados tanto em locais abertos quanto em locais com presença de vegetação. A figura 13 apresenta a distribuição dos pontos no terreno.

Tabela 5: Pontos de verificação altimétrica para o modelo gerado por dados de câmera de pequeno formato.

ID	E (m)	N (m)	h (m)	ID	E (m)	N (m)	h (m)
P01	295255,255	9114708,641	8,414	P16	295000,711	9114767,273	26,451
P02	295245,534	9114689,245	14,725	P17	295008,209	9114785,759	25,753
P03	295194,244	9114707,545	10,255	P18	295004,058	9114797,251	26,468
P04	295196,806	9114730,635	11,297	P19	295023,578	9114822,215	22,298
P05	295152,215	9114753,776	15,228	P20	294899,280	9114840,176	23,056
P06	295123,238	9114767,116	16,718	P21	294892,342	9114859,274	23,020
P07	295119,803	9114746,003	16,938	P22	294861,395	9114898,424	22,652
P08	295103,526	9114773,180	18,216	P23	294810,569	9114898,279	22,393
P09	295100,893	9114788,351	20,107	P24	294803,030	9114867,229	22,224
P10	295070,857	9114746,665	20,070	P25	294853,130	9114827,016	24,866
P11	295096,461	9114841,289	22,307	P26	294841,800	9114787,006	23,805
P12	295055,892	9114821,694	21,489	P27	294834,861	9114779,267	22,771
P13	295035,082	9114731,896	21,421	P28	295061,375	9114836,897	21,330
P14	295035,036	9114731,895	21,427	P29	295023,360	9114844,588	21,550
P15	294990,226	9114742,651	26,857	P30	295078,628	9114822,979	21,520

Fonte: O autor.

Figura 13: Pontos de verificação altimétrica obtidos para testes com câmera de pequeno formato.



Fonte: O autor.

### 3.3.2.2 Pontos para verificação altimétrica: *Lidar*

Para verificação altimétrica dos modelos gerados pelo *Lidar* foram coletados 20 pontos (figura 14), onde suas coordenadas podem ser visualizadas na tabela 6. Os pontos foram obtidos da seguinte forma:

- 12 pontos foram obtidos a partir da planta base do campus universitário da UFPE, fornecido pelo Laboratório de Topografia do Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE. Os pontos encontram-se com sistema de referência geodésico SIRGAS 2000 e sistema de coordenadas UTM, zona 25-S;
- 8 pontos foram coletados dentro da área de trabalho, usando receptor GNSS. A técnica de levantamento utilizada foi estático, com tempo de 15 min de rastreamento, usando como base

para pós-processamento a estação da Rede Brasileiro de Monitoramento Contínuo (RBMC) localizado na Biblioteca Central da UFPE. Os pontos usam como sistema de referência o WGS-84, no sistema de coordenadas UTM, zona 25-S.

- Em termos práticos, não existem diferenças entre o sistema WGS-84 e o sistema SIRGAS 2000, não havendo a necessidade de se converter os dados de um sistema para o outro;
- Como os valores altimétricos da nuvem de pontos encontram-se com altitude ortométrica, é necessário realizar a conversão para a altitude geométrica ( $h$ ). Para isto, foi utilizado o modelo geoidal MAPGEO 2015, fornecido pelo IBGE, com o valor das ondulações geoidais ( $N$ ). A conversão é realizada a partir da fórmula 45.

$$N(\text{Ondulação Geoidal}) \approx h - H \quad (45)$$

Tabela 6: Pontos de verificação altimétrica para o modelo gerado por dados de *Lidar*.

ID	E (m)	N (m)	h (m)	ID	E (m)	N (m)	h (m)
P01	284615,479	9109342,052	5,208	P11	285364,818	9108945,774	3,084
P02	284683,097	9109364,185	4,335	P12	284603,506	9109006,561	4,587
P03	284662,256	9109225,443	3,934	P13	284650,091	9109407,838	4,636
P04	284749,314	9109106,723	4,970	P14	285266,163	9108981,111	1,207
P05	284907,586	9109110,033	3,287	P15	284790,225	9109100,159	2,758
P06	285048,312	9109033,769	5,275	P16	285227,412	9109295,533	2,966
P07	285185,234	9109217,312	3,128	P17	284682,654	9109046,758	3,267
P08	285160,166	9109533,547	3,618	P18	284716,714	9109228,865	3,290
P09	285384,804	9109430,885	5,201	P19	284840,820	9109519,177	3,071
P10	284742,576	9109481,118	4,893	P20	285141,400	9109520,851	3,250

Fonte: O autor.

Figura 14: Pontos de verificação altimétrica obtidos para testes com LIDAR.



### Legenda

- Pontos de verificação altimétrica

0 100 200 300 400 m



Fonte: Google.

### 3.3.3 Análise da Nuvem de Pontos

Antes de iniciar os experimentos, os arquivos de nuvens de pontos sofreram um processo de análise, a fim de verificar se encontravam-se coerentes com a superfície topográfica do terreno.

Este foi realizado usando o interpolador do Vizinheiro Mais Próximo, que tem como característica definir a altitude de um ponto desejado utilizando a altitude do ponto mais próximo a este. Os resultados obtidos podem ser visualizados nas tabelas 7 e 8. Os gráficos apresentados na figura 15 e 16 mostram os resultados para os dados gerados por câmera de pequeno formato (superfície 1), enquanto que os gráficos apresentados nas figuras 17 e 18 para os dados gerados com *Lidar* (superfície 2). Nas figuras 15 e 17 correspondem a superfície com a presença de acidentes naturais e artificiais enquanto que os gráficos 16 e 18 estes encontram-se sem estes acidentes. Pelos gráficos

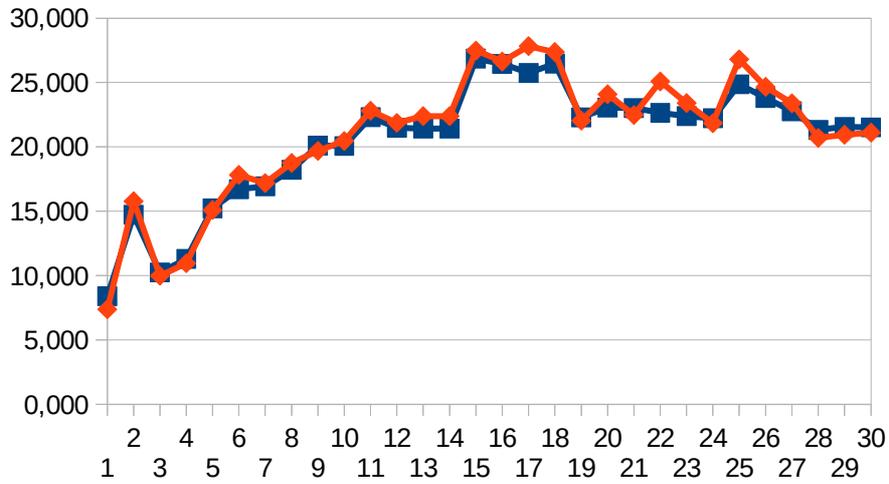
percebem-se a presença de valores *outliers*, como por exemplo os pontos 2 e 4 no gráfico 16. Logo, percebe-se que o insumo a ser utilizado para geração dos MDE já possui um erro quando comparado à superfície topográfica do terreno.

Tabela 7: Validação da nuvem de pontos oriundo do processamento da câmera de pequeno formato.

ID	h (Terreno)	Superfície 1	Superfície 2
		h (Nuvem)	h (Nuvem)
P01	8,414	7,393	7,390
P02	14,725	15,779	7,540
P03	10,255	9,987	9,990
P04	11,297	10,960	11,360
P05	15,228	15,097	15,530
P06	16,718	17,826	16,490
P07	16,938	17,190	17,440
P08	18,216	18,760	16,210
P09	20,107	19,688	16,210
P10	20,070	20,466	20,450
P11	22,307	22,805	21,650
P12	21,489	21,869	21,170
P13	21,421	22,396	22,080
P14	21,427	22,396	22,080
P15	26,857	27,483	27,480
P16	26,451	26,643	26,720
P17	25,753	27,825	28,720
P18	26,468	27,373	26,790
P19	22,298	22,039	23,570
P20	23,056	24,090	23,520
P21	23,020	22,486	22,530
P22	22,652	25,089	22,280
P23	22,393	23,402	23,000
P24	22,224	21,840	21,840
P25	24,866	26,804	25,980
P26	23,805	24,664	24,240
P27	22,771	23,391	23,980
P28	21,330	20,708	20,710
P29	21,550	20,944	20,940
P30	21,520	21,110	21,050
	REMQ	0,938	1,731

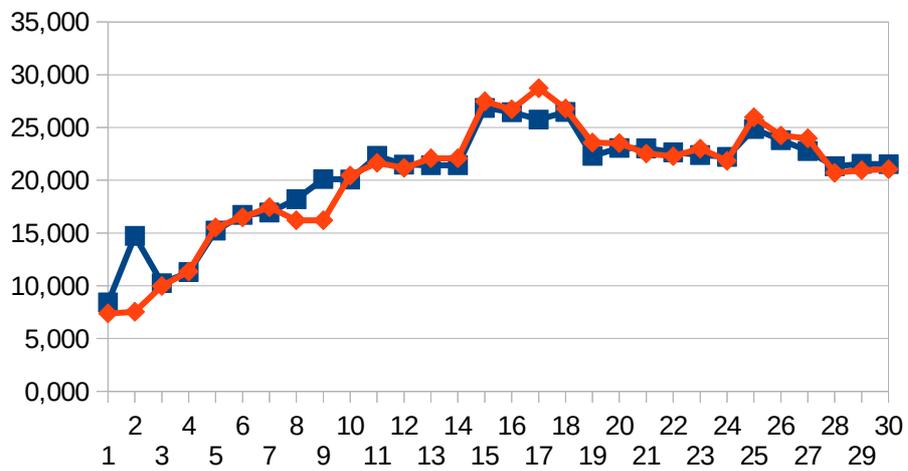
Fonte: O autor.

Figura 15: Comparação entre os pontos obtidos no terreno (azul) e os pontos obtidos a partir da nuvem de pontos (vermelho).



Fonte: O autor.

Figura 16: Comparação entre os pontos obtidos no terreno (azul) e os pontos obtidos a partir da nuvem de pontos (vermelho).



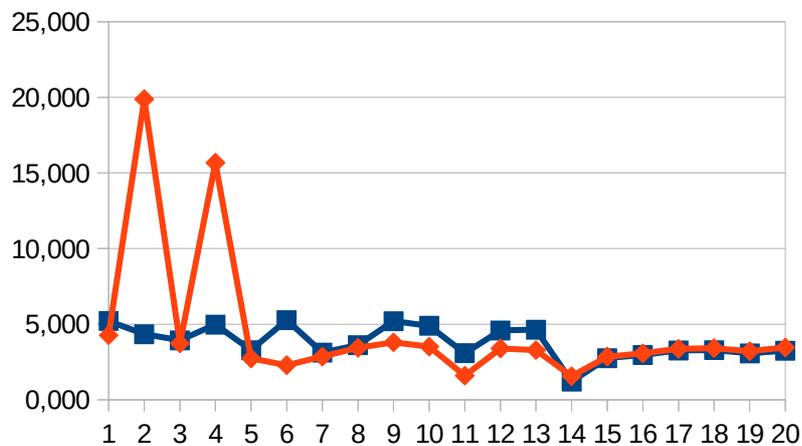
Fonte: O autor.

Tabela 8: Validação da nuvem de pontos oriundo de Lidar.

ID	h (Terreno)	Superfície 1	Superfície 2
		h (Nuvem)	h (Nuvem)
P01	5,208	4,280	3,850
P02	4,335	19,880	4,020
P03	3,934	3,730	3,700
P04	4,970	15,680	2,940
P05	3,287	2,740	2,730
P06	5,275	2,290	2,260
P07	3,128	2,860	2,820
P08	3,618	3,440	3,360
P09	5,201	3,800	3,790
P10	4,893	3,520	3,490
P11	3,084	1,600	1,490
P12	4,587	3,400	3,130
P13	4,636	3,290	3,170
P14	1,207	1,560	1,510
P15	2,758	2,850	2,670
P16	2,966	3,070	3,020
P17	3,267	3,370	3,340
P18	3,290	3,420	3,360
P19	3,071	3,210	3,240
P20	3,250	3,460	3,400
	REMQU	4,336	1,153

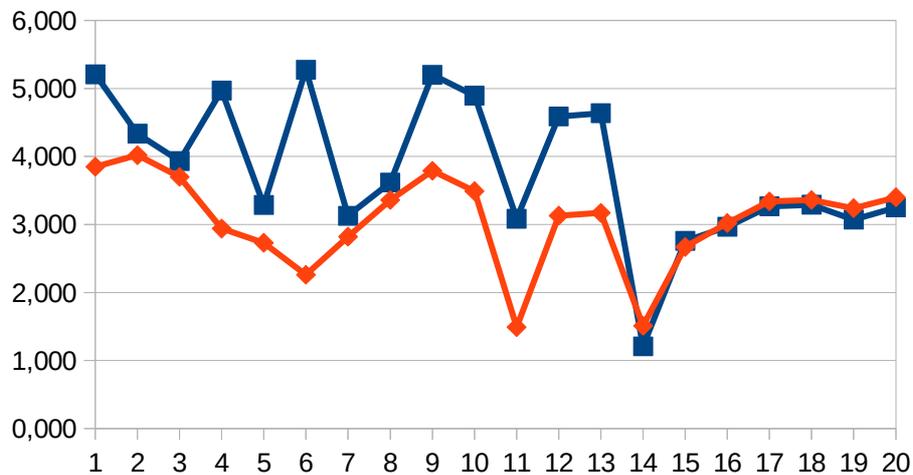
Fonte: O autor.

