



**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geografia**  
**Dissertação de Mestrado**

**VANDRÉ SOARES VIEGAS**

**MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO APLICADO À ÁREAS URBANAS:  
UM ESTUDO DE CASO PARA O CENTRO DE NITERÓI/RJ**

**Rio de Janeiro**

**Fevereiro de 2019**

Vandré Soares Viegas

**Modelo Digital De Elevação Aplicado à Áreas Urbanas: Um Estudo de Caso para o  
Centro de Niterói (RJ)**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO,  
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM GEOGRAFIA

Orientadores:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza

Prof. Dr. Rafael Silva de Barros

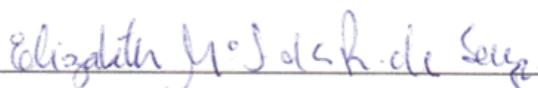
**Rio de Janeiro**  
**Fevereiro de 2019**

Vandré Soares Viegas

**Modelo Digital De Elevação Aplicado à Áreas Urbanas: Um Estudo de Caso para o  
Centro de Niterói (RJ)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Geografia

Aprovado em 05 / 02 / 2019, pela banca examinadora:



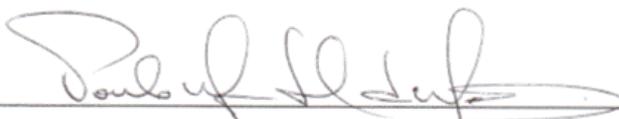
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza

Instituto de Geociências - Departamento de Geografia – UFRJ - Orientador



Prof. Dr Rafael Silva de Barros

Instituto de Geociências - Departamento de Geografia – UFRJ – Co-orientador



Prof. Dr. Paulo Márcio Leal de Menezes

Instituto de Geociências – Departamento de Geografia – UFRJ



Professora Dr.<sup>a</sup> Isabela Habib Canaan da Silva

UERJ - FFP

## CIP - Catalogação na Publicação

V656m Viégas, Vandrê Soares  
Modelo Digital De Elevação Aplicado à Áreas Urbanas: Um Estudo de Caso para o Centro de Niterói (RJ) / Vandrê Soares Viégas. -- Rio de Janeiro, 2019.  
110 f.

Orientadora: Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza.  
Coorientador: Rafael Silva de Barros.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2019.

1. Representação Tridimensional. 2. Áreas Urbanas. 3. Geotecnologias. 4. Niterói. 5. Modelo Digital de Elevação. I. Feitosa da Rocha de Souza, Elizabeth Maria, orient. II. Silva de Barros, Rafael, coorient. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

A **DigitalGlobe** pelo fornecimento do par estéreo Worldview-3 como forma de incentivo a presente pesquisa.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)** enquanto bolsista nesses dois anos. Sem esse auxílio o presente trabalho não teria sido possível, assim como minha nova formação.

A Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo ambiente público, científico e de excelência que tenho a honra de fazer parte desde 2012.

A toda força Divina, ao Universo, por ter me permitido e ajudado chegar até aqui. A minha família que me apoiou desde sempre, mas dessa vez se superou nesse quesito. Minha Mãe Rosane, que dedicou cada segundo da vida para me fazer o homem que sou hoje, se atingi metade da expectativa já me sinto muito feliz. Espero ser capaz de alçar voos cada vez maiores em agradecimento a tudo que fez por mim, inclusive dando ideias e ouvindo minhas reclamações diariamente sem pedir que fique quieto (nem eu me aguento as vezes). A minha Avó, Zeneide, por todo amor e carinho que me são dedicados diariamente, criou esse ambiente em que consigo estudar/escrever sem me preocupar com outras coisas. Obrigado até mesmo por me dizer para ir descansar ou comer uma pizza como recompensa. Ao meu Avô, Omar, que mesmo não estando mais entre nós é uma grande parte desse feito, tendo representado tudo que eu poderia esperar de um avô. A minha Tia pelas bases da escola que foram plantadas lá atrás e hoje dão esses frutos interessantes. Muito obrigado por exigir o máximo de mim, hoje não consigo fazer menos que isso. A minha irmã Carol, que por meio de muitas conversas me fez entender o que era a UFRJ, como deveria buscar por uma Universidade pública, e aqui estou eu, após 7 longos (?) anos. Ao meu Pai, Ricardo, que sempre me incentivou de várias maneiras a estudar, a procurar ser melhor, inclusive a ter um dicionário mental que não me deixa na mão (a palavra reverbera que o diga. Ah, vale agradecer, inclusive, por revisar esse pequeno grande texto. Me poupou tempos preciosos. A família como um todo: espero honrá-los em cada conquista minha.

No ambiente acadêmico, os agradecimentos vão primeiramente ao Bacharelado em Ciências Matemáticas e da Terra, que me permitiu uma formação tão ampla que consegui entrar no mestrado na Geografia. Especialmente Daiana, Solange, que tanto colaboraram para que um dia conseguisse me formar.

Meus irmãos que iniciaram essa grande jornada acadêmica comigo, tem um papel extremamente grande aqui. Egberto, Danilo, Douglas, Felipe, João Vitor, Romulo, Pedro, Inghrid: a vocês o meu MUITO obrigado, a Universidade ficou tão mais fácil tendo vocês ao meu lado. Mesmo que cada um siga seu caminho, levamos o espírito "Só Ratos" no coração. Contem comigo para tudo na vida de vocês. Obrigado, também, pelas palavras de apoio para tentar o mestrado, a bolsa, e posteriormente o doutorado. Obrigado inclusive, pelos toques dados nos mapas e pelas ajudas em todos os momentos.

A minha segunda (as vezes primeira) casa, o Laboratório Espaço de Sensoriamento Remoto e Estudos Ambientais. Na figura de cabeça de tudo, Carla Madureira, tão mãe nossa, sempre me tratou com muito carinho, com dicas e conversas tão boas consegue te fazer pensar de maneira diferente, sempre na melhor direção possível, estamos aqui para comprovar isso. Ao meu amigo e orientador Rafael Barros, pelas conversas e ensinamentos desde sensoriamento remoto até um churrasco falando de Rock. Rafa, te agradeço demais pelo toque dado que me fez avançar tanto nesse trabalho, espero que ele esteja digno de tudo me que ensinou. A Elizabeth Souza, BETH, por

simplesmente tudo dentro do laboratório. Por ter aceito ser minha orientadora, por ouvir minhas teimosias, mas principalmente por acreditar em mim desde aquelas primeiras JIC, onde comecei a dar os primeiros sinais de que estava sendo abençoado em forma de orientação. Obrigado, Beth, por acreditar e confiar em mim até quando nem eu mesmo confiei.

Ao Marcelo (Marceleza) que tanto me ajudou na compreensão do R6, no processamento dos dados, e por ser esse cara incrível que nos inspira. A minha brilhante equipe de campo: Lucas Fernandes, Matheus, Rafael Esteves (também pelos testes iniciais que me permitiram vislumbrar possibilidades), Renata Coutinho, João Vitor (já te agradeci ali em cima hahaha), Maiara – não só pelo campo, mas por ter sido uma grande amiga que só fortaleci com o tempo desde Mariana até os ‘mestres do urbano’, me desculpa se o campo pareceu inseguro em algum momento, mas teve lanches. E Vitor Vargas grande amigo que aceitou colaborar comigo, me passando o conhecimento dessa área (que eu tinha pouquíssimo).

Em uma área especial, aos Inimigos do Fim – Hrvatska – esse grupo de mais que amigos, Friends, com uma amizade tão intensa que ninguém solta a mão de ninguém. Julia Lourenço (Ju), é difícil te agradecer, mas lembrar do que ouvi de você na minha primeira apresentação só me fortaleceu e me fez chegar até aqui. Estamos na próxima fase. Ana Paula (Paulinha) que já faz tanta falta no dia a dia, obrigado demais por ter aceitado me ensinar o bendito Envi e a correção atmosférica. Não é exatamente por isso que agradeço, mais ao me ensinar a primeira coisa que aprendi na área, aumentamos tanto nossa amizade e troca de conhecimento que cá estou, tal como você fez um dia. João Vitor (novamente!!!), Isabela que consegue deixar nossos dias mais leves e divertidos, Felipe (ora ora, mas quem aparece novamente) juntos desde o trote até o doutorado, Gabriel Duarte, grande amigo que tenho o prazer de ter feito nessa vida, obrigado pelas explicações de arcgis, tabela e mundo nerd. Ana Carolina (Caroooool), sempre tão amiga, disposta a conversar sobre qualquer assunto e que já me ensinou muito sem nem saber (uma pena que sambar não se enquadre, ainda).