Figura 17: Comparação entre os pontos obtidos no terreno (azul) e os pontos obtidos a partir da nuvem de pontos (vermelho).



Fonte: O autor.

Figura 18: Comparação entre os pontos obtidos no terreno (azul) e os pontos obtidos a partir da nuvem de pontos (vermelho).



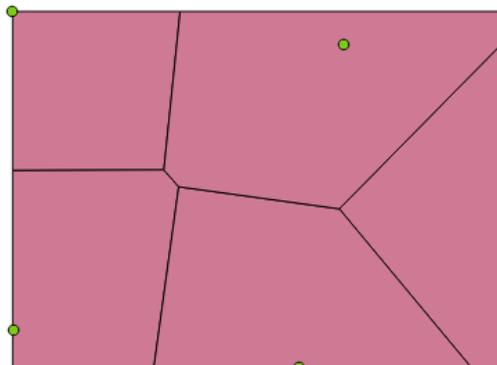
Fonte: O autor.

### 3.3.4 Geração dos Modelos Digitais de Elevação

A primeira etapa do processo de construção dos MDE é a escolha da estrutura de dados a ser utilizada. Foi escolhida a estrutura em grade regular, sendo os pontos das grades obtidos usando o interpolador do Vizinho Natural, apresentado em Li e Heap (2008). O processo de construção da grade regular foi executado no software *SAGA GIS*. O algoritmo do Vizinho Natural pode ser descrito da seguinte forma:

- Inicialmente, é construído o Diagrama de Voronoi para todos os pontos pertencentes à nuvem, conforme apresentado na figura 19;

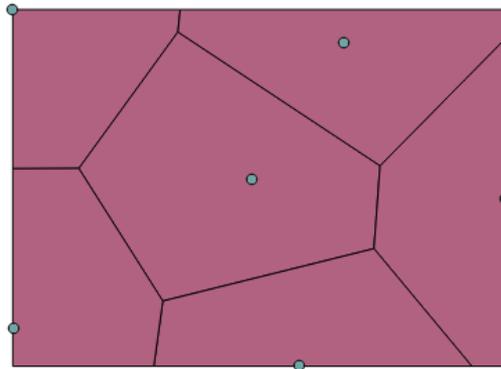
Figura 19: Diagrama de Voronoi para os pontos da nuvem.



Fonte: O autor.

- Logo após a construção do diagrama, é inserido o ponto ao qual se deseja interpolar, construindo-se um novo Diagrama de Voronoi, que considera o novo ponto em sua construção (figura 20);

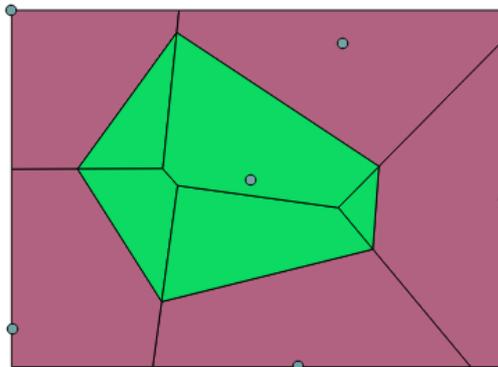
Figura 20: Novo Diagrama de Voronoi após inclusão do ponto a ser interpolado.



Fonte: O autor.

- Por último, é realizada a intersecção entre os dois diagramas. O percentual de área cedido do diagrama original ao novo diagrama é calculado, passando a ser o peso do interpolador (figura 21);

Figura 21: Percentual de área cedido pelo diagrama anterior ao novo diagrama.



Fonte: O autor.

- O valor da coordenada a ser interpolada é dado pela equação 46. O valor de  $a_i$  corresponde ao valor de área cedido por cada um dos vizinhos ( $x_i$ ) enquanto que  $f(x_i)$  o valor da coordenada z de cada um dos vizinhos (LIANG; HALE, 2010).

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot f(x_i)}{\sum_n a_i} \quad (46)$$

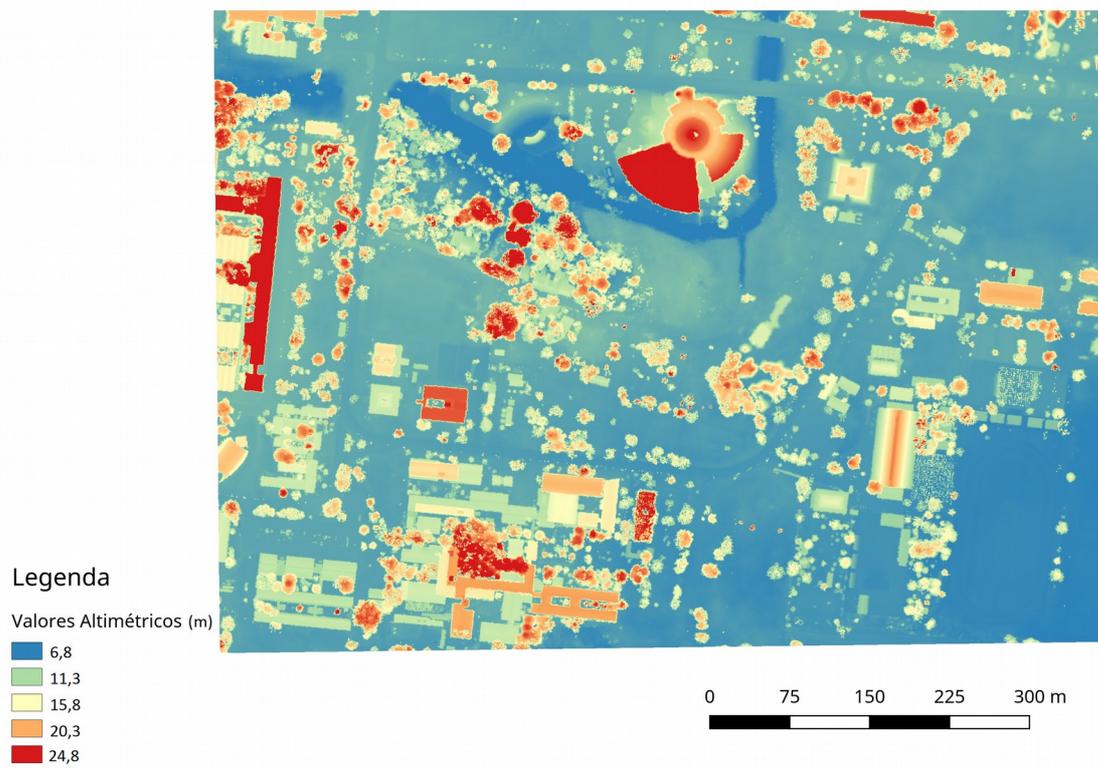
Em relação à resolução da grade utilizada para a interpolação, foram utilizados os valores presentes na ET-PCDG (2016). Estes foram referentes à escala 1:1.000, visto que esta resolução é compatível para todas as demais escalas. Os valores então utilizados encontram-se na tabela 10. Um exemplo do modelo digital gerado pode ser observado nas figuras 22 e 23. Na figura 22, há a representação do modelo em formato *raster*, enquanto que na figura 23, há a representação tridimensional da grade regular.

Tabela 9: Resolução utilizada para construção das grades regulares.

Resolução Espacial (m)	
Máxima	0,1
Usual	0,5
Mínima	2,0

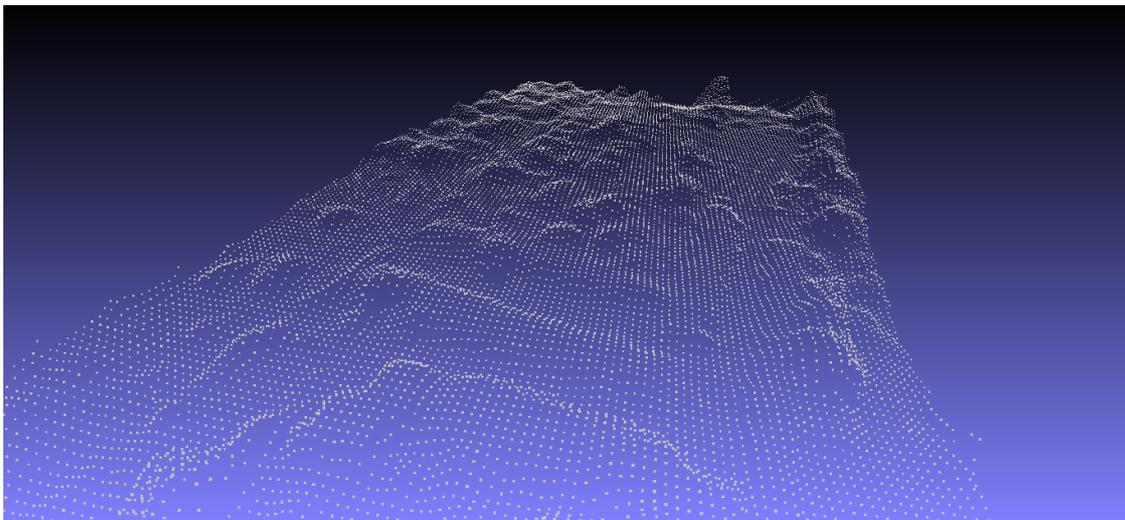
Fonte: ET-PCDG (2016)

Figura 22: Representação do modelo digital em formato *raster*.



Fonte: O autor.

Figura 23: Ggrade regular.



Fonte: O autor.

### 3.3.5 Realização dos Experimentos

Os experimentos foram realizados conforme os seguintes procedimentos:

- Os pontos de verificação altimétrica foram interpolados dentro dos modelos digitais utilizando um interpolador Spline Bicúbico. Este interpolador utiliza 16 pontos da grade regular para estimar o valor do ponto, conforme a equação 47 (LI, ZHU e GOLD, 2005);

$$z = f(x, y) = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 a_{i,j} \cdot x^i \cdot y^j \quad (47)$$

- Foram realizados os testes de normalidade, a partir dos gráficos quantil-quantil, coeficientes de curtose e assimetria e por último o teste de Shapiro-Wilk;
- Verificou-se a presença de valores *outliers* dentro da amostra, utilizando-se o método boxplot ajustado. Foi realizado novamente os testes de normalidades, sendo que agora os dados encontram-se com os valores *outliers* removidos;
- Calculou-se as seguintes medidas estatísticas, tanto para os dados brutos, quanto para os dados sem *outliers*: média amostral; desvio padrão amostral; raiz do erro médio quadrático; mediana; desvio absoluto da mediana normalizado; e intervalo quartílico;
- Realizou-se análises de tendência, precisão e de classificação conforme o PEC-PCD, em ambos os conjuntos de dados.

#### 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados durante a pesquisa, tendo sido estruturados de acordo com cada produto a ser analisado, bem como pela resolução espacial de cada um dos Modelos Digitais de Elevação.

Para os experimentos foi utilizado como a grandeza “erro” a diferença entre os valores medidos no terreno e os pontos interpolados dentro dos MDE.

As tabelas 10 e 11, ilustradas abaixo, apresentam o resultado obtido através da interpolação e os resultados obtidos através das medições.

Para critério de padronização, os dados referentes aos modelos gerados usando câmera de pequeno formato serão denominados de MDE 1, enquanto que os modelos gerados usando *Lidar*, de MDE 2.

Tabela 10: Resultado do processo de interpolação para os modelos gerados a partir de dados obtidos por Visão Computacional.

Id	Tipo de Dado		MDS			MDT		
	Resolução	Grade	0.1 m	0.5 m	2.0 m	0.1 m	0.5 m	2.0 m
	h (Terreno)	h (Modelo)						
P01	8,414	7,396	7,403	7,419	7,388	7,413	7,487	
P02	14,725	15,921	15,971	16,299	9,086	9,086	9,070	
P03	10,255	9,958	9,962	10,056	10,049	10,049	10,089	
P04	11,297	12,083	12,305	13,873	11,228	11,224	11,188	
P05	15,228	15,049	15,049	15,695	14,916	14,916	14,920	
P06	16,718	17,430	17,445	17,654	16,706	16,706	16,710	
P07	16,938	17,146	17,167	17,645	17,430	17,435	17,417	
P08	18,216	18,865	18,965	20,546	18,149	18,149	18,152	
P09	20,107	21,100	21,123	22,363	18,311	18,312	18,315	
P10	20,070	20,410	20,410	20,468	20,474	20,476	20,494	
P11	22,307	22,802	22,846	23,142	21,236	21,235	21,225	
P12	21,489	22,269	22,271	22,446	21,199	21,202	21,227	
P13	21,421	22,239	22,281	22,825	22,230	22,229	22,219	
P14	21,427	22,238	22,277	22,821	22,232	22,231	22,221	
P15	26,857	27,551	27,542	27,535	27,505	27,499	27,503	
P16	26,451	26,804	26,869	27,228	26,707	26,709	26,699	
P17	25,753	28,398	28,408	28,490	28,114	28,084	27,820	
P18	26,468	27,253	27,252	27,767	26,970	26,970	26,974	
P19	22,298	22,163	22,411	23,350	23,008	23,012	23,046	
P20	23,056	23,700	23,695	23,651	23,363	23,377	23,527	
P21	23,020	22,471	22,448	22,527	22,561	22,561	22,564	
P22	22,652	24,402	24,444	24,558	24,641	24,640	24,648	
P23	22,393	23,010	23,044	22,865	23,286	23,128	23,225	
P24	22,224	22,305	22,342	22,796	22,125	22,117	22,164	
P25	24,866	26,384	26,392	26,237	25,945	25,932	25,716	
P26	23,805	24,467	24,462	24,328	24,286	24,286	24,290	
P27	22,771	23,606	23,610	23,814	23,840	23,839	23,833	
P28	21,330	20,771	20,785	20,996	20,736	20,755	20,735	
P29	21,550	20,985	20,990	20,944	20,947	20,955	20,969	
P30	21,520	21,213	21,207	21,206	20,631	20,632	20,648	

Fonte: O autor.

Tabela 11: Resultado do processo de interpolação para os modelos gerados a partir de dados obtidos por *Lidar*.

Id	Tipo de Dado	MDS			MDT		
	Resolução Grade	0.1 m	0.5 m	2.0 m	0.1 m	0.5 m	2.0 m
	h (Terreno)	h( Modelo)					
P01	5,208	13,007	13,345	16,508	3,918	3,918	3,909
P02	4,335	16,452	16,156	14,545	4,027	4,030	4,034
P03	3,934	3,738	3,748	5,242	3,692	3,692	3,696
P04	4,970	13,723	11,406	8,611	2,895	2,897	2,887
P05	3,287	2,744	2,743	3,655	2,731	2,719	2,683
P06	5,275	2,298	2,301	3,135	2,282	2,276	2,248
P07	3,128	2,858	2,850	3,044	2,807	2,804	2,775
P08	3,618	3,465	3,462	3,693	3,359	3,356	3,333
P09	5,201	3,808	3,803	3,769	3,796	3,791	3,729
P10	4,893	3,547	3,548	3,516	3,503	3,498	3,486
P11	3,084	1,620	1,606	1,516	1,483	1,481	1,456
P12	4,587	3,428	3,296	3,267	3,086	3,086	3,038
P13	4,636	3,237	3,211	3,098	3,152	3,149	3,065
P14	1,207	1,565	1,558	2,047	1,509	1,502	1,490
P15	2,758	3,425	6,090	6,625	2,727	2,728	2,759
P16	2,966	3,075	3,079	3,251	3,022	3,032	2,999
P17	3,267	3,367	3,363	3,322	3,346	3,339	3,300
P18	3,290	3,414	3,393	3,335	3,294	3,290	3,263
P19	3,071	3,218	3,194	3,159	3,127	3,130	3,091
P20	3,250	3,462	3,455	3,394	3,395	3,387	3,324

Fonte: O autor.

#### 4.1 TESTE DE NORMALIDADE

Os resultados para os testes de normalidade podem ser visualizados na tabela 12. Percebe-se que:

- Para o MDE 1, tem-se que os coeficientes de curtose e assimetria mostram que a hipótese de normalidade pode ser considerada válida para MDS, em qualquer resolução, o que não se observa no MDT. Este resultado é confirmado com o teste de Shapiro-Wilk que mostra que a distribuição pode ser considerada como normal para o MDS e não normal para o MDT. Analisando os gráficos quantil-quantil (figura 24), percebe-se um desvio da distribuição normal em cada um dos experimentos;
- O MDE 2 apresenta para o MDS altos valores de curtose e assimetria, o que implica que os dados não devem seguir a distribuição normal. Este resultado é confirmado pelo teste de Shapiro-Wilk. Contudo, para o MDT, percebe-se que os coeficientes de curtose e assimetria mostram que os dados podem ter distribuição normal. Usando o teste de Shapiro-Wilk, tem-se que a distribuição pode ser considerada como não normal, tanto para o MDS quanto para o MDT. Analisando também os gráficos quantil-quantil (figura 25), nota-se um desvio da

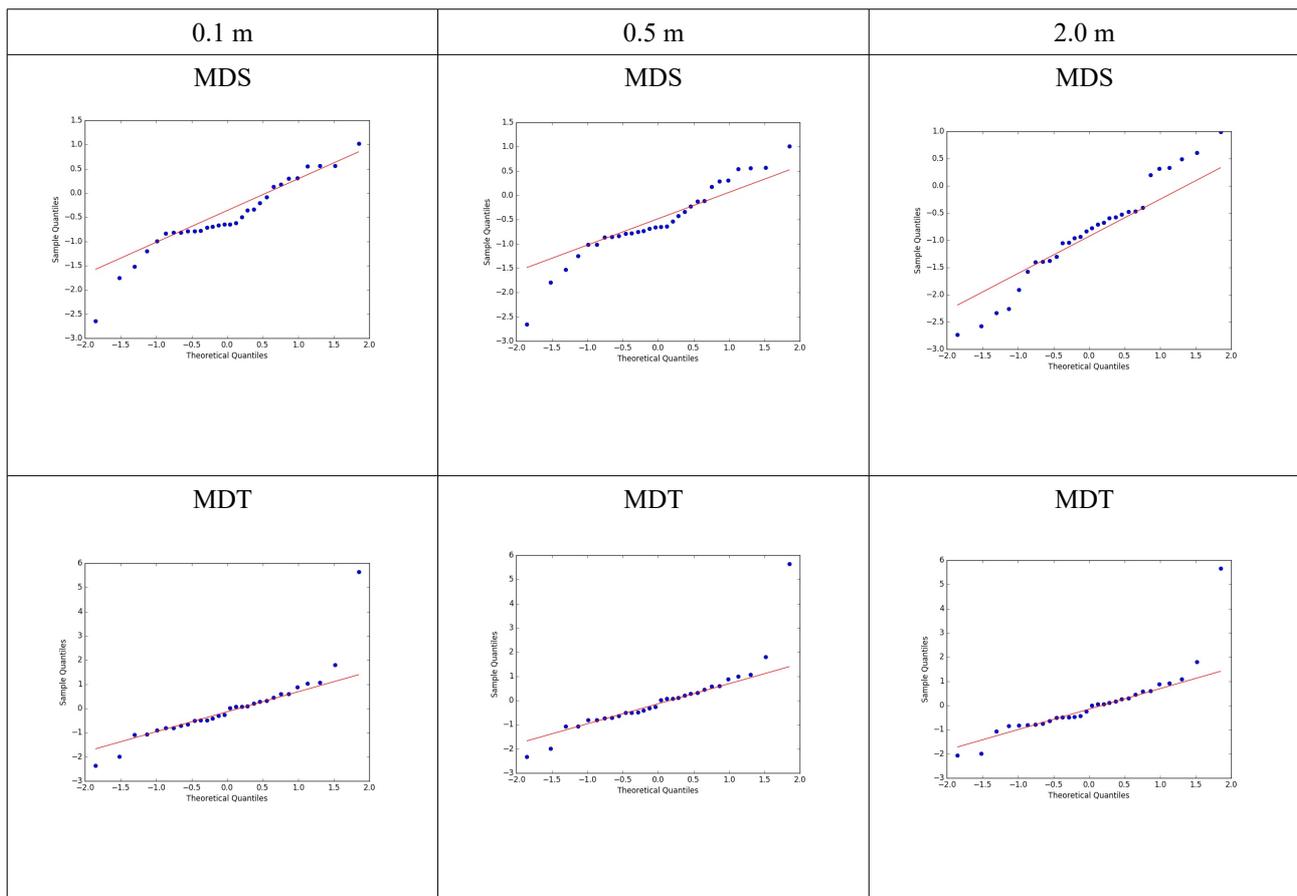
distribuição normal em cada um dos experimentos, confirmando os resultados do teste de Shapiro-Wilk;

Tabela 12: Resultados dos testes de normalidade.

	Tipo de Modelo		MDS			MDT		
	Resolução Espacial do Modelo		0.1 m	0.5 m	2.0 m	0.1 m	0.5 m	2.0 m
MDE 1	Coeficiente de Curtose		3,791	3,704	2,601	10,571	10,717	11,212
	Coeficiente de Assimetria		-0,413	-0,342	-0,106	2,150	2,181	2,331
	Teste de Shapiro-Wilk	W Calculado	0,951	0,958	0,974	0,803	0,798	0,780
		W Referência	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927
MDE 2	Coeficiente de Curtose		5,352	5,322	5,631	2,810	2,815	2,768
	Coeficiente de Assimetria		-1,897	-1,803	-1,902	0,829	0,830	0,820
	Teste de Shapiro-Wilk	W Calculado	0,669	0,725	0,712	0,876	0,875	0,871
		W Referência	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905

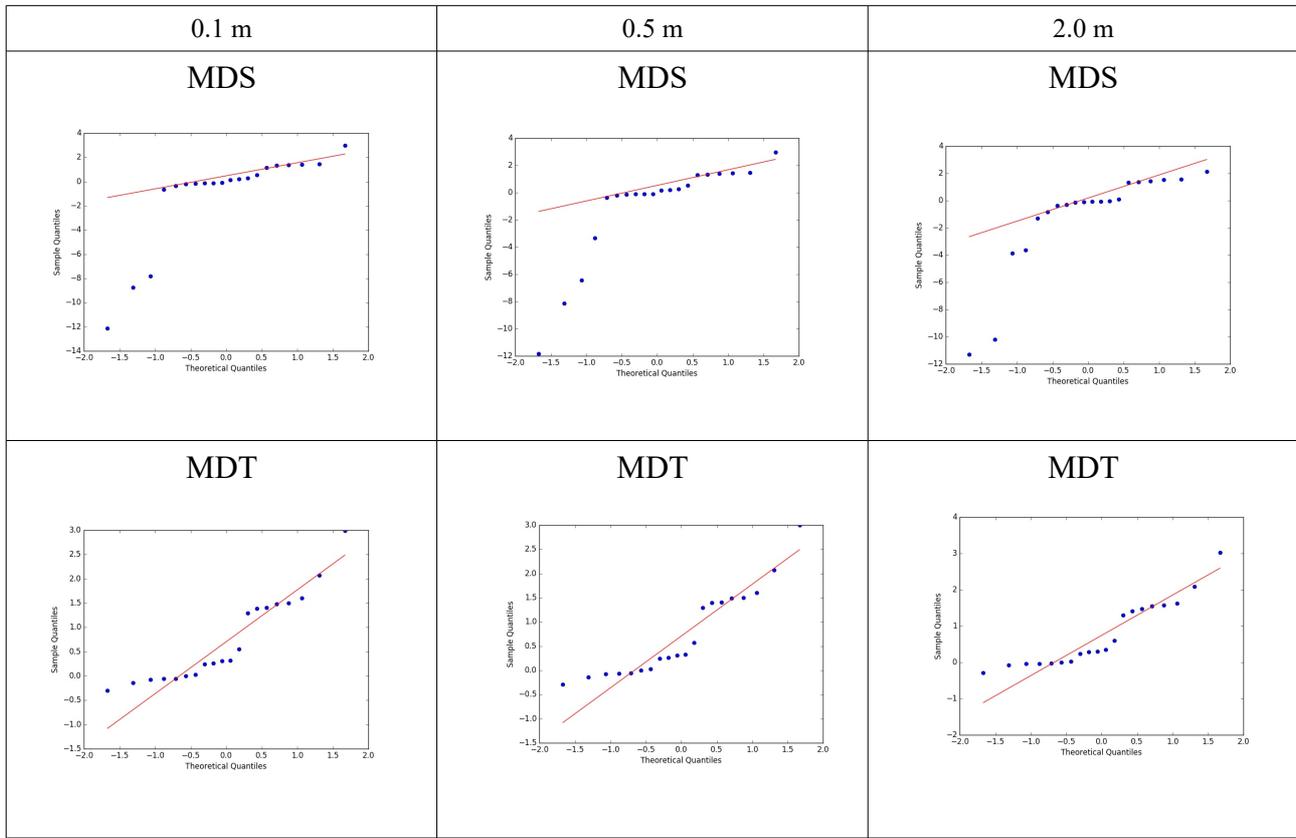
Fonte: O autor.

Figura 24: Gráficos quantil-quantil para os MDE 1.



Fonte: O autor.

Figura 25: Gráficos quantil-quantil para os MDE 2.



Fonte: O autor.

## 4.2 DETECÇÃO DE OUTLIERS

A detecção de *outliers* foi realizada usando como técnica o método boxplot ajustado, visto na seção 2.2.1.6. Nos quadros 5 e 6 é possível visualizar quais pontos foram considerados *outliers*, marcados com “sim”.

Realizando uma análise sobre estes pontos percebe-se que, em sua grande maioria, encontram-se localizados em regiões próximas de vegetação e edificações, o que pode ser considerado algo esperado, visto que tanto a Visão Computacional, quanto o *Lidar*, podem ocorrer erros de processamento. Na Visão Computacional problemas como oclusões ou pontos visíveis em poucas imagens pode reduzir a qualidade da reconstrução tridimensional enquanto que no *Lidar* pode haver erros de avaliação dos pulsos, principalmente nas proximidades de prédios e vegetação alta.

Quadro 5: Resultado do filtro de detecção de outliers.

	Tipo de Modelo		MDS			MDT		
	Resolução Espacial do Modelo	0.1 m	0.5 m	2.0 m	0.1 m	0.5 m	2.0 m	
MDE 1	P01	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P02	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	
	P03	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P04	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	
	P05	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P06	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P07	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P08	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P09	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	
	P10	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P11	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	
	P12	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P13	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P14	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P15	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P16	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P17	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	
	P18	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P19	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P20	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P21	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P22	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	
	P23	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P24	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P25	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	
	P26	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P27	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P28	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P29	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P30	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
<b>Total Detectado</b>		<b>5</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	

Fonte: O autor.

Quadro 6: Resultado do filtro de detecção de outliers.

	Tipo de Modelo		MDS			MDT		
	Resolução Espacial do Modelo	0.1 m	0.5 m	2.0 m	0.1 m	0.5 m	2.0 m	
MDE 2	P01	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	
	P02	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	
	P03	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P04	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	
	P05	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P06	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P07	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P08	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P09	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P10	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P11	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P12	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P13	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	
	P14	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	
	P15	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	
	P16	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P17	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P18	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	
	P19	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
	P20	Não	Não	Não	Não	Não	Não	
<b>Total Detectado</b>		<b>4</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	

Fonte: O autor.