Aos amigos do Laboratório, Paula, também orientadora-amiga, sua animação contagia e nos incentiva diariamente, tenho a alegria de ter aprendido muito com você. Marcus, que também faz parte do grupo amigos-orientadores, sempre com palavras de carinho, sugestões e dicas ótimas que me ajudaram demais nessa trajetória. A Gaby, amiga que sempre ajudou e ajuda de tantas formas. Ao Lucas Martins (Luquinhas), Raphael (Raphinha), por me ajudarem a aprender mais dessa área que agora também é um pouco minha. Agradeço a todos meus amigos de laboratório e da vida por me permitirem estar na vida de vocês.

E, por fim, a todos que estão lendo esse trabalho. Acreditem em si mesmos, nunca desistam, o esforço vai compensar ao final.

*Vi Veri Veniversum Vivus Vici*

## RESUMO

A percepção da natureza como holística e inter-relacionada tem colaborado para o desenvolvimento e ascensão de tecnologias capazes de criar, manipular e consultar informações espaciais interativas. As representações, tendem, cada vez mais de se aproximar de modelos da realidade, retratando a paisagem com suas nuances características com maior fidedignidade possível. No mundo real qualquer objeto é observado tridimensionalmente, apresenta posição horizontal (x e y) e posição vertical (z). Ao considerar a dimensão dos dados, a perspectiva tridimensional permite a visualização de elementos não apreciados pela representação clássica bidimensional. Quando comparados com os dados geográficos bidimensionais, os modelos tridimensionais possuem relevante aplicação na pesquisa científica, planejamento urbano, simulações, prognósticos de expansão e outros temas de interesse para a sociedade civil. O objetivo geral do trabalho é gerar e avaliar um modelo digital de elevação, com foco em alvos antrópicos, em recorte no Município de Niterói (RJ), com uso de par estéreo Worldview-3, identificando o potencial para a representação espacial e visualização de formas urbanas. A pesquisa contou com etapas de levantamento bibliográfico e trabalho de campo para levantamento de pontos de controle com o GNSS Trimble R6, visando a obtenção de coordenadas para a geração e validação do modelo. Utilizando os coeficientes polinomiais racionais (*RPC*) fornecidos com a imagem e o software PCI Geomatics 2018, foi possível testar diversos parâmetros disponíveis, a partir dos dois principais métodos de extração (*SGM* e *NCC*) e assim indicar uma metodologia unificadora de quais técnicas são as mais indicadas para a geração de Modelos Digitais de Elevação voltados a representação urbana. A validação dos modelos, a partir da comparação entre as coordenadas de campo e as extraídas dos modelos, foi com relação ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Como resultado, foi possível extrair feições urbanas tais como prédios, pontes e casas, com boa distinção e detalhamento dos alvos, principalmente a partir da técnica SGM. Com relação a validação, a escala de enquadramento do melhor modelo foi 1:10.000 C de acordo com o PEC-PCD. Cabe ressaltar que a mesma escala foi encontrada para os modelos com e sem pontos de controle. Destaca-se, pelo nível de detalhamento e escala enquadrada, aplicações com relação planta cadastral de cidades e grandes propriedades rurais e industriais, simuladores de navegação, base matricial a ser usada em confluência com mapeamentos de uso e cobertura da terra e criação de bases vetoriais por meio de classificação GEOBIA. A presente pesquisa busca colaborar com prerrogativas da Nova Agenda Urbana (2016) com relação a gestão urbana, possibilitando maior planejamento, e ações para promover o desenvolvimento sustentável, assim como fomentar avanços tecnológicas e ferramentas de análises precisas voltadas a ciência Geográfica.

**Palavras-Chave:** Modelo Digital de Elevação, Áreas urbanas, Niterói, Estereoscopia, Representação Tridimensional

## ABSTRACT

The perception of nature as holistic and interrelated has contributed to the development and rise of technologies capable of creating, manipulating and consulting interactive spatial information. The representations tend, more and more to approach models of reality, portraying the landscape with its characteristic nuances with the greatest possible reliability. In the real world any object is observed three-dimensional, it presents horizontal position (x and y) and vertical position (z). When considering the dimension of the data, the three-dimensional perspective allows the visualization of elements not appreciated by the classical two-dimensional representation. When compared with two-dimensional geographic data, three-dimensional models have relevant application in scientific research, urban planning, simulations, expansion prognoses and other topics of interest to civil society. The objective of this work is to generate and evaluate a digital elevation model, focusing on anthropogenic targets, in a cut in the city of Niterói (RJ), using a stereo pair Worldview-3, a and identifying the potential for spatial representation and visualization of urban forms. The research included bibliographic survey and fieldwork for the survey of control points with the GNSS Trimble R6, aiming to obtain coordinates for the generation and validation of the model. Using the rational polynomial coefficients (RPC) provided with the PCI Geomatics 2018 image and software, it was possible to test several parameters available from the two main extraction methods (SGM and NCC) and thus indicate a unifying methodology of which techniques are the more suitable for the generation of Digital Elevation Models geared to urban representation. The validation of the models, based on the comparison between the field coordinates and those extracted from the models, was in relation to the Cartographic Accuracy Standard of Digital Cartographic Products (PEC-PCD in portuguese). As a result, it was possible to extract urban features such as buildings, bridges and houses, with good distinction and detailing of the targets, mainly from the SGM technique. With respect to validation, the best model framing scale was 1: 10.000 C according to the PEC-PCD. It should be noted that the same scale was found for the models with and without control points. It is worth highlighting, by the level of detail and scale, applications related to the cadastral plan of cities and large rural and industrial properties, navigation simulators, matrix basis to be used in confluence with land use mapping and coverage and creation of vector bases by means of GEOBIA classification. This research seeks to collaborate with prerogatives of the New Urban Agenda (2016) in relation to urban management, allowing greater planning, and actions to promote sustainable development, as well as to foster technological advances and accurate analysis tools geographic science.

**Keywords:** Digital Elevation Model, Urban Areas, Niterói, Stereoscopy, Three-Dimensional Representation

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área de Estudo.....	19
Figura 2: Exemplos de Degradação do Ambiente Urbano no Centro de Niterói.....	21
Figura 3: Projeto de Revitalização Urbana da Área Central de Niterói .....	21
Figura 4: Representação 3D do Uso do Solo com Escritórios e Lojas em Londres .....	28
Figura 5: Migração das Formas de Representação .....	27
Figura 6: Exemplo de Modelo Digital de Superfície .....	28
Figura 7: Diferenças entre MDE e MDT .....	31
Figura 8: Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria .....	34
Figura 9: Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimetria.....	35
Figura 10: Tipos de Visualização Estereoscópica baseados em Fotogrametria .....	36
Figura 11: Modos de obtenção de estereoscopia em sensoriamento remoto .....	37
Figura 12: Exemplo de Estereoscopia Lateral .....	38
Figura 13: Estéreo Par de St.Louis – Missouri.....	38
Figura 14: Diferentes resoluções espaciais .....	43
Figura 15: Base, Rover e Coletora Trimble R6.....	47
Figura 16: Localização ideal de um ponto de controle.....	48
Figura 17: Demarcação de GCP em imagem Worldview-3.....	49
Figura 18: Exemplo de extração de MDE em modelo baseado em fotogrametria.....	51
Figura 19: Equipamentos, alvos urbanos e objetos baseados em LIDAR.....	51
Figura 20: Extração por dados vetoriais.....	52
Figura 21: Cidade tridimensional por Modelos Digitais.....	54
Figura 22: Fluxograma de Trabalho .....	55
Figura 23: Discover DigitalGlobe®.....	57
Figura 24: Definição do recorte em Niterói.....	57
Figura 25: Mapa de Distribuição de Pontos de Controle em Niterói.....	59
Figura 26: Identificação da base 2994X.....	60
Figura 27: Caracterização do Ponto 24.....	61
Figura 28: Ajuste das coordenadas no Trimble Business Center.....	62
Figura 29: Relação entre altitude ortométrica e elipsoidal.....	62
Figura 30: Definição do Modelo Matemático no PCI Geomatics 2018.....	63
Figura 31: Coleta de GCP no PCI Geomatics.....	65