Com o objetivo de se verificar a relação entre os valores *outliers* e a distribuição normal, foram realizados novamente os testes de normalidade nos dados sem os valores *outliers*. Os resultados

encontram-se presentes na tabela 13 e nas figuras 26 e 27. Pelos resultados encontrados percebe-se que:

- Os testes de normalidade, para o MDE 1, mostram que o MDS apresentou que a distribuição pode ser considerada como não normal, diferentemente do que foi apresentado anteriormente. Já o MDT apresentou que a distribuição pode ser considerada como normal, também diferente do foi apresentado anteriormente;
- Os testes de normalidade, para o MDE 2, mostram que tanto o MDS, quanto o MDT apresentam que a distribuição pode ser considerada como não normal, resultados comprovados pelos gráficos quantil-quantil normal.

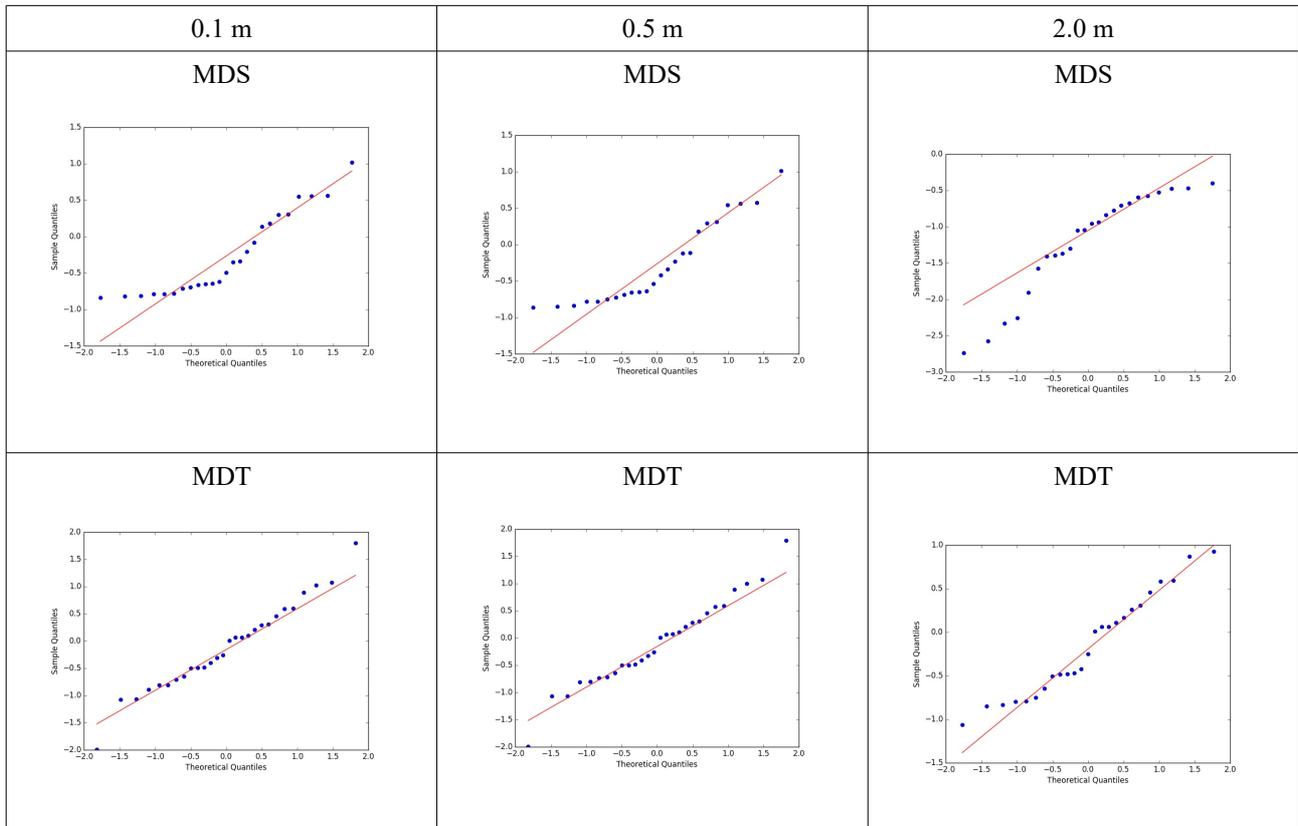
Pela comparação apresentado pelos testes de normalidade, com dados originais e dados sem os valores *outliers*, percebe-se que estes valores têm a capacidade de interferir nos resultados dos testes de normalidade. Todavia, conclui-se que estes não são os únicos responsáveis por alterar a distribuição dos erros altimétricos, como pôde ser observado no MDE 2, sugerindo que a distribuição não pode ser considerada como normal.

Tabela 13: Resultado dos testes de normalidade.

	Tipo de Modelo		MDS			MDT		
	Resolução Espacial do Modelo		0.1 m	0.5 m	2.0 m	0.1 m	0.5 m	2.0 m
MDE 1	Coeficiente de Curtose		2,256	2,285	2,600	3,120	3,195	1,927
	Coeficiente de Assimetria		0,735	0,746	-0,860	0,126	0,125	0,282
	Teste de Shapiro-Wilk	W Calculado	0,866	0,874	0,889	0,986	0,984	0,946
		W Referência	0,918	0,916	0,916	0,924	0,924	0,918
		Coeficiente de Curtose	3,532	3,390	3,827	2,774	2,693	2,731
MDE 2	Coeficiente de Assimetria		1,064	1,025	-1,541	0,806	0,733	0,798
	Teste de Shapiro-Wilk	W Calculado	0,852	0,848	0,672	0,868	0,880	0,859
		W Referência	0,887	0,887	0,866	0,901	0,897	0,901

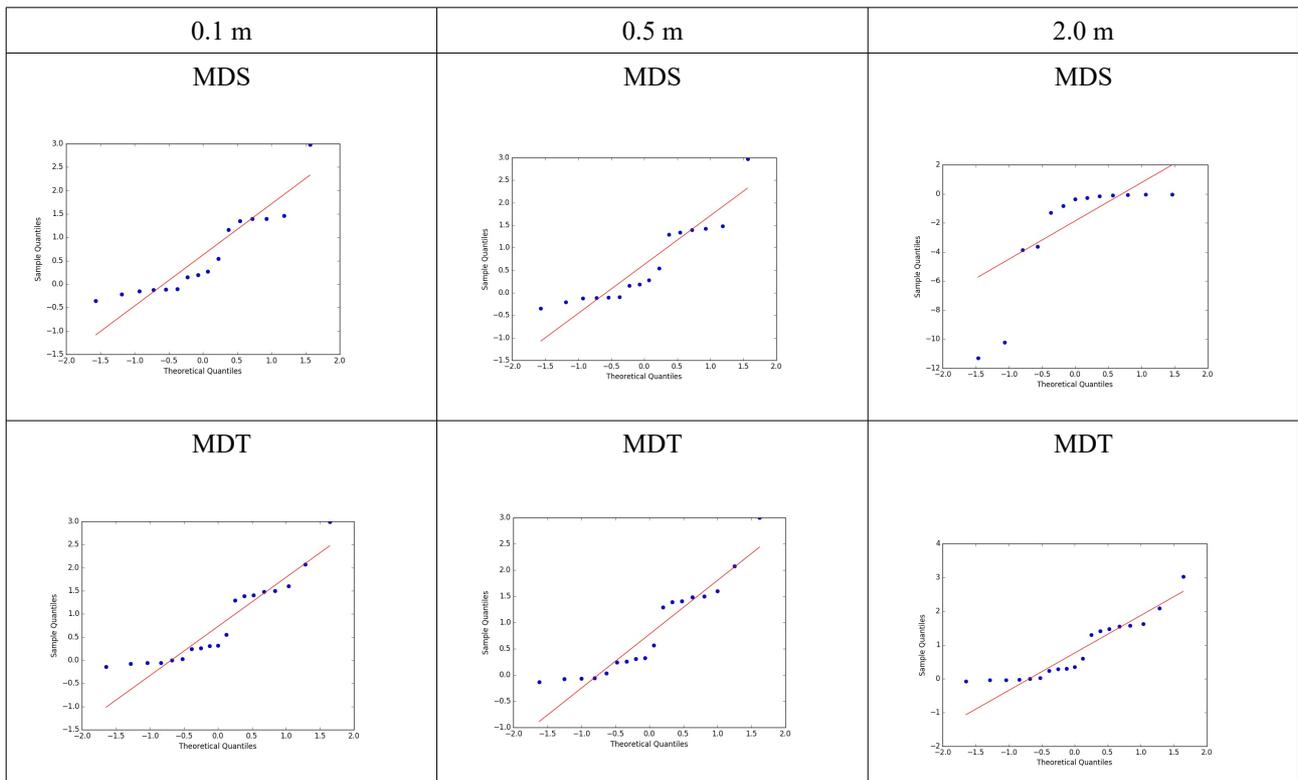
Fonte: O autor.

Figura 26: Gráficos quantil-quantil para os MDE 1.



Fonte: O autor.

Figura 27: Gráficos quantil-quantil para os MDE 2.



Fonte: O autor.

### 4.3 MEDIDAS ESTATÍSTICAS

O próximo experimento realizado tem como objetivo verificar a influência de valores *outliers* em medidas de tendência central e dispersão. São apresentados nas tabelas 14 e 15 os valores referentes à média, desvio-padrão, raiz do erro médio quadrático, mediana, desvio absoluto normalizado da mediana e intervalo quartílico.

Os valores são apresentados, inicialmente, utilizando todos os pontos amostrais. Logo a seguir são retirados os pontos detectados como *outliers* e apresentados os valores sem estes pontos.

Percebe-se pelos experimentos que os valores como média, desvio-padrão e raiz do erro médio quadrático apresentam, no geral, uma maior variação ao se comparar com medidas como mediana, desvio absoluto normalizado da mediana (NMAD) e intervalo quartílico. Por exemplo, na tabela 14, percebe-se que o MDT com resolução de 0,1 m, a média oscilou 551,8%, enquanto que a mediana oscilou 0,00 %. Neste mesmo exemplo o desvio padrão oscilou 41,74%, o REMQ oscilou 41,29%, enquanto que o NMAD oscilou 5,3% e o IQR oscilou 9,36%. No entanto, podem ser observadas exceções na tabela 15, onde a mediana mostrou, em alguns casos, uma maior sensibilidade com a remoção de *outliers*, quando comparado com a média, por exemplo. Isto ocorreu por exemplo com o MDS, resolução de 0,1m, onde a média oscilou 36,81% e a mediana oscilou 779,25%.

Este fato pode ser justificado pelo fato que a mediana se torna mais sensível a *outliers* quando a retirada destes valores não ocorre de maneira simétrica. Um exemplo pode ser observado na figura 28, onde mostra o histograma da amostra correspondente ao MDS com resolução de 0,1 m do MDE 2, antes e depois da remoção dos valores *outliers*. Percebe-se que a retirada destes valores ocorreu de forma assimétrica, ocorrendo mais à esquerda do histograma, o que deslocou a posição da mediana. Logo, a mediana se torna um estimador robusto quando a retirada de valores *outliers* ocorre de maneira simétrica, ou seja, de forma equilibrada tanto a direita quanto a esquerda do histograma (figura 29), onde mostra o histograma da amostra correspondente ao MDT com resolução de 0,5 m do MDE 1. Entende-se como robustez a capacidade de um procedimento estatístico de resistir a desvios de suposições.

Tabela 14: Medidas de tendência central e dispersão calculados para o MDE 1.

<b>Modelo Digital de Superfície</b>			
Resolução Espacial		0.1 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	30,000	25,000	16,67%
Média	-0,492	-0,266	45,86%
DP	0,760	0,558	26,61%
REMQ	0,895	0,608	32,04%
Mediana	-0,647	-0,495	23,43%
NMAD	0,484	0,431	10,87%
IQR	0,886	0,891	0,59%
Resolução Espacial		0.5 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	30,000	24,000	20,00%
Média	-0,525	-0,271	48,36%
DP	0,765	0,563	26,43%
REMQ	0,917	0,614	33,05%
Mediana	-0,654	-0,479	26,83%
NMAD	0,531	0,494	6,98%
IQR	0,733	0,940	28,24%
Resolução Espacial		2.0 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	30,000	24,000	20,00%
Média	-0,864	-1,202	39,18%
DP	0,938	0,702	25,13%
REMQ	1,263	1,385	9,62%
Mediana	-0,806	-1,000	24,07%
NMAD	0,784	0,600	23,53%
IQR	0,920	0,789	14,21%
<b>Modelo Digital de Terreno</b>			
Resolução Espacial		0.1 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	30,000	28,000	6,67%
Média	0,011	-0,105	866,91%
DP	1,378	0,803	41,74%
REMQ	1,355	0,796	41,29%
Mediana	-0,122	-0,122	0,00%
NMAD	0,867	0,821	5,30%
IQR	1,117	1,012	9,36%
Resolução Espacial		0.5 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	30,000	28,000	6,67%
Média	0,016	-0,101	551,80%
DP	1,372	0,795	42,05%
REMQ	1,349	0,787	41,63%
Mediana	-0,123	-0,123	0,00%
NMAD	0,870	0,816	6,14%
IQR	1,118	1,009	9,79%
Resolução Espacial		2.0 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	30,000	25,000	16,67%
Média	0,018	-0,157	789,27%
DP	1,356	0,580	57,20%
REMQ	1,333	0,590	55,75%
Mediana	-0,120	-0,248	106,67%
NMAD	0,893	0,741	16,94%
IQR	1,142	0,908	20,46%

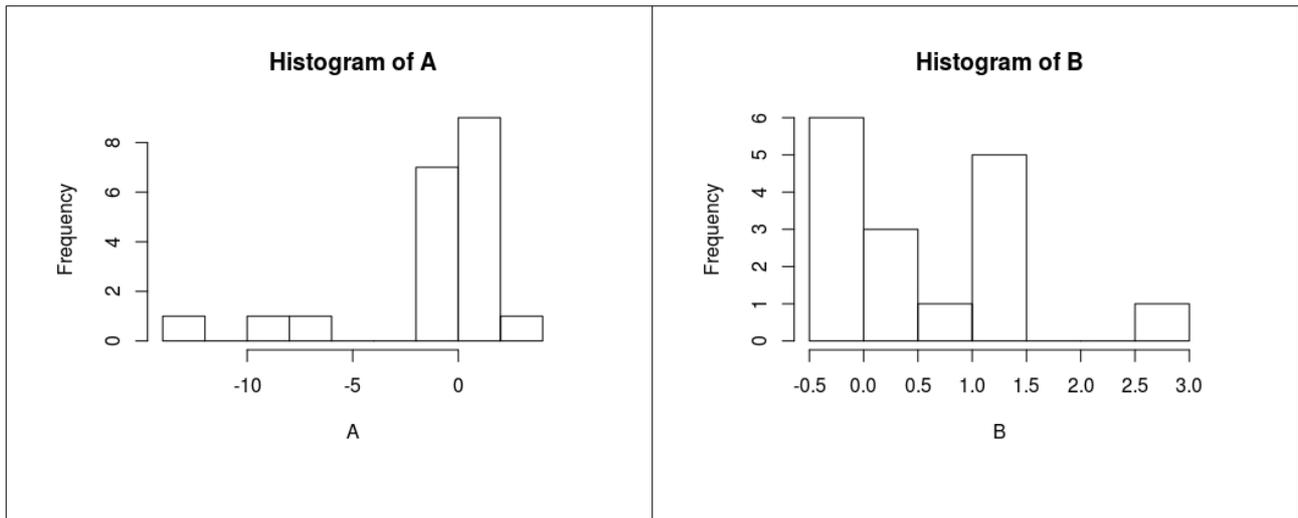
Fonte: O autor.