Figura 32: Geometria epipolar.....	66
Figura 33: Imagem Bruta e Imagens Epipolares.....	67
Figura 34: Pares epipolares no PCI Geomatics 2018.....	67
Figura 35: Extração do MDE no PCI Geomatics.....	68
Figura 36: Testes para a geração dos modelos digitais de elevação.....	70
Figura 37: MDE método NCC com suavização mínima.....	76
Figura 38: Comparação Método NCC <i>Fill Holes</i> e a imagem Pancromática.....	76
Figura 39: Exemplo de Relevo com o Método NCC.....	77
Figura 40: Áreas sombreadas e o método NCC.....	77
Figura 41: MDE método SGM ( <i>Fill Holes</i> ) .....	78
Figura 42: Diferenças entre o método SGM e NCC.....	80
Figura 43: MDE pelo Método SGC com e sem GCP .....	82
Figura 44: Diferenças de inclinação de prédios com e sem GCP.....	83
Figura 45: Diferenças entre o MDE SGM com e sem GCP.....	87

### LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Categorias e métodos de geração tridimensional .....	50
Quadro 2: Coordenadas da Base RN 2994X e Forte do Pico.....	71
Quadro 3: Exemplos de estruturas com alta suavização.....	74
Quadro 4: Modelo Digital de Elevação sem Filtros.....	75
Quadro 5: Exemplos de detalhamento do MDE pelo método SGM.....	79
Quadro 6: Detalhamento de Modelos sem GCP .....	81

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Regiões Administrativas de Niterói.....	19
Tabela 2: Características do satélite Worldview-3 .....	44
Tabela 3: Principais Diferenças entre imagens de altíssima resolução Espacial.....	45
Tabela 4: Características do par estéreo Worldview -3.....	58
Tabela 5: Modelos Matemáticos para imagens orbitais e aéreas.....	64
Tabela 6: Erros Residuais dos <i>Tie Points</i> .....	73
Tabela 7: Erros Residuais dos Pontos de Controle.....	73
Tabela 8: Valores de Exatidão para os Modelos Digitais de Elevação.....	84

Tabela 9: Resumo dos enquadramentos produtos ao PEC-PCD.....	85
--	----

### **LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 1: Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático .....	72
Equação 2: Tendenciosidade (bias) .....	72
Equação 3: Desvio Padrão .....	72

### **LISTA DE SIGLAS**

BHLS	- Bus Of High Level Of Service
EMQ	- Erro Médio Quadrático
ET-ADGV	- Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geospaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre
ET-PCDG	-Especificação Técnica dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais
GCP	- Ground Control Points
GEOBIA	- Geographic Object-Based Image Analysis
GLONASS	- GLObal NAVigation Satellite System
GNSS	- Global Navigation Satellite System
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM	- Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IED	- Imagem Estéreo da Direita
IEE	- Imagem Estéreo da Esquerda
IFOV	- Instantaneous Field of View
KML	- Keyhole Markup Language
LIDAR	- Light Detection and Range
MAPGEO	- Mapa Geoidal
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MDS	- Modelo Digital de Superfície

MDT	- Modelo Digital de Terreno
MNT	- Modelo Numérico de Terreno
NAVSTAR GPS	- NAVigation Satellite with Time and Ranging-Global Positioning
NCC	- Normalized Cross-Correlation
ONU	- Organização das Nações Unidas
OUC	- Operação Urbana Consorciada
PMN	- Plano Municipal de Niterói
RBMC	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RFC	- Rational Function Coefficient
RFM	- Rational Function Model
RMRJ	- Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSE	- Root Mean Square Error
RN	- Referência de Nível
RPC	- Rational Polynomial Coefficient
SGM	- Semi-Global Matching
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SIGEO	- Sistema de Gestão de Informação
SUN	- Secretaria de Urbanismo de Niterói
TBC	- Trimble Business Center
TP	- Tie Points
UTM	- Universal Transverse Mercator
VANT	- Veículo Aéreo Não Tripulado
VLT	- Veículo Leve sobre Trilho

## SUMÁRIO

<b>I - INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1 JUSTIFICATIVA</b> .....	16
<b>1.2 - OBJETIVO</b> .....	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
<b>1.3 - ÁREA DE ESTUDO</b> .....	18
<b>II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	24
<b>2.1 A REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL</b> .....	24
<b>2.2 MODELOS NUMÉRICOS DE TERRENO</b> .....	28
<b>2.3 – ESCALAS EM GEOCIÊNCIAS</b> .....	33
<b>2.4 ESTEREOSCOPIA</b> .....	35
<b>2.5 GEOTECNOLOGIAS E O ESPAÇO URBANO</b> .....	38
<b>2.6 SENSORIAMENTO REMOTO</b> .....	41
2.6.1 Resolução Espacial .....	42
2.6.2 A Missão Worldview .....	43
<b>2.7 LEVANTAMENTO POR GNSS</b> .....	45
2.7.1 GNSS Trimble R6.....	46
2.7.2 Pontos de Controle de Campo (GCP) .....	47
<b>2.8 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL EM SIG</b> .....	49
2.8.1 Extração por Estereopares Através de Modelo Matemático <i>RPC</i> .....	52
<b>III - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	55
<b>3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS</b> .....	56
3.1.1 Aquisição das Imagens .....	56
3.1.2 Trabalho de Campo e Levantamento de Pontos .....	58
3.1.3 Processamento dos Dados .....	61
<b>3.2 CRIAÇÃO DO PROJETO</b> .....	63
3.2.1 Coleta de Pontos de Controle (GCP) e <i>Tie Points</i> .....	65
<b>3.3 EXTRAÇÃO E FILTROS</b> .....	66
<b>3.4 VALIDAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	70
<b>IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	71

<b>4.1 LEVANTAMENTO DE COORDENADAS</b> .....	71
<b>4.2 CRIAÇÃO DO PROJETO</b> .....	71
<b>4.3 EXTRAÇÃO E FILTROS</b> .....	73
4.3.1 <i>Normalized Cross-Correlation (NCC)</i> .....	75
4.3.2 <i>Semi-Global Matching (SGM)</i> .....	78
4.3.3 Modelo Digital de Elevação sem <i>Pontos de Controle</i> .....	80
<b>4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO</b> .....	83
<b>V – CONCLUSÕES</b> .....	86
<b>VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	91
<b>LISTA DE ANEXOS</b> .....	101

## I - INTRODUÇÃO

As observações tomadas da superfície terrestre evoluíram de forma intensa com o passar dos anos desde as primeiras representações cartográficas. A medida que os grupos humanos passaram a se organizar coletivamente, as representações espaciais foram criadas para demarcar os núcleos de povoamento e os territórios de caça dessas sociedades pretéritas, os mapas e seus fins, foram evoluindo e se tornando cada vez mais complexos (MENEZES & FERNANDES, 2013). Os avanços sociais e tecnológicos moldaram a forma com a qual as representações espaciais foram se modificando ao longo dos anos, o mapa tem sido frequentemente apontado como um instrumento de base da ação de pensar geograficamente (GOMES, 2017). Tais representações foram sendo modificadas à medida que a percepção geográfica do ambiente também mudara.

Os cartógrafos passaram a adotar as técnicas computacionais no final da década de 1960 (BURROUGH, 1989), contudo, a inserção do ambiente digital para fins de representação espacial ainda era bastante inaugural e limitado, o que só foi modificado nas décadas seguintes. A tecnologia computacional revolucionou a forma com qual as representações cartográficas são geradas. São tempos de busca por informação em tempo real com a maior semelhança possível com a realidade, há uma reestruturação da relação humana com os mapas, alterando tanto a forma de apresentação quanto o uso que será conferido a essas representações (PETERSON, 1995).

A visualização cartográfica, - Segundo Peterson (1995), *a criação de imagens por computação gráfica que exibem dados para a interpretação humana (principalmente multidimensionais* – busca, por meio dos avanços técnicos computacionais, facilitar a visibilidade de dados científicos e conceitos (MacEACHEREN, 1995). A visualização cartográfica é um método computacional que integra a coleta de dados, organização, modelagem e representação, baseada na capacidade humana de impor ordem e identificar padrões (MENEZES & FERNANDES, 2013). O incremento da visualização digital aplicada a estudos geográficos é, em grande parte, uma resposta à percepção de bases de dados atreladas aos mapas que surgiram com o passar dos tempos e em seu grande volume de produção, numa ascendência intimamente ligada com o crescimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

A velocidade de obtenção, manipulação e exibição de dados, também tem modificado a espacialização de fenômenos e suas naturezas diversas. A demanda por informações que possibilitem estudos ambientais de caráter integrativo, tem ganhado

força na Geografia Física. A percepção da natureza como holística e inter-relacionada tem colaborado para o desenvolvimento e ascensão de tecnologias capazes de criar, manipular e consultar informações espaciais interativas. As representações geradas, tendem, cada vez mais de se aproximar de modelos da realidade, retratando a paisagem com suas nuances características com maior fidedignidade possível. Com relação ao ambiente representado, as nuances do terreno podem alterar também a ordem ocupação do solo, o que é muito notado em áreas urbanas altamente ocupadas.

Em virtude das inter-relações supracitadas, estas são ainda mais notadas nas grandes cidades. O espaço urbano reflete a transformação em curso nas cidades em função das classes sociais em que se deve considerar sua fragmentação e heterogeneidade. A ação antrópica na superfície terrestre intensificou ainda mais as diferenças espaciais naturais. Aprofundar-se na concepção das problemáticas ambientais sobre o viés da relação homem-natureza, é uma oportunidade para abordar a questão ambiental a partir da interação entre os meios social e físico-natural com uma abordagem holística e sistêmica de mundo (BERTÉ, 2009). O desenvolvimento de metodologias é emergente e vem mesclando o conhecimento da Geografia urbana e urbanismo com as novas tecnologias visando a compreensão das diferentes dinâmicas e fenômenos socioespaciais.

Com relação ao meio natural, há de se relevar os impactos causados pela urbanização, considerando as transformações provocadas nos ecossistemas e geossistemas, diretamente, pela construção de áreas urbanizadas e também pela sua ação direta e influência indireta sobre os recursos naturais (CHRISTOFOLETTI, 1996).

A ampliação, tanto quanto a consolidação de novos ambientes antrópicos, repercute em diversas áreas físicas e naturais, podendo-se citar como exemplo os efeitos sobre os ciclos hidrológicos afetados por áreas impermeabilizadas. Nesse caso, as alterações no sistema resultantes das novas características deste terreno (agora impermeável), resulta na pouca capacidade de infiltração da água no solo, influenciando o escoamento superficial, favorecendo a ocorrência de inundações, principalmente quando aliadas à ocupação de leitos de rios e sistemas falhos de drenagem.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Uma das maiores dificuldades com relação a representação da informação geográfica cartograficamente, se dá com relação a consideração da escala que permitirá a sua visualização com um mínimo de perda, ou com perdas não significativas da informação, causadas pela generalização que será, em qualquer situação, aplicada à informação (MENEZES & COELHO NETTO, 1999). Segundo Menezes e Coelho Netto

(1999) a consideração de um único fenômeno simplifica o problema, porém existe um sério agravamento, quando se consideram diversos fenômenos que se inter-relacionam. Nesse contexto, deve-se relevar a escala de investigação dos fenômenos, à medida que estes podem ser vistos de maneira isolada ou interconectados de acordo com a escala geográfica de observação que segundo Menezes e Coelho Netto (1999) irão influenciar no processo de inter-relacionamento, localização, padrão e na própria escala operacional do conjunto.

A representação espacial tem avançado em direção a solução de problemas relacionados a fenômenos inter-relacionados e sua modelagem. A prerrogativa de se criar modelos mais próximos do real e que possam representar fenômenos em correlação, reside no fato que dados e informações geográficas podem estar relacionadas a diferentes classes de objetos espaciais e possuir diferentes dimensionalidades (MENEZES & FERNANDES, 2013). Contudo, no mundo real, enquanto escopo de estudo do Geógrafo, qualquer objeto é observado tridimensionalmente, portanto, apresenta posição horizontal (x e y) e posição vertical (z). Ao considerar a dimensão dos dados, a perspectiva tridimensional permite a visualização de elementos não apreciados pela representação clássica bidimensional tais como interpretações de estruturas com elevação, dinâmicas de relevo, e mais recentemente em incrementos de pesquisa voltados a imersão virtual no ambiente estudado.

Os métodos para a geração de modelos tridimensionais estão em constante evolução com a adoção de diferentes técnicas, principalmente aquelas relacionadas com o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), LIDAR (*Light Detection and Range*) e estereoscopia com imagens orbitais de altíssima resolução espacial. Os objetos de estudo são especialmente aplicados para as representações do relevo voltadas à análise ambiental, em sua grande maioria. Contudo, a investigação da aplicabilidade da representação urbana tridimensional, ainda aparece como lacuna de pesquisa, principalmente no Brasil. Destaca-se que os modelos urbanos tridimensionais devem avançar e dar suporte a outros campos de aplicação, como o gerenciamento de espaço e tráfego, cadastro urbano, realidade virtual, previsão e simulação de catástrofes (BILJECKI, 2017).

Dessa forma, e considerando as diversas dinâmicas intrínsecas dos ambientes urbanos, as cidades devem ser estudadas em um novo nível de análise, que possa abranger as relações internas e servir como um modelo mais próximo do real. Segundo o relatório “Cidades do Mundo”, documento que analisa o desenvolvimento de áreas urbanas no

mundo nos últimos 20 anos, elaborado pelo Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Urbanos (ONU-Habitat, 2016), indica que “*novas formas de colaboração, cooperação, planejamento, governança, financiamento*” são ações necessárias e urgentes para as cidades.

A proposta de geração de um modelo digital de elevação aplicado à área urbana, apoia-se no momento em que a percepção de estudos multidisciplinares têm auxiliado na resolução de problemas de planejamento e gestão ambiental nos mais diversos âmbitos. Elaborar um método de representação que fuja aos modelos clássicos de distinção de ocupação urbana é valioso e deve colaborar com a prerrogativa de retratar com precisão e detalhe, as feições que não são comumente simbolizadas em mapeamentos clássicos. Em face a aplicabilidade, espera-se que tal modelo possa colaborar com políticas públicas preventivas que considerem, também, as nuances tridimensionais do terreno.

## **1.2 - OBJETIVO**

### 1.2.1 Objetivo Geral

Gerar e avaliar um modelo de representação tridimensional em área urbana, com uso de par estéreo Worldview-3, identificando o potencial para a representação espacial e visualização de formas urbanas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar os parâmetros mais relevantes na geração de um modelo digital de elevação por meio de imagem de altíssima resolução espacial.
- Validar o melhor modelo de representação tridimensional gerado, por meio do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), buscando destacar os parâmetros adotados, bem como os resultados obtidos.
- Como consequência do trabalho, colaborar com estudos futuros ao estabelecer parâmetros que resultaram no modelo com melhor precisão altimétrica.

## **1.3 - ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo está localizada no município de Niterói (Figura 1), na Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro (RMRJ). Possui cerca de 63 km<sup>2</sup> e sua escolha se baseia na disponibilidade de imagens do satélite Worldview-3, bem como, uma boa variação altimétrica para edificações, morros e arruamentos.