Tabela 15: Medidas de tendência central e dispersão calculados para o MDE 2.

<b>Modelo Digital de Superfície</b>			
Resolução Espacial		0.1 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	20,000	16,000	20,00%
Média	-0,974	0,616	36,81%
DP	3,869	0,919	76,26%
REMQ	3,895	1,082	72,23%
Mediana	0,027	0,233	779,25%
NMAD	0,897	0,612	31,82%
IQR	1,454	1,471	1,12%
Resolução Espacial		0.5 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	20,000	16,000	20,00%
Média	-0,982	0,630	35,83%
DP	3,687	0,923	74,97%
REMQ	3,726	1,094	70,65%
Mediana	0,030	0,232	673,33%
NMAD	1,316	0,587	55,38%
IQR	1,546	1,464	5,32%
Resolução Espacial		2.0 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	20,000	13,000	35,00%
Média	-1,138	-2,479	117,76%
DP	3,642	3,904	7,21%
REMQ	3,728	4,496	20,62%
Mediana	-0,082	-0,368	351,53%
NMAD	1,948	0,479	75,42%
IQR	2,291	3,553	55,07%
<b>Modelo Digital de Terreno</b>			
Resolução Espacial		0.1 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	20,000	19,000	5,00%
Média	0,741	0,796	7,41%
DP	0,907	0,897	1,09%
REMQ	1,153	1,181	2,42%
Mediana	0,315	0,321	2,07%
NMAD	0,632	0,593	6,21%
IQR	1,442	1,431	0,75%
Resolução Espacial		0.5 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	20,000	18,000	10,00%
Média	0,743	0,842	13,32%
DP	0,908	0,902	0,57%
REMQ	1,155	1,216	5,24%
Mediana	0,315	0,446	41,81%
NMAD	0,621	0,816	31,38%
IQR	1,444	1,385	4,10%
Resolução Espacial		2.0 m	
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>	Variação
Nº de amostras	20,000	19,000	5,00%
Média	0,770	0,825	7,20%
DP	0,912	0,902	1,13%
REMQ	1,176	1,205	2,45%
Mediana	0,327	0,353	7,95%
NMAD	0,564	0,572	1,45%
IQR	1,497	1,498	0,03%

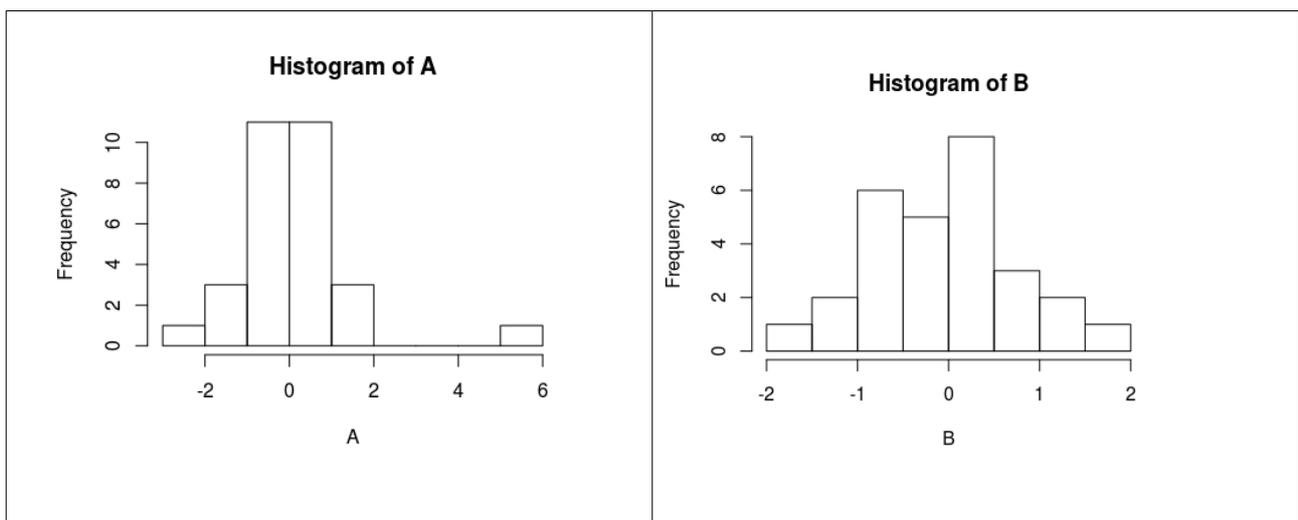
Fonte: O autor.

Figura 28: Gráfico apresentado o efeito da retirada de valores *outliers* para o histograma. Percebe-se a remoção destes valores foi fortemente nos valores negativos, o que causou o deslocamento da mediana para a direita.



Fonte: O autor.

Figura 29 Resultado da retirada de valores *outliers* para o histograma. Percebe-se a remoção destes valores foi feito de forma simétrica, o que manteve a mediana inalterada.



Fonte: O autor.

#### 4.4 CLASSIFICAÇÃO PEC-PCD

O processo de classificação do PEC-PCD foi realizado, inicialmente, considerando os dados brutos e, depois, reclassificado sem os valores *outliers*. Os resultados obtidos podem ser visualizados nas tabelas 16 e 17. A classificação foi realizada conforme apresentado no PEC, onde 90% dos pontos tem que ter valor inferior ao PEC estabelecido para este ser considerado pertencente a uma determinada categoria. Os valores de EP encontram-se presentes na tabela 18.

Percebe-se, pela análise das tabelas, variações de classificação, tendo situações, por exemplo, em que um dado que antes possuía classificação PEC-PCD inferior a D passou a ter classificação PEC-PCD B, como observado para o MDS com resolução de 0,1 m na tabela 16. Na tabela 17

percebe-se também resultados semelhantes, como o observado para o MDS com resolução de 0,5m, onde o dado sofre, para escala de 1:25.000, mudança de classificação de inferior a D para categoria A.

Sobre o processo de classificação do PEC-PCD este apenas verifica se uma determinada quantidade de pontos encontram-se dentro do intervalo previsto, sem contudo verificar os pontos que foram rejeitados fora do intervalo. É possível ocorrer situações onde o dado pode ser classificado em uma determinada categoria e existir pontos com discrepâncias consideráveis dentro dos 10% dos pontos rejeitados pela classificação.

Tabela 16: Classificação do PEC-PCD para o MDE 1.

Modelo Digital de Superfície				Modelo Digital de Terreno			
Resolução Espacial			0,1 m	Resolução Espacial			0,1 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers	Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers
1:1.000	1	Inferior D	Inferior D	1:1.000	1	Inferior D	Inferior D
1:2.000	1	Inferior D	Inferior D	1:2.000	1	Inferior D	Inferior D
1:5.000	2	Inferior D	B	1:5.000	2	Inferior D	C
1:10.000	5	B	A	1:10.000	5	B	A
1:25.000	10	A	A	1:25.000	10	A	A
1:50.000	20	A	A	1:50.000	20	A	A
1:100.000	50	A	A	1:100.000	50	A	A
1:250.000	100	A	A	1:250.000	100	A	A
Resolução Espacial			0,5 m	Resolução Espacial			0,5 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers	Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers
1:1.000	1	Inferior D	Inferior D	1:1.000	1	Inferior D	Inferior D
1:2.000	1	Inferior D	Inferior D	1:2.000	1	Inferior D	Inferior D
1:5.000	2	Inferior D	B	1:5.000	2	Inferior D	C
1:10.000	5	B	A	1:10.000	5	B	A
1:25.000	10	A	A	1:25.000	10	A	A
1:50.000	20	A	A	1:50.000	20	A	A
1:100.000	50	A	A	1:100.000	50	A	A
1:250.000	100	A	A	1:250.000	100	A	A
Resolução Espacial			2,0 m	Resolução Espacial			2,0 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers	Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers
1:1.000	1	Inferior D	Inferior D	1:1.000	1	Inferior D	Inferior D
1:2.000	1	Inferior D	Inferior D	1:2.000	1	Inferior D	Inferior D
1:5.000	2	Inferior D	Inferior D	1:5.000	2	Inferior D	B
1:10.000	5	B	B	1:10.000	5	B	A
1:25.000	10	A	A	1:25.000	10	A	A
1:50.000	20	A	A	1:50.000	20	A	A
1:100.000	50	A	A	1:100.000	50	A	A
1:250.000	100	A	A	1:250.000	100	A	A

Fonte: O autor.

Tabela 17: Classificação do PEC-PCD para o MDE 2.

Modelo Digital de Superfície				Modelo Digital de Terreno			
Resolução Espacial			0,1 m	Resolução Espacial			0,1 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers	Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers
1:1.000	1	Inferior D	Inferior D	1:1.000	1	Inferior D	Inferior D
1:2.000	1	Inferior D	Inferior D	1:2.000	1	Inferior D	Inferior D
1:5.000	2	Inferior D	D	1:5.000	2	Inferior D	Inferior D
1:10.000	5	Inferior D	B	1:10.000	5	B	B
1:25.000	10	Inferior D	A	1:25.000	10	A	A
1:50.000	20	B	A	1:50.000	20	A	A
1:100.000	50	A	A	1:100.000	50	A	A
1:250.000	100	A	A	1:250.000	100	A	A
Resolução Espacial			0,5 m	Resolução Espacial			0,5 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers	Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers
1:1.000	1	Inferior D	Inferior D	1:1.000	1	Inferior D	Inferior D
1:2.000	1	Inferior D	Inferior D	1:2.000	1	Inferior D	Inferior D
1:5.000	2	Inferior D	D	1:5.000	2	Inferior D	Inferior D
1:10.000	5	Inferior D	B	1:10.000	5	B	B
1:25.000	10	Inferior D	A	1:25.000	10	A	A
1:50.000	20	B	A	1:50.000	20	A	A
1:100.000	50	A	A	1:100.000	50	A	A
1:250.000	100	A	A	1:250.000	100	A	A
Resolução Espacial			2,0 m	Resolução Espacial			2,0 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers	Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem outliers
1:1.000	1	Inferior D	Inferior D	1:1.000	1	Inferior D	Inferior D
1:2.000	1	Inferior D	Inferior D	1:2.000	1	Inferior D	Inferior D
1:5.000	2	Inferior D	Inferior D	1:5.000	2	Inferior D	Inferior D
1:10.000	5	Inferior D	Inferior D	1:10.000	5	B	B
1:25.000	10	Inferior D	Inferior D	1:25.000	10	A	A
1:50.000	20	C	C	1:50.000	20	A	A
1:100.000	50	A	A	1:100.000	50	A	A
1:250.000	100	A	A	1:250.000	100	A	A

Fonte: O autor.

Tabela 18: Valores de EP para categoria do PEC-PCD.

Escala	EC (m)	EP (m)			
		A	B	C	D
1:1.000	1	0,17	0,33	0,4	0,5
1:2.000	1	0,17	0,33	0,4	0,5
1:5.000	2	0,34	0,66	0,8	1
1:10.000	5	0,84	1,67	2	2,5
1:25.000	10	1,67	3,33	4	5
1:50.000	20	3,33	6,66	8	10
1:100.000	50	8,33	16,66	20	25
1:250.000	100	16,67	33,33	40	50

Fonte: DSG (2016)

#### 4.5 ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Os testes de tendência foram realizados usando-se como valor de significância ( $\alpha$ ) 10%, conforme apresentado em Galo e Camargo (1994). Os valores de t calculados mostram variações significativas quando comparados os dados brutos com os dados sem valores *outliers*, contudo estas variações não foram suficiente para se alterar a análise, conforme visualizado na tabela 19.

Para o MDE 2 (tabela 20), observa-se que para o MDS, o resultado da análise de tendência foi influenciado pelos valores *outliers*, passando de sem tendência para tendência. Isto ocorreu devido ao fato que os *outliers* removidos compensavam a tendência, de tal forma que a análise apresentava resultado sem tendência. O MDT apresentou tendência para todos as resoluções.

Tabela 19: Resultado do análise de tendência para os MDE 1.

<b>Modelo Digital de Superfície</b>		
Resolução Espacial		0.1 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	-3,545	-2,388
t referência	1,699	1,711
Resultado	Tendência	Tendência
Resolução Espacial		0.5 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	-3,759	-2,360
t referência	1,699	1,714
Resultado	Tendência	Tendência
Resolução Espacial		2.0 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	-5,047	-8,391
t referência	1,699	1,714
Resultado	Tendência	Tendência
<b>Modelo Digital do Terreno</b>		
Resolução Espacial		0.1 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	0,043	-0,694
t referência	1,699	1,703
Resultado	Sem Tendência	Sem Tendência
Resolução Espacial		0.5 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	0,062	-0,675
t referência	1,699	1,703
Resultado	Sem Tendência	Sem Tendência
Resolução Espacial		2.0 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	0,072	-1,356
t referência	1,699	1,711
Resultado	Sem Tendência	Sem Tendência

Fonte: O autor.

Tabela 20: Resultado do análise de tendência para MDE 2.

<b>Modelo Digital de Superfície</b>		
Resolução Espacial		0.1 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	-1,126	2,681
t referência	1,729	1,753
Resultado	Sem Tendência	Tendência
Resolução Espacial		0.5 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	-1,191	2,731
t referência	1,729	1,753
Resultado	Sem Tendência	Tendência
Resolução Espacial		2.0 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	-1,398	-2,289
t referência	1,729	1,782
Resultado	Sem Tendência	Tendência
<b>Modelo Digital do Terreno</b>		
Resolução Espacial		0.1 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	3,651	3,865
t referência	1,729	1,734
Resultado	Tendência	Tendência
Resolução Espacial		0.5 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	3,661	3,958
t referência	1,729	1,740
Resultado	Tendência	Tendência
Resolução Espacial		2.0 m
	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
t calculado	3,776	3,990
t referência	1,729	1,734
Resultado	Tendência	Tendência

Fonte: O autor.

#### 4.6 ANÁLISE DE PRECISÃO

O último teste a ser realizado corresponde ao análise de precisão. Adotou-se como nível de significância( $\alpha$ ) 10%, conforme apresentado em Galo e Camargo (1994). O resultado obtido no teste pode ser visualizado nas tabelas 21 e 22. Este teste é ligado diretamente com a classificação do PEC-PCD. Percebe-se que a análise gerou resultado preciso em todos os experimentos, onde se foi possível classificar e que estes sofreram influência dos valores *outliers*. Por exemplo na tabela 21, com a remoção *outliers*, tem que para a análise do MDS na escala 1:5.000, com resolução de 0,1, a análise sofreu alteração de não se aplica para preciso. Este mesmo tipo de resultado encontra-se presente na tabela 22.

Tabela 21: Resultado do análise de precisão para o MDE 1.

<b>Modelo Digital de Superfície</b>			
Resolução Espacial			0,1 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Preciso
1:10.000	5	Preciso	Preciso
1:25.000	10	Preciso	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
Resolução Espacial			0,5 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Preciso
1:10.000	5	Preciso	Preciso
1:25.000	10	Preciso	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
Resolução Espacial			2,0 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Não se aplica
1:10.000	5	Preciso	Preciso
1:25.000	10	Preciso	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
<b>Modelo Digital de Terreno</b>			
Resolução Espacial			0,1 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Preciso
1:10.000	5	Preciso	Preciso
1:25.000	10	Preciso	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
Resolução Espacial			0,5 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Preciso
1:10.000	5	Preciso	Preciso
1:25.000	10	Preciso	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
Resolução Espacial			2,0 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Preciso
1:10.000	5	Preciso	Preciso
1:25.000	10	Preciso	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso

Fonte: O autor.

Tabela 22: Resultado do análise de precisão para o MDE 2.

<b>Modelo Digital de Superfície</b>			
Resolução Espacial			0,1 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Preciso
1:10.000	5	Não se aplica	Preciso
1:25.000	10	Não se aplica	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
Resolução Espacial			0,5 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Preciso
1:10.000	5	Não se aplica	Preciso
1:25.000	10	Não se aplica	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
Resolução Espacial			2,0 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Não se aplica
1:10.000	5	Não se aplica	Não se aplica
1:25.000	10	Não se aplica	Não se aplica
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
<b>Modelo Digital de Terreno</b>			
Resolução Espacial			0,1 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Não se aplica
1:10.000	5	Preciso	Preciso
1:25.000	10	Preciso	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
Resolução Espacial			0,5 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Não se aplica
1:10.000	5	Preciso	Preciso
1:25.000	10	Preciso	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso
Resolução Espacial			2,0 m
Escala	EC (m)	Dados Brutos	Dados sem <i>outliers</i>
1:1.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:2.000	1	Não se aplica	Não se aplica
1:5.000	2	Não se aplica	Não se aplica
1:10.000	5	Preciso	Preciso
1:25.000	10	Preciso	Preciso
1:50.000	20	Preciso	Preciso
1:100.000	50	Preciso	Preciso
1:250.000	100	Preciso	Preciso

Fonte: O autor.

#### 4.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ACURÁCIA A PARTIR DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA E PRECISÃO

É possível obter uma estimativa de acurácia do MDE, a partir dos resultados dos testes de tendência e precisão propostos por Galo e Camargo (1994). No quadro 7, pode-se verificar como se obter o valor da acurácia a partir destes, considerando que ambos compõem o REMQ e que este é um estimador de acurácia (MONICO et al, 2009).

Quadro 7: Acurácia esperada após os testes de tendência e precisão.

Análise de tendência	Análise de precisão	Acurácia (REMQ)
Sem tendência	Preciso	EP
Sem tendência	Impreciso	>EP
Tendência	Preciso	>EP
Tendência	Impreciso	>EP

Fonte: O autor.

Como exemplo, foi calculado o valor de acurácia, utilizando o valor de EP para melhor classificação PEC-PCD obtida em cada MDE, usando maior escala. Considerou-se também que os dados analisados estão sem valores *outliers*. O resultado obtido encontra-se nas tabelas 23 e 24. Pelos resultados percebe-se:

- Para o MDE 1, foi possível estabelecer o valor de acurácia somente para os MDT. Para o MDS, foi possível estabelecer um intervalo para a acurácia, conforme observado na tabela 23;
- Para o MDE 2, não foi possível se determinar o valor de acurácia em nenhum dos dados e sim um intervalo para a acurácia, conforme observado na tabela 24.

Tabela 23: Comparação para o MDE 1.

Modelo Digital de Superfície						
Resolução Espacial				0,1 m		
Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
1:5.000	2	B	0,660	Sim	Sim	>0,666
Resolução Espacial				0,5 m		
Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
1:5.000	2	B	0,660	Sim	Sim	>0,666
Resolução Espacial				2,0 m		
Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
1:10.000	5	B	1,670	Sim	Sim	>1,670
Modelo Digital de Terreno						
Resolução Espacial				0,1 m		
Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
1:5.000	2	C	0,800	Não	Sim	0,8
Resolução Espacial				0,5 m		
Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
1:5.000	2	C	0,800	Não	Sim	0,8
Resolução Espacial				2,0 m		
Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
1:5.000	2	B	0,660	Não	Sim	0,66

Fonte: O autor.

Tabela 24: Comparação para o MDE 2.

MDE 2	Modelo Digital de Superfície						
	Resolução Espacial				0,1 m		
	Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
	1:5.000	2	D	1,000	Sim	Sim	>1
	Resolução Espacial				0,5 m		
	Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
	1:5.000	2	D	1,000	Sim	Sim	>1
	Resolução Espacial				2,0 m		
	Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
	1:50.000	20	C	8,000	Sim	Sim	>8
	Modelo Digital de Terreno						
	Resolução Espacial				0,1 m		
	Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia
	1:10.000	5	B	1,670	Sim	Sim	>1,670
	Resolução Espacial				0,5 m		
Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia	
1:10.000	5	B	1,670	Sim	Sim	>1,670	
Resolução Espacial				2,0 m			
Escala	EC (m)	Classe PEC-PCD	EP (m)	Tendência	Precisão	Acurácia	
1:10.000	5	B	1,670	Sim	Sim	>1,670	

Fonte: O autor.

#### 4.8 EXPERIMENTO COMPLEMENTAR EM UMA SUPERFÍCIE SIMULADA

Conforme apresentado nas subseções anteriores, percebe-se que hipótese de normalidade não pode ser considerada sempre como verdade. Contudo, os resultados apresentados podem causar dúvidas se o motivo foi causado devido ao processo de construção do modelo, da obtenção da nuvem de pontos ou pela aquisição dos pontos de verificação altimétrica. Devido a isso foi realizado um último experimento, utilizando para isto uma superfície matemática simulada. Este experimento tem como grande vantagem o controle, tanto na obtenção da nuvem de pontos, quanto para a aquisição dos pontos de verificação altimétrica, visto que estes estão sendo obtidos através de uma função matemática (equação 48).

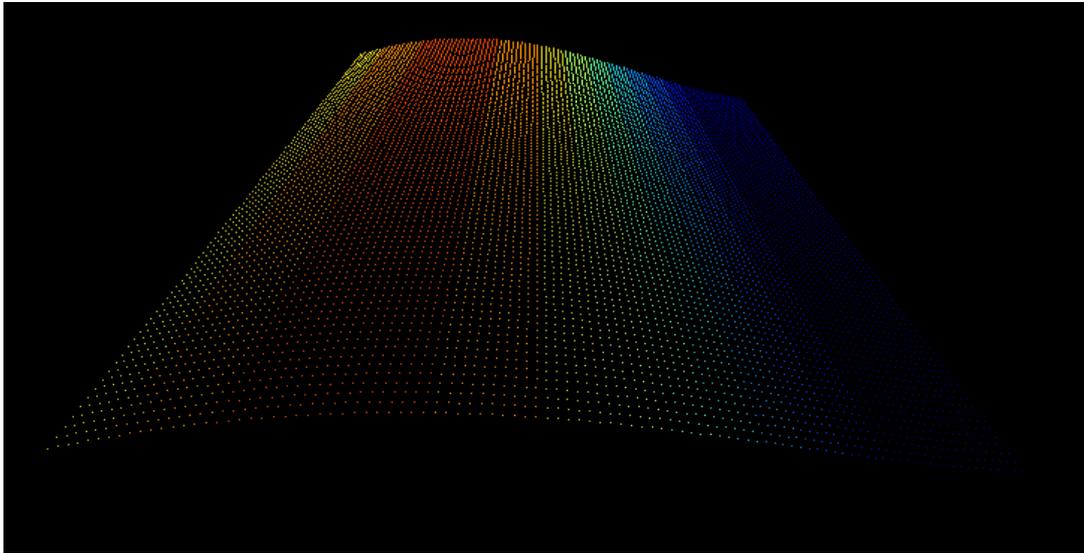
$$f(x, y) = 20 \cdot \text{sen}(x(\text{mod } 400000) \cdot \pi/180) \cdot \cos(y(\text{mod } 9000000) \cdot \pi/180) \quad (48)$$

onde:

$$x \in [400000; 400100] \wedge y \in [9000000; 9000100]$$

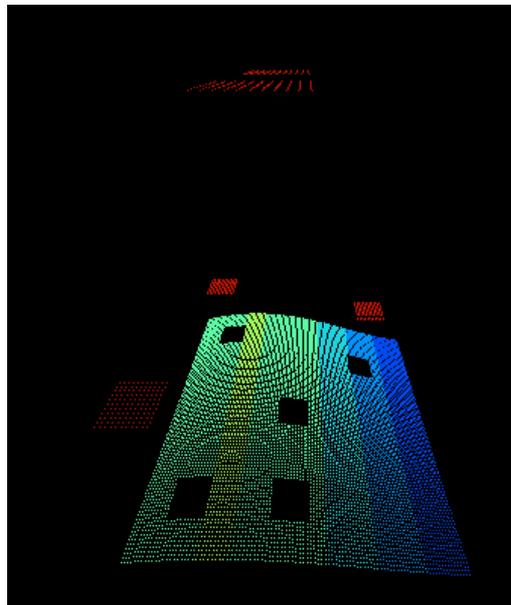
Esta função foi escolhida por gerar uma superfície contínua e suave. Com o objetivo de tornar esta superfície mais próxima de uma superfície topográfica real foram simuladas a presença de acidentes artificiais. Os resultados podem ser visualizados nas figuras 30 e 31.

Figura 30: Nuvem de pontos simulada.



Fonte: O autor.

Figura 31: Nuvem de pontos simulada com a presença de acidentes artificiais.



Fonte: O autor.

Em relação a geração dos modelos digitais, o procedimento foi mesmo apresentado na metodologia, gerando assim MDS e MDT, com resoluções de grade igual aos experimentos anteriores.

A seleção dos pontos de verificação altimétrica foi realizada de tal forma que estes fossem bem distribuídos por toda a superfície. Foram gerados dois conjuntos de pontos de verificação: o primeiro tendo um total de 30 pontos (tabela 25); e o segundo com um total de 50 pontos (tabela 26). Estes pontos foram interpolados a partir das grades regulares, conforme apresentado na metodologia.

Tabela 25: Pontos de verificação altimétrica.