Niterói destaca-se pela presença de setores produtivos como o petróleo e gás, principalmente pelas estruturas propícias a offshore, devido a sua localização geográfica.



Considerando os dados relativos ao crescimento de Niterói, verifica-se que, entre 2000 e 2010, a população aumentou em uma taxa anual de 0,60%, indo de 459.451 habitantes em 2000, para 487.562, em 2010, num aumento populacional total de 6,1%. (ATLAS BRASIL, 2013).

O município de Niterói encontra-se dividido em 5 regiões administrativas, dispostas de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1** – Regiões Administrativas de Niterói (Fonte: Secretaria de Urbanismo)

<b>PRAIAS DA BAÍA</b>	Boa Viagem, Cachoeira, Centro, Charitas, Fátima, Gragoatá, Icaraí, Ingá, Jurujuba, Morro do Estado, Pé Pequeno, Ponta D'Areia, Santa Rosa, São Domingos, São Francisco, Viradouro, Vital Brasil
<b>OCEÂNICA</b>	Jacaré, Cafubá, Cambinhas, Engenho do Mato, Itacoatiara, Itaipu, Piratininga, Maravista, Santo Antônio, Jardim Imbuí, Serra Grande
<b>LESTE</b>	Muriqui, Rio do Ouro, Várzea das Moças
<b>PENDOTIBA</b>	Largo da Batalha, Badu, Cantagalo, Ititioca, Maceió, Maria Paula, Matapaca, Sapê, Vila Progresso
<b>NORTE</b>	Baldeador, Barreto, Caramujo, Cubango, Engenhoca, Fonseca, Ilha da Conceição, Santa Bárbara, Santana, São Lourenço, Tenente Jardim, Viçoso Jardim

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE - 2010), Niterói aparecia com o quinto maior produto interno bruto do estado naquele ano. Contudo, e por conta, da queda do preço do petróleo, essa também é uma região que sofrera com a drástica redução dos *royalties*, e por isso o processo de reestruturação urbana também deve ser considerado. Segundo a prefeitura de Niterói, a cidade possuía no ano de 2013 o sétimo maior Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) do país, sendo a primeira colocada dentre os municípios do Estado do Rio de Janeiro, contudo, Niterói ainda sofre com a ausência de grandes investimentos por parte do Poder Público.

No total de cinquenta e dois bairros, observa-se em Niterói uma tendência ao aumento populacional concentrado na Região Norte, por possuir lotes com menor custo e alta demanda da população. Há de se considerar que Niterói também possui o maior índice de mobilidade urbana da Região Metropolitana do Rio de Janeiro com 2,45 *viagens/hab/dia* (SECRETARIA DE URBANISMO NITERÓI, 2018) e, portanto, as dinâmicas internas também são relativamente distintas quando comparadas a toda RMRJ.

No âmbito da mobilidade urbana, também se destaca o projeto de transporte coletivo com maior investimento local, com a construção do corredor exclusivo denominado Transoceânica, com 9,3 km de vias exclusivas de ônibus, seguindo o modelo BHLS (*Bus Of High Level Of Service*) um modelo dedicado a locais com ruas mais estreitas, sendo previsto no projeto uma migração da população para locais mais próximos as futuras estações, impactando diretamente as dinâmicas urbanas nos mais diversos bairros impactados. Vale ressaltar projetos em curso de integração do transporte por barcas, bicicletas e, futuramente, a implementação dos Veículos Leves sobre Trilhos (VLT).

Niterói, assim como a maioria das cidades brasileiras de médio e grande porte, a partir da segunda metade do século XX passou por um processo de esvaziamento e degradação de seu Centro. A discussão sobre centro e centralidade urbana é muito relevante para a Geografia, pois contribui para desvendar as especificidades das cidades, tendo em vista a sua organização socioespacial (BOVO & OLIVEIRA, 2014). Nesse contexto, para se compreender o esvaziamento do Centro de Niterói, a Secretaria de Urbanismo e Mobilidade do Município destaca que, enquanto, entre 1970 e 2010 o *incremento populacional foi de 50% no município, o Centro perdeu 15% de sua população. Paralelamente, no período de 32 anos, entre 1975 e 2007, a área urbana que a população passou a ocupar cresceu 130%* (SECRETARIA de URBANISMO e

MOBILIDADE, 2017). O processo de degradação mostra-se, também, bastante visual ao deslocar-se pelo Centro do Município, alguns exemplos são apresentados na Figura 2.



**Figura 2** – Exemplos de Degradação do Ambiente urbano no Centro de Niterói (Fonte: Secretaria de Urbanismo e Mobilidade de Niterói)

Verifica-se então, a urgência de aplicação de medidas estruturais que possam recuperar as áreas degradadas além de atender as necessidades da população. Nesse sentido, a Secretaria de Urbanismo e Mobilidade de Niterói desenvolve em diversas parcerias, o projeto de *revitalização urbana da área central*, que tem por objetivo requalificar o Centro municipal, atendendo aos quatro fatores-chave de desenvolvimento urbano para cidades sustentáveis, apontados pela ONU-Habitat (2016): *densidade, uso misto, conectividade e acessibilidade*. A Figura 3 apresenta vislumbres presentes no projeto de revitalização urbana da área central do Município.



**Figura 3** – Projeto de Revitalização Urbana da Área Central de Niterói (Fonte: Secretaria de Urbanismo e Mobilidade de Niterói)

Através de uma Operação Urbana Consorciada (OUC), uma parceria Público-Privada o Poder Público busca a reformulação de um espaço cuja disparidade socioambiental se tornou bastante intensa. A revitalização da área central busca uma

renovação da infraestrutura existente, com a construção de redes de esgoto, melhora da qualidade da iluminação pública, pavimentação e recuperação de prédios históricos. Além disso ao propor medidas de melhoras estruturais, também busca-se superar algumas dificuldades inerentes a dinâmica do Município, exemplificando, em algumas regiões há uma grande concentração de pontos de alagamento durante períodos de chuva intensa, devido ao recobrimento asfáltico da superfície e o despreparado planejamento urbano e histórico da cidade, aliado às características topográficas com declividades de moderadas a altas.

Destaca-se, também, iniciativas como a da plataforma de geoinformação da Prefeitura de Niterói, o SIGEo (Sistema de Gestão de Informação) que possui dados geográficos tal como o Censo 2010 para o Município, além de ortofotos, e modelo digital do terreno. O SIGEo representa uma base de dados de utilidade considerável com relação as diligências ambientais, à medida que fornece bases nem sempre de fácil acesso ao público, favorecendo análises ambientais a menores custos e em menor tempo. Com relação a questão ambiental, Niterói tem se destacado em iniciativas de gestão por intenção de mitigar, ou evitar, desastres ocorridos nos últimos tempos no Município, uma questão que merece ser levada em consideração por representar uma forte área de aplicação em estudos geográficos.

Portanto, há de se destacar as calamidades naturais pelos quais Niterói tem passado nos últimos tempos. Segundo o Plano Municipal de Niterói (PMN) O Município possui um *“clima quente e semi-úmido, basicamente em função de sua localização geográfica. A pluviosidade média anual é de 1.207 mm. As chuvas concentram-se no verão, atingindo o máximo em março (149,4 mm), ao passo que o inverno e a estação da estiagem, sendo agosto o mês mais seco (50,1 mm). ”* (PMN, 1994).

Em virtude das feições naturais e planejamento ambiental falho, desastres associados com a elevação e ocupação urbana têm se tornado frequentes. Destaca-se a tragédia do Bumba localizado no bairro Viçoso Jardim, em 2010, onde foram contabilizados cerca de 10 mil desabrigados e um grande número de mortos, até hoje indefinido que somou variáveis de ordem natural e socioespacial (REZENDE, 2016). Resumidamente, o Morro do Bumba abrigou um grande depósito de lixos em Niterói de 1970 até 1986, quando fora desativado. Contudo, por ausência de fiscalização do poder público, a área voltara a ser ocupada por construções irregulares no início da década de 1990, algo comum no Município já que as favelas de Niterói também surgiram e cresceram em áreas públicas, caso dos Morros do Estado, do Cavalão, do Preventório e

da Favela do Sabão (O GLOBO, 2011). Em novembro de 2018, outro evento pluviométrico de alta intensidade, tornou a causar caos em Niterói, novamente provocando mortes em virtude dos deslizamentos de massa e por conta das enchentes ocorridas por todo o Município.