ID	Tipo de Dado	MDS			MDT		
	Resolução Grade h (Referência)	0,1 m h (modelo)	0,5 m h (modelo)	2,0 m h (modelo)	0,1 m h (modelo)	0,5 m h (modelo)	2,0 m h (modelo)
1	2,687	2,689	2,685	2,654	2,689	2,685	2,654
2	-0,902	-0,906	-0,906	-0,923	-0,906	-0,906	-0,923
3	-6,051	-6,052	-6,052	-6,052	-6,052	-6,052	-6,052
4	-10,327	-10,326	-10,326	-10,313	-10,326	-10,326	-10,313
5	2,770	2,768	2,766	2,746	2,768	2,766	2,746
6	1,807	1,804	1,802	1,785	1,804	1,802	1,785
7	2,252	2,249	2,247	2,225	2,249	2,247	2,225
8	-1,785	-1,783	-1,784	-1,796	-1,783	-1,784	-1,796
9	1,649	1,646	1,644	1,618	1,646	1,644	1,618
10	3,553	3,554	3,553	3,519	3,554	3,553	3,519
11	2,218	2,214	2,213	2,190	2,214	2,213	2,190
12	-1,785	-1,783	-1,784	-1,798	-1,783	-1,784	-1,798
13	-5,709	-5,709	-5,709	-5,711	-5,709	-5,709	-5,711
14	-9,945	-9,945	-9,944	-9,935	-9,945	-9,944	-9,935
15	1,729	1,725	1,724	1,700	1,725	1,724	1,700
16	3,553	3,554	3,553	3,522	3,554	3,553	3,522
17	-2,030	-2,026	-2,028	-2,042	-2,026	-2,028	-2,042
18	-8,366	-8,366	-8,366	-8,361	-8,366	-8,366	-8,361
19	2,764	2,763	2,761	2,734	2,763	2,761	2,734
20	3,470	3,465	3,465	3,438	3,465	3,465	3,438
21	-2,340	-2,339	-2,339	-2,352	-2,339	-2,339	-2,352
22	-9,493	-9,494	-9,492	-9,481	-9,494	-9,492	-9,481
23	2,710	2,711	2,707	2,676	2,711	2,707	2,676
24	3,505	3,504	3,503	3,473	3,504	3,503	3,473
25	-2,528	-2,527	-2,528	-2,541	-2,527	-2,528	-2,541
26	-8,967	-8,967	-8,966	-8,958	-8,967	-8,966	-8,958
27	3,363	3,359	3,359	3,331	3,359	3,359	3,331
28	-4,690	-4,689	-4,691	-4,696	-4,689	-4,691	-4,696
29	-9,033	-9,032	-9,032	-9,026	-9,032	-9,032	-9,026
30	-2,974	-2,976	-2,976	-2,982	-2,976	-2,976	-2,982

Fonte: O autor.

Tabela 26: Pontos de verificação altimétrica.

ID	Tipo de Dado	MDS			MDT		
	Resolução Grade	0.1 m	0.5 m	2.0 m	0.1 m	0.5 m	2.0 m
	h(Referência)	h(modelo)	h(modelo)	h(modelo)	h(modelo)	h(modelo)	h(modelo)
1	1.922	1.918	2.084	6.245	1.918	1.917	1.895
2	3.478	4.227	8.927	8.720	3.473	3.473	3.439
3	2.687	2.689	2.685	2.654	2.689	2.685	2.654
4	-0.902	-0.906	-0.906	-0.923	-0.906	-0.906	-0.923
5	-6.051	-6.052	-6.052	-6.052	-6.052	-6.052	-6.052
6	-10.327	-10.326	-10.326	-10.313	-10.326	-10.326	-10.313
7	1.768	1.764	1.763	6.876	1.764	1.763	1.738
8	3.519	3.520	3.608	8.348	3.520	3.516	3.493
9	2.770	2.768	2.766	2.746	2.768	2.766	2.746
10	-0.846	-0.848	-0.848	-0.866	-0.849	-0.849	-0.866
11	-5.846	-5.846	-5.846	-5.847	-5.846	-5.846	-5.847
12	-9.558	-9.559	-7.940	-3.976	-9.559	-9.558	-9.546
13	1.807	1.804	1.802	1.785	1.804	1.802	1.785
14	3.560	3.562	3.561	3.530	3.562	3.561	3.530
15	2.252	2.248	2.247	2.225	2.249	2.247	2.225
16	-1.785	-1.783	-1.784	-1.796	-1.783	-1.784	-1.796
17	-5.777	-5.777	-5.685	-1.160	-5.777	-5.777	-5.779
18	-10.200	-9.488	-3.488	0.044	-10.197	-10.199	-10.186
19	1.648	1.646	1.644	1.618	1.646	1.644	1.618
20	3.553	3.554	3.553	3.519	3.554	3.553	3.519
21	2.218	2.214	2.213	2.190	2.214	2.213	2.190
22	-1.785	-1.783	-1.784	-1.798	-1.783	-1.784	-1.798
23	-5.709	-5.709	-5.709	-5.711	-5.709	-5.709	-5.711
24	-9.946	-9.946	-9.944	-9.935	-9.946	-9.944	-9.935
25	1.729	1.725	1.724	1.700	1.725	1.724	1.700
26	3.553	3.554	3.553	3.522	3.554	3.553	3.522
27	3.144	3.139	3.138	3.120	3.139	3.138	3.120
28	2.077	2.073	10.990	23.691	2.073	2.072	2.050
29	0.133	0.130	7.028	21.992	0.130	0.129	0.116
30	-2.030	-2.026	-2.028	-2.042	-2.026	-2.028	-2.042
31	-8.366	-8.366	-8.366	-8.361	-8.366	-8.366	-8.361
32	2.764	2.763	2.761	2.734	2.763	2.761	2.734
33	3.470	3.465	3.465	3.438	3.465	3.465	3.438
34	1.815	1.812	1.810	1.793	1.812	1.810	1.793
35	-2.340	-2.339	-2.339	-2.352	-2.339	-2.339	-2.352
36	-9.483	-9.484	-9.482	-9.481	-9.484	-9.482	-9.481
37	2.710	2.711	2.707	2.676	2.711	2.707	2.676
38	3.505	3.504	3.508	3.473	3.504	3.503	3.473
39	1.854	1.850	1.848	1.826	1.850	1.848	1.826
40	-2.528	-2.527	-2.528	-2.541	-2.527	-2.528	-2.541
41	-8.967	-8.967	-8.966	-8.958	-8.967	-8.966	-8.958
42	3.526	3.527	3.525	7.648	3.527	3.525	3.494
43	3.363	3.359	3.359	3.331	3.359	3.359	3.331
44	2.218	2.599	13.935	19.983	2.215	2.213	2.195
45	-0.346	-0.344	-0.040	7.441	-0.344	-0.345	-0.368
46	-4.690	-4.689	-4.691	-4.696	-4.689	-4.691	-4.696
47	-9.033	-9.032	-9.032	-9.026	-9.032	-9.032	-9.026
48	3.560	3.562	3.560	6.243	3.562	3.560	3.524
49	2.659	2.659	2.657	19.370	2.659	2.657	2.627
50	-2.974	-2.976	-2.976	-2.982	-2.976	-2.976	-2.982

Fonte: O autor.

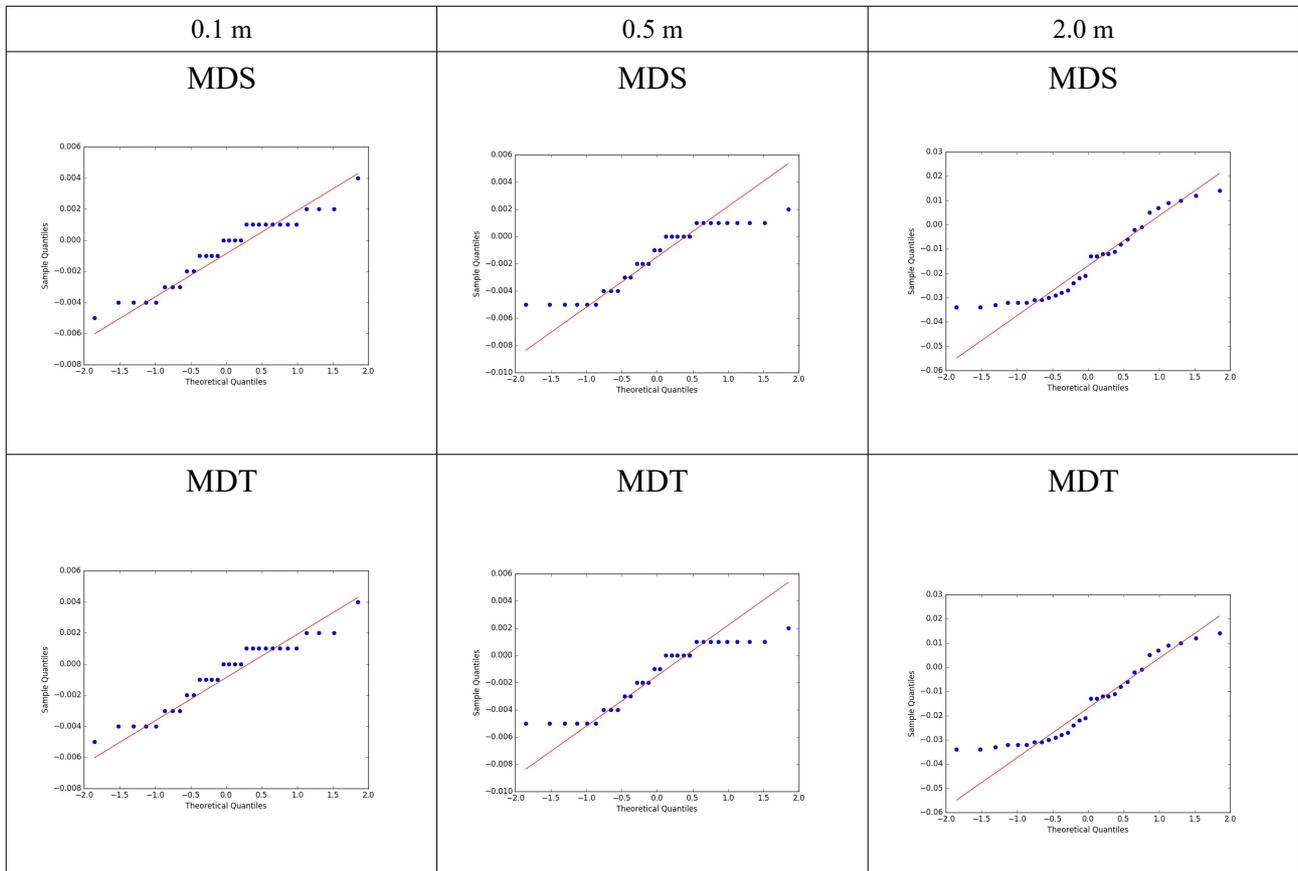
Os resultados dos testes de normalidade encontram-se presentes na tabela 27 e nos gráficos quantil-quantil normal (figuras 32 e 33). Estes mostram resultados compatíveis com os apresentados nos experimentos anteriores, apresentado em sua grande maioria resultado negativo para distribuição normal. O comportamento dos gráficos quantil-quantil se assemelham com os resultados apresentados nos experimentos do *LIDAR*.

Tabela 27: Resultado dos testes de normalidade para as superfícies simuladas.

Nº Pontos	Tipo de Modelo		MDS			MDT			
	Resolução Espacial do Modelo		0.1 m	0.5 m	2.0 m	0.1 m	0.5 m	2.0 m	
30	Coeficiente de Curtose		2,154	1,531	1,807	2,154	1,531	1,807	
	Coeficiente de Assimetria		-0,224	-0,266	0,444	-0,224	-0,266	0,444	
	Teste de Shapiro-Wilk		W Calculado	0,940	0,867	0,891	0,940	0,867	0,891
			W Referência	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927
50	Coeficiente de Curtose		18,335	11,378	7,773	1,797	1,436	2,212	
	Coeficiente de Assimetria		-4,090	-3,048	-2,384	0,094	0,100	-0,725	
	Teste de Shapiro-Wilk		W Calculado	0,265	0,387	0,546	0,925	0,873	0,885
			W Referência	0,947	0,947	0,947	0,947	0,947	0,947

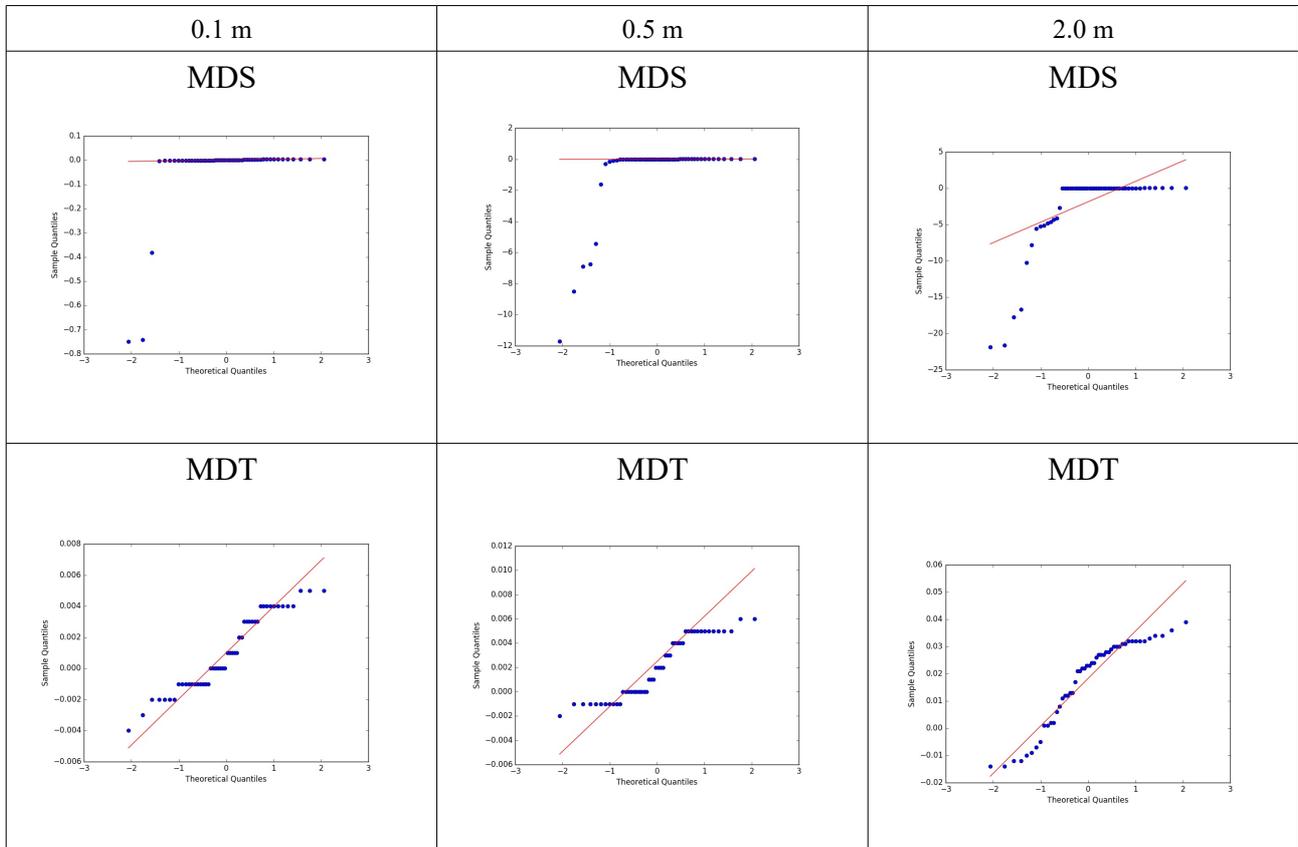
Fonte: O autor.