As características supracitadas, que relacionam a ocupação urbana não planejada aliada com características topográficas complexas, justificam a aplicação do modelo digital de elevação proposto na presente dissertação. O planejamento urbano que releve a topografia da região, tende a se beneficiar em médio e longo prazos com a adoção de modelos tridimensionais em etapas de planejamento urbano na cidade, à medida que considera fatores importantes e em correlação: a elevação e a ocupação urbana, em confluência essas duas condições podem fornecer subsídios tais como mapas de risco, e vulnerabilidade, por exemplo.

Espera-se que com a adoção do modelo tridimensional proposto, aliado ao momento do município que busca através do projeto de requalificação do Centro de Niterói, seja possível colaborar em etapas do planejamento e gestão ambiental não só de Niterói, mas em outras localidades, onde se possa agregar desenvolvimento sustentável, qualidade de vida e o uso das geotecnologias como forma integrativa de análise e gestão do ambiente.

## II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL

Os mais antigos mapas gráficos conhecidos datam de 2300 a.C., quando os babilônios usaram pranchetas de argila para registrar informações sobre a região dos rios Tigre e Eufrates. Atualmente, a elaboração de mapas e representações é tida como uma ciência especializada, na qual a estética e utilidade se combinam para gerar um produto útil (CHRISTOPHERSON, 2012). As representações geográficas estão entre as mais antigas e suas origens remontam às necessidades das primeiras sociedades (LONGLEY et. al, 2013).

A história da Cartografia mostra o conhecimento crescente do ser humano em relação ao espaço; os estudos dos mapas históricos permitem estabelecer o conhecimento do espaço geográfico, bem como a sua posição sobre a Terra (MENEZES & FERNANDES, 2013). As representações bidimensionais remontam ao conhecimento e limitações tecnológicas do momento do homem na história, contudo, as prerrogativas derivadas da representação tridimensional também possuem bases pretéritas consolidadas, não sendo necessariamente uma nova conjuntura proveniente do avanço computacional, mas que na realidade teve avanços significativos devido ao progresso tecnológico.

A crescente busca de especialização dos mapas teve, primeiramente, acréscimos qualitativos devido a pesquisas e representações de fenômenos que não são registrados materialmente ou geometricamente sobre a superfície da Terra (MARTINELLI, 2009). O primeiro método em questão, que remonta a meados do século XVI, é o chamado modelo isarítmico (CASTRO, 2004), que considera isolinhas, linhas com mesmo valor, que fora inicialmente utilizado para mapear o fundo oceânico, procurando atender às exigências mercantis exploratórias das grandes potências Ibéricas. Edmond Halley (1656 – 1742), muito famoso pela percepção da órbita do cometa Halley, também foi o primeiro a vislumbrar as isolinhas, como linhas de declinação magnética, que posteriormente foram apropriadas para outras áreas da ciência, como a Física e seus campos vetoriais magnéticos e a própria cartografia.

Segundo Castro (2004), a representação do relevo também buscou abarcar o método isarítmico à medida que as primeiras tentativas de concepção das curvas de nível para representá-lo foram empregadas no final do século XVI. Entretanto, a proposta só ganhou aperfeiçoamento com os mapeamentos topográficos da segunda metade do século XIX, em atendimento não só às exigências militares como também às instâncias de

aplicação na engenharia para a construção de ferrovias (CASTRO, 2004). Castro (2004) cita que Humboldt (1817), por sua vez, se inspirou nessas considerações para criar, mais tarde, no início do século XIX, as isotermas – linhas de igual valor de temperatura (CLAVAL & WIEBER, 1969). O aprimoramento das primeiras visualizações dos mapas isarítmicos nos levaram a um tipo de mapeamento mais atual, no qual as associações entre cores, faixas de altitudes e outras possíveis variáveis nos fizeram vislumbrar os mapas hipsométricos e suas aplicações, principalmente pela geomorfologia para o estudo do relevo através das curvas de nível, pontos cotados, e aplicações desde a geração de mapas de risco e vulnerabilidade a catástrofes.

É possível perceber nessas representações, como o avanço do modelo isarítmico, o início de uma ruptura com o mundo visível e a busca da exploração da variação perceptiva em terceira dimensão visual (Z) ancorada à localização (X, Y) (MARTINELLI, 2009). A partir da década de 1950, a forma de se conceber mapas e representações, começou a receber fortes incrementos propiciados pelo progresso tecnológico e por pesquisas que procuram, desde então, construir mapas e modelos cada vez mais reais e que sejam capazes de se comunicar com o intérprete de forma a revelar aspectos dos dados que não são facilmente observáveis em outros tipos de modelos, exemplificando, objetos não notáveis em duas dimensões podem ser melhor representados utilizando a representação tridimensional.

As diferentes formas de se construir modelos e sistemas precisos de representação do espaço geográfico constituem uma determinada visão do mundo cultural, tanto quanto o representam, este fato é bastante notado pelo desenvolvimento rápido e em constante evolução de aplicativos geoespaciais que permitam a visualização terrestre de diferentes perspectivas, tal como o *Google Earth* (BROTTON, 2013). O software estadunidense exemplifica a questão cultural inerente ao próprio ser humano, uma vez que possibilita a visão da Terra de fora dela, ou em continentes, regiões, países, estados, municípios e bairros, alterando apenas em cliques a escala de observação.

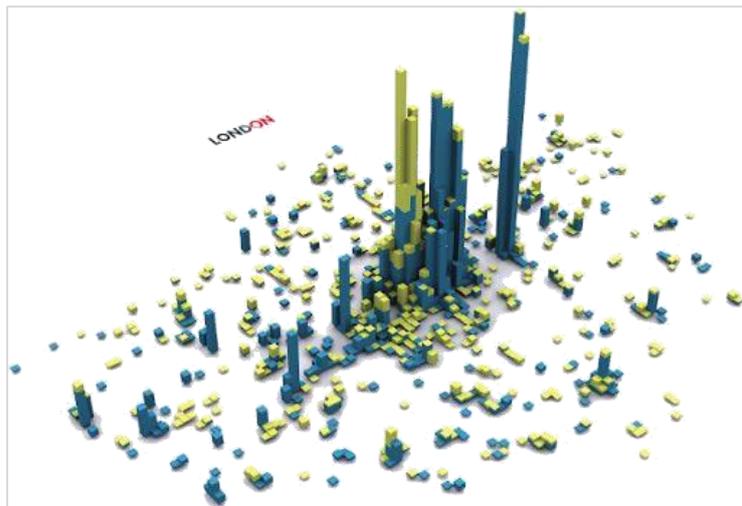
Para compreender a percepção cada vez mais dinâmica e veloz com que as modelagens e interações com o terreno tem mudado ao longo dos anos, exemplifica-se tal como Brotton (2013) o fez, a palestra do então vice-presidente estadunidense Al Gore, em 1998, intitulada “*A Terra Digital: compreendendo o planeta no século XXI*”. Na apresentação Gore versou da seguinte forma:

*“Uma nova onda de inovação tecnológica nos permite captar, armazenar, processar e exibir uma quantidade sem precedentes de informações sobre o planeta e uma grande variedade dessas informações será georreferenciada – isto é, se referirá a algum lugar específico da superfície da Terra. (...) No aplicativo Terra Digital serão aproveitadas essas informações com uma representação do planeta tridimensional, de múltiplas resoluções, na qual podemos inserir grandes quantidades de dados georreferenciados” (AL GORE, 1998).*

Mesmo que de uma maneira embrionária a visão de Al Gore representou uma mudança de perspectiva na época, em que as atenções dos especialistas começavam a se voltar para outras formas de representações que fossem capazes de suportar uma grande quantidade de dados dinâmicos, multiescalares, sendo possível manipula-los e gerar informações precisas. Nesse sentido a visualização digital representou uma verdadeira revolução em pesquisas geográficas. O apoio que a visualização digital trouxe à cartografia também favoreceu, não só de visualização, mas também de representação dos dados, que hoje podem assumir expressões realísticas do terreno em 3D, geração automática de modelos tridimensionais com imagens aerofotogramétricas.

A perspectiva tridimensional também surge como forte aliada de estudos urbanos ao fornecer uma nova ótica de análise para questionamentos complexos. Segundo Lefebvre (1999), à medida que se procura a essência do fenômeno urbano nos deparamos com a questão de como o definir. Categoricamente não há uma fórmula secreta que responda a esta problemática. As formas, funções e estruturas não formam uma totalidade no significado da forma urbana. Funções podem ser administrativas, comerciais, produtivas, por exemplo, criando uma dialética entre o território administrativo e à própria cidade. A forma também possui feições distintas, seja internamente ou externamente, podendo variar espacialmente ou geometricamente (LEFEBVRE, 1999) o que se liga com as estruturas que também variam de acordo com a ocupação local, a morfologia, a partir de imóveis, ruas, bairros, e sociológicas como a distribuição da população, idade, sexo, escolaridade (LEFEBVRE, 1999).

Nesse sentido, Longley et. al, (2013) utilizando o exemplo de Londres, mostram como o uso da perspectiva tridimensional pode ser benéfica para as cidades. Os autores destacam a estrutura altamente monocêntrica de Londres e sua especialização em negócios, como observado na Figura 4, tanto no centro histórico quanto na área das docas.



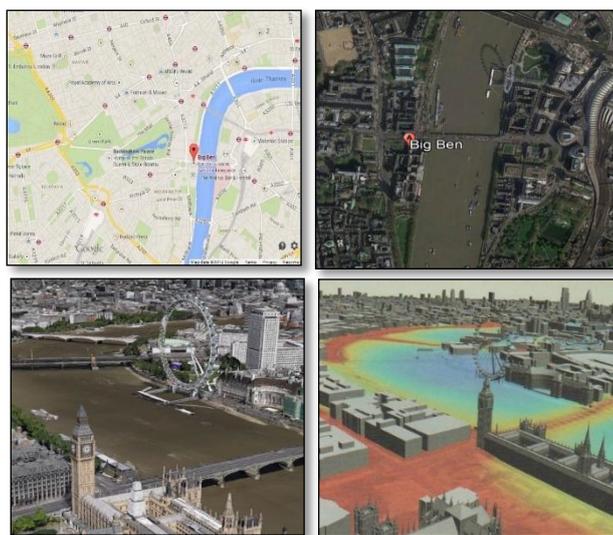
**Figura 4** – Representação 3D do uso do solo com escritórios e lojas em Londres. (Obs: A altura das barras identifica o “valor tributável” Fonte: Adaptado de Longley et. al, 2013)

O uso de representação tridimensional permite o realce da densidade urbana em confluência com os usos, podendo ter relações com infraestrutura de transportes, por exemplo. Além disso, é possível identificar expansões verticalizadas, surgimento de novos núcleos urbanos e a própria representação da forma construída, que nos últimos anos estão migrando para a modelagem de áreas com escalas geográficas mais extensas. Nesse contexto, a ampliação do uso de sensores que fornecem imagens orbitais com altíssima resolução espacial, também tem colaborado com as novas perspectivas de distinção de alvos em modelagem 3D.

Acrescenta-se, também, o uso de dados altimétricos provenientes de radares como o LIDAR, que oferece uma alternativa para os levantamentos in situ e para as técnicas de mapeamento fotogramétrico na aquisição de dados de elevação (MAUNE, 2001). Os instrumentos LIDAR transmitem pulsos de luz laser em direção ao solo usando um espelho de varredura, grande parte dessa energia é retroespalhada em direção ao sistema e registrada eletronicamente pelo receptor (JENSEN, 2009). A vantagem do LIDAR é a capacidade de medir diretamente a estrutura tridimensional (3D, terreno, vegetação e infraestrutura) das áreas fotografadas e separar os dados bioespaciais (medições da vegetação acima do solo) dos dados geoespaciais (medições da superfície do terreno), usando tecnologias ativas de sensoriamento remoto (REUTEBUCH, 2005).

No contexto da modelagem tridimensional, o objetivo principal reside na descoberta de novas formas de representação que se apresentem mais fieis, próximas do real e de fácil cognição ao usuário. Neste âmbito, usando as técnicas de geovisualização, os SIG fornecem um meio muito mais rico e flexível para retratar a distribuição de atributos do que o mapeamento em papel (LONGLEY et. AL, 2013). Segundo Longley

et. al, (2013) a geovisualização é usada para explorar, analisar, sintetizar e apresentar dados espaciais. Por meio da migração das formas de representação, hoje tem-se a capacidade de apresentar, ilustrar e combinar, fenômenos e representações que se apresentam tridimensionalmente no terreno. Um exemplo é apresentado pela Figura 5, através da representação clássica do Google Maps muito utilizada para deslocamentos, a modificação de visualização para imagens de satélites que permite distinguir feições e formas urbanas, a migração para a representação tridimensional imersiva e, por fim, a confluência da imersão com estudo de espalhamento por óxido de nitrogênio (NOx) para identificação de áreas afetadas pelo também conhecido “*smog urbano*”.



**Figura 5** – Migração das Formas de Representação e Visualização de Espalhamento de Poluição. (Fonte: Longley et al, 2013, elaboração do autor).

Contudo, o acesso a dados e informações tridimensionais, assim como seus especialistas, ainda é bastante limitado. Alguns fatores ainda são desfavoráveis quando se trata de representação tridimensional. Cita-se os custos dos softwares especializados, poucos especialistas dedicados, pequeno número de bases conceituais, e percepção da importância da exploração destes modelos por parte dos especialistas, principalmente em âmbito nacional. Desta forma, o presente trabalho pretende colaborar conceitualmente e metodologicamente para a geração de modelos digitais de elevação com ênfase em ambientes urbanos.

## 2.2 MODELOS NUMÉRICOS DE TERRENO

Modelos são baseados em uma abstração do mundo real diante da impossibilidade de reprodução da paisagem e seus processos nos mínimos detalhes em sistemas computacionais (BERHARDSEN, 1999). A concepção de um modelo relaciona-se com

as peculiaridades dos elementos presentes na paisagem, valendo-se das diversas dinâmicas existentes no meio físico. Em relação ao termo “modelo”, pode-se entendê-lo como a representação de um sistema, obtida através de diferentes linguagens: matemática, lógica, física, icônica, gráfica, e segundo uma ou mais teorias (NOVAES, 1981). Já um sistema, é definido como um conjunto de partes, apresentando interdependência entre seus componentes e atributos (CHADWICK, 1973).

Thorn (1988), destaca que é necessário se distinguir um sistema de modelos. O primeiro é visto como uma concepção que supostamente existe na realidade, mesmo que de uma forma abstrata e incompleta, já um modelo é uma abstração e uma simplificação da realidade e reconhece-se que ele não pretende espelhar a realidade. Na geografia física, geralmente são modelos de sistemas que estão sendo considerados, e não sistemas, como abstrações universais (THORN, 1988). Segundo Harvey (1969) a função de um modelo é estabelecida por algumas características que podem defini-lo, tais como: *a) icônico; b) analógico; c) simbólico*. Segundo Menezes e Fernandes (2013) um **modelo icônico** *apresenta redução de escalas, como modelos reduzidos para estudos hidráulicos ou hidrológicos. Modelos analógicos também possuem redução de escala, porém, os elementos do mundo real são reproduzidos de forma semelhante, mapas topográficos são exemplos destes modelos. Já modelos simbólicos são representações altamente elaboradas da realidade, são exemplificados por mapas temáticos que são combinados com modelos analógicos (mapa base) e a informação temática traduzida.*

Enquanto modelos analógicos, destaca-se os modelos numéricos de terreno que têm por objetivo extrair informações quantitativas e qualitativas de fenômenos reais, com base em amostragem desses fenômenos (FELGUEIRAS & NAMIKAWA, 1993). A modelagem numérica de terreno – [*possui uma série de nomenclaturas (MDE, MDS e MDT) que serão expostas a seguir*] - permitiram contribuições significativas para estudos geográficos, como em visualizações tridimensionais do terreno, análise de declividade, extração de curvas de nível e análises estatísticas. Com os avanços tecnológicos dos últimos anos, a elaboração de modelos digitais ganhou nova importância.