Figura 32: Resultado dos gráficos quantil-quantil para um total de 30 pontos amostrais.



Fonte: O autor.

Figura 33: Resultado dos gráficos quantil-quantil para um total de 50 pontos amostrais.



Fonte: O autor.

## 5. CONCLUSÃO

Para esta pesquisa foram realizados estudos sobre as normas e padrões nacionais e internacionais de qualidade para dados altimétricos. No que diz respeito as normas e padrões internacionais, percebe-se nestas que a grandeza raiz quadrada do erro médio quadrático é utilizada como estimador de acurácia e consideram a possibilidade da distribuição dos erros altimétricos como não normal. No Brasil, contudo, este tipo de discussão não encontra-se presente em normas. O PEC e o PEC-PCD usam como suposição para a análise de qualidade que os dados possuem distribuição dos erros como sendo normal. Uma vez que não considera a hipótese de distribuição dos erros como não normal, torna-se de extrema importância que estas sejam atualizadas. Nesse sentido, esta pesquisa objetivou verificar as hipóteses de normalidade para a distribuição dos erros altimétricos, bem como analisar a influência de valores *outliers* em medidas de tendência central e dispersão, nos testes de tendência e precisão e na classificação do PEC-PCD.

Para isto foram realizados testes estatísticos de qualidade. Inicialmente, os dados foram submetidos a testes de normalidade. Os testes foram compostos pela análise de curtose e assimetria, a análise do gráfico quantil-quantil normal e pelo teste de Shapiro-Wilk. Os resultados obtidos mostram que somente a análise do MDS gerado a partir de câmera de pequeno formato mostrou-se ter distribuição normal. Os outros testes demonstram que a hipótese de normalidade não pode ser aceita, comprovando assim a suposição inicial apresentada na pesquisa de que a distribuição dos erros altimétricos de um MDE não segue necessariamente distribuição normal. Em uma análise complementar, foi utilizada uma superfície simulada e repetidos os testes, tendo obtido resultados similares aos visualizados anteriormente.

Partindo da hipótese de que a normalidade dos dados é afetada pelos valores *outliers*, os resultados mostram que estes afetam sim o resultado dos testes de normalidade, contudo não podem ser considerados como os únicos responsáveis pela não normalidade dos dados. Este resultado pode ser observado na análise dos modelos oriundos do *Lidar*. Mesmo com a remoção dos valores *outliers*, os testes de normalidade continuaram dando resultado negativo para a normalidade. Logo, em relação a normalidade, não é possível concluir que a distribuição dos erros altimétricos de modelo digital sempre será diferente da normal, contudo é possível concluir que não necessariamente é normal.

Outra análise realizada durante a pesquisa foi em relação ao efeito de valores *outliers* em medidas como média e desvio-padrão amostrais. Os resultados mostram que a média, desvio-padrão e raiz do erro médio quadrático sofrem grande influência de valores *outliers*, influenciando resultados que utilizam estes valores, como por exemplo as análises de tendência e precisão. Também foram analisadas medidas ditas robustas, conforme visto em Hohle e Hohle (2009), como

a mediana e desvio absoluto normalizado da mediana. Também foram realizados testes com o intervalo quartílico. No geral, percebe-se que estes valores possuem maior estabilidade quando comparados com a média e desvio-padrão, por exemplo.

A análise do PEC-PCD, tendência e precisão sofrem influência direta dos valores *outliers*, visto que estes dependem de valores como média e desvio-padrão amostral. Cabe destacar ainda que estes testes, baseados na distribuição *t* e qui-quadrado, são recomendados quando a distribuição é normal, o que não ocorre necessariamente.

Logo, pelo tudo que foi exposto durante a pesquisa, propõe-se como sugestões a serem implementadas no processo de avaliação da qualidade do MDE:

- Utilização dos padrões da ASPRS (2014), ao invés das análises de tendência e precisão, visto que estes padrões passam a estabelecer a acurácia de um MDE usando a hipótese que a distribuição dos erros altimétricos podem ou não seguir distribuição normal;
- Usar como número de amostras para análise estatística os valores propostos pela norma da ASPRS (quadro 4), visto que não existe nas normas brasileiras um valor mínimo de amostras a ser usada no processo de avaliação da qualidade;
- Alterar a referência utilizada pelo PEC-PCD para se determinar os valores de EP. Atualmente estes encontram-se referenciados a equidistância das curvas de nível e limitados por escalas.

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se estudos com o objetivo de indentificar o tipo de distribuição estatística dos erros de um MDE como também estudos e aprofundamentos sobre medidas estatísticas robustas que possam ser utilizadas como medidores de acurácia, visto que, pelo que foi apresentado durante a pesquisa, o REMQ é um estimador sem muita robustez na presença de *outliers*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **ASPRS:** Accuracy Standards for Large-Scale Maps. Bethesda, ASPRS, 1990. Disponível em: <[http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2012/01/1989\\_jul\\_1038-1040.pdf](http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2012/01/1989_jul_1038-1040.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **ASPRS:** Guidelines Vertical Accuracy Reporting for *LIDAR*. Data. Bethesda, ASPRS, 2004. Disponível em: <[http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/Vertical\\_Accuracy\\_Reporting\\_for\\_Lidar\\_Data.pdf](http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/Vertical_Accuracy_Reporting_for_Lidar_Data.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **ASPRS:** Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Bethesda, ASPRS, 2014. Disponível em <[http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/ASPRS\\_Positional\\_Accuracy\\_Standards\\_Edition1\\_Version100\\_November2014.pdf](http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/ASPRS_Positional_Accuracy_Standards_Edition1_Version100_November2014.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

BRASIL. Decreto nº 89817, de 20 de junho de 1984. **Dispõe Sobre As Instruções Regulatoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 22 jun. 1984.

GEMAEL, Camil. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994. 319 p.

COX, Nicholas J.. Speaking Stata: The limits of sample skewness and kurtosis. **The Stata Journal**, College Station, v. 10, p.482-495, 2010. Disponível em <<http://www.stata-journal.com/sjpdf.html?articlenum=st0204>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

DALMOLIN, Quintino; LEAL, Evilázio da Mota. Análise da Qualidade Posicional em Bases Cartográficas Geradas em CAD. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 7, n. 1, p.21-40, 2001.

DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO. **ET-PCDG**: Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais. 2 ed. Brasília: DSG, 2016. Disponível em <[http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET\\_PCDG\\_2016\\_2aEdicao\\_Aprovada\\_Publicada\\_B\\_E\\_7\\_16.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_PCDG_2016_2aEdicao_Aprovada_Publicada_B_E_7_16.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO. **ET-ADGV**: Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais. 2 ed. Brasília: DSG, 2015. Disponível em <[http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ADGV\\_Defesa-Forca\\_Terrestre\\_2015.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ADGV_Defesa-Forca_Terrestre_2015.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO. **ET-CQDG**: Especificação Técnica para o Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais. 1 ed. Brasília: DSG, 2016. Disponível em <[http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET\\_CQDG\\_1a\\_edicao\\_2016.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

FELGUEIRAS, Carlos Alberto; CÂMARA, Gilberto. Modelagem Numérica de Terreno. In: CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004. Cap. 7. p. 1-36.

FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE. **FGDC-STD-007.3-1998**: Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. Reston, 1998. Disponível em <<https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy/part3/chapter3>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

GALO, Mauricio; CAMARGO, Paulo de Oliveira. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO - COBRAC, 1., 1994, Florianópolis. **Anais...** . Florianópolis: UFSC, 1994. p.41-48.

GUIDORIZZI, Hamilton Luiz. **Um Curso de Cálculo**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 407 p.

HÖHLE, J; HÖHLE, M. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models by Mean of Robust

Statistical Methods. **ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing**, Amsterdã, v. 64, p.398-406, jul. 2009.

HUBER, Peter J.; RONCHETTI, Elvezio M. **Robust Statistics**. 2. ed. New Jersey: John Wiley e Sons, 2009.

HUBERT, M.; VANDERVIEREN, E.. An adjusted boxplot for skewed distributions. **Computational Statistics & Data Analysis**. Amsterdã, v. 52, p. 5186-5201, out. 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 19113**: Geographic information — Quality principles. Genebra, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 19114**: Geographic information — Quality evaluation procedures. Genebra, 2003.

LEYS, Christophe et al. Detecting *outliers*: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. **Journal Of Experimental Social Psychology**. [S.l], v. 49, p.764-766, 2013.

LIANG, Luming; HALE, Dave. **A stable and fast implementation of natural neighbor interpolation**. Golden: Colorado School Of Mines, 2010.

LI, J.; HEAP, A. D. **A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists**. Camberra: Geoscience Australia, 2008. 137 p.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005. 324 p.

LOWE, David G.. Object recognition from local scale-invariant features. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 7., 1999, Kerkyra. **Proceedings...** . Kerkyra: ICCV,

1999. p. 1150 - 1157.

MERCHANT, Dean C.. Spatial accuracy standards for large scale line maps. In: AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING, 42., 1982, Falls Church. **Proceedings...** . Gaithersburg: ACSM, 1982. v. 1, p. 222 – 231.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.. **Statics and Probability for Engineers**. 3. ed. Nova Iorque: John Wiley e Sons, 2003.

MONICO, J F et al. Acurácia e Precisão: Revendo os Conceitos de Forma Acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 15, p.469-483, jul. 2009. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Mauricio\\_Galo/publication/265248657\\_Acuracia\\_e\\_precisao\\_revendo\\_os\\_conceitos\\_de\\_forma\\_acurada\\_Accuracy\\_and\\_Precision\\_Reviewing\\_the\\_concepts\\_by\\_means\\_of\\_an\\_accurate\\_procedure/links/5405e3cb0cf2c48563b1e6f4/Acuracia-e-pr](https://www.researchgate.net/profile/Mauricio_Galo/publication/265248657_Acuracia_e_precisao_revendo_os_conceitos_de_forma_acurada_Accuracy_and_Precision_Reviewing_the_concepts_by_means_of_an_accurate_procedure/links/5405e3cb0cf2c48563b1e6f4/Acuracia-e-pr)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

NATIONAL DIGITAL ELEVATION PROGRAM. **NDEP**: Guideline for Digital Elevation Data. Reston: NDEP, 2004.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **NMAS**: United States National Map Accuracy Standards. Reston, 1947.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **USGS**: Part 1: General, Standards for Digital Elevation Models. Reston, 1997.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **USGS**: Part 2: Specifications, Standards for Digital Elevation Models. Reston, 1998.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **USGS**: Part 3: Quality Control, Standards for Digital Elevation Models. Reston, 1997.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B.. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, vol. 52, No.3/4. (dec.,1965), pp. 591-611.

ROUSSEEUW, Peter J.; CROUX, Christophe. Alternatives to the Median Absolute Deviation. **Journal of The American Statistical Association**, Alexandria, v. 88, p.1273-1283,1993.

TOMASELLI, Antonio Maria Garcia; MONICO, João F G; CAMARGO, P O. Análise da exatidão cartográfica da carta imagem "São Paulo". In: V SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., 1988, Natal. **Anais...** . Natal: Inpe, 1988. p. 253 - 257.  
Disponível em:  
<[https://www.researchgate.net/publication/43807509\\_Analise\\_da\\_exatidao\\_cartografica\\_da\\_carta\\_imagem\\_Sao\\_Paulo](https://www.researchgate.net/publication/43807509_Analise_da_exatidao_cartografica_da_carta_imagem_Sao_Paulo)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

WALPOLE, R. E. et al. **Probabilidade e Estatística para Engenheiros e Ciências**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2009. Tradução de Luciane F. Pauleti Viana.

ZANDBERGEN, Paul A.. Positional accuracy of spatial data: Non-normal distributions and a critique of the national standard for spatial data accuracy. **Transactions In GIS**. Nova Jersey, p. 103-130. jan. 2008.

## ANEXO A - VALORES CRÍTICOS PARA O TESTE DE SHAPIRO WILK

Tabela 28: Valores Críticos para o teste de Shapiro-Wilk.

Valores Críticos para o Teste de Shapiro-Wilk			
<b>n (<math>\alpha=0,05</math>)</b>	<b>W</b>	<b>n(<math>\alpha=0,05</math>)</b>	<b>W</b>
3	0,767	27	0,923
4	0,748	28	0,924
5	0,762	29	0,926
6	0,788	30	0,927
7	0,803	31	0,929
8	0,818	32	0,93
9	0,829	33	0,931
10	0,842	34	0,933
11	0,85	35	0,934
12	0,859	36	0,935
13	0,866	37	0,936
14	0,874	38	0,938
15	0,881	39	0,939
16	0,887	40	0,94
17	0,892	41	0,941
18	0,897	42	0,942
19	0,901	43	0,943
20	0,905	44	0,944
21	0,908	45	0,945
22	0,911	46	0,945
23	0,914	47	0,946
24	0,916	48	0,947
25	0,918	49	0,947
26	0,92	50	0,947

Fonte: Shapiro e Wilk (1965)