Como citado por Correia (2008), a modelagem digital de terreno surgiu com os trabalhos de Miller e Laflamme no *Laboratório de Fotogrametria do Instituto de Tecnologia de Massachussets* na década de 1950 (FELICÍSIMO, 1994). Em termos de Geociências, destacam-se algumas aplicações como efeito de sombreamento para visualização de relevo (HOBBS, 1999); modelagem de paisagem e aplicações em SIG (POLI, 2004) extração de redes de drenagem (ZEVENBERGEN & THORNE, 1987) e

estudos sedimentares (MONTGOMERY, 2003). Para a compreensão da pesquisa é importante destacar algumas das variações de terminologias existentes referentes aos tipos de modelos digitais existentes. Estes são por vezes conflitantes, mas ainda sem padronização (CORREIA, 2008). Alguns conceitos referentes a essas nomenclaturas são apresentados e fundamentados a seguir.

- **Modelo Numérico de Terreno – MNT**

A compreensão da elevação e do relevo terrestre apresentou avanços significativos com a expansão da rede de computadores e ferramentas relacionadas a análise espacial de dados geográficos. Segundo Felgueiras e Câmara (1999), um Modelo Numérico de Terreno é “*uma representação matemática da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre.*” Com o propósito de representar uma superfície real, em meio computacional, é imprescindível que se crie um modelo digital, podendo este ser representado desde equações analíticas até grade de pontos, que possa transmitir ao usuário as características espaciais do terreno, estes modelos numéricos podem ser gerados por amostragem ou interpolação, sendo indicado para fins geomorfológicos e de infraestrutura que necessite de dados de elevação (FELGUEIRAS & CÂMARA, 1999).

- **Modelo Digital de Elevação - MDE**

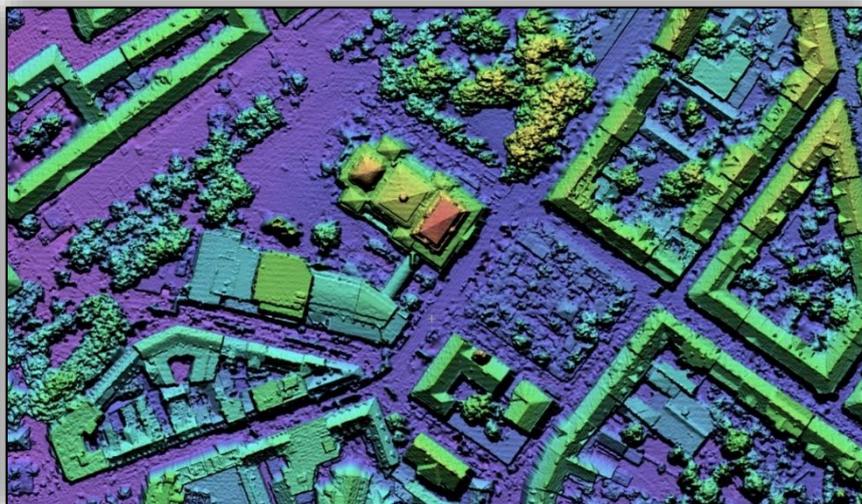
A partir de Burrough (1986), conceitua-se um Modelo Digital de Elevação como qualquer representação digital de uma variação contínua do relevo no espaço, portanto, um conjunto de dados especializados que representam a elevação de uma determinada superfície entre pontos de elevação conhecidos, num determinado sistema de coordenadas geográficas. Um dos primeiros produtos derivados das fotografias aéreas com alta resolução, estes modelos foram adquiridos por muitos programas governamentais, agências de gestão e empresas comerciais que necessitam deste tipo de dado.

Um dos programas mais relevantes do mundo, relacionado com a obtenção de dados de relevo é o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), numa parceria entre a NASA, a agência espacial alemã (DLR), e a agência espacial italiana. Com dados de radar levantados por 11 dias durante o ano 2000, percorrendo todo o planeta a missão SRTM visa a criação de um banco de dados de relevo para todo planeta. No Brasil, a EMBRAPA fornece gratuitamente os MDE SRTM para o território nacional. Há também o projeto TOPODATA, um banco de dados geomorfométricos do Brasil, geridos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que fornece os MDE interpolados para 30 metros para todo o Brasil (VALERIANO, 2010).

- **Modelo Digital de Superfície - MDS**

Com a expansão do uso de imagens com alta resolução espacial, a precisão altimétrica seguiu o mesmo panorama de crescimento, então surgindo o questionamento das formas de representação espacial do relevo que pudessem distinguir detalhes da cobertura vegetal e da cobertura urbana. Existem diversas terminologias e interpretações referentes aos modelos representativos da superfície terrestre, sendo importante compreender a terminologia e interpretação de cada.

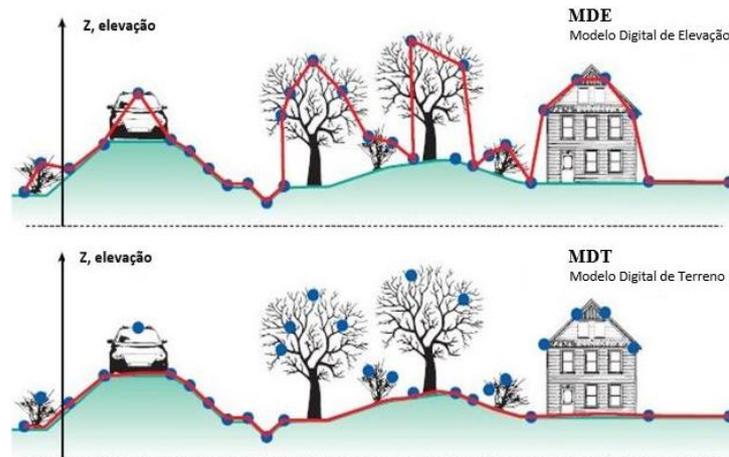
Segundo Cruz (2011), os Modelos Digitais de Superfície representam a superfície do terreno acrescida de quaisquer objetos existentes sobre ela. Os MDS são interpretados como modelos que representam elevações do topo de superfícies refletoras, como edifícios e vegetação, sendo especialmente relevantes para gerenciamento de telecomunicações, segurança aérea, gerenciamento florestal, modelagem e simulações tridimensionais. (MAUNE et al.,2001). Um exemplo de MDS é apresentado na Figura 6.



**Figura 6** – Exemplo de Modelo Digital de Superfície (Fonte: Suporte PCI Geomatics)

- **Modelo Digital de Terreno – MDT**

Se o modelo contém informações sobre a elevação da vegetação, edificações e terreno ele é denominado MDE. Se toda informação sobre a vegetação e edificações foi removida, então ele é denominado modelo digital de terreno da superfície nua (JENSEN, 2009). Em termos gerais, MDE é definido como um modelo geral para representar elevação, e o atributo “terra nua” implica elevações dos terrenos, apenas, sem vegetação ou objetos antrópicos, nesse caso é nomeado como modelo digital de terreno (MAUNE, 2001). A Figura 7 esclarece as diferenças entre MDE e MDT.



**Figura 7-** Diferenças entre Modelo Digital de Elevação e Modelo Digital de Terreno (Fonte: Google Imagens- Adaptado pelo autor)

Os MDT são dedicados à exploração geomorfológica do terreno, por limitar a área de interesse, com isso diversas aplicações podem resultar de usos diretos destes modelos, como a formação de relevos, alterações hidrológicas, e também pode ser dedicado às alterações da geomorfologia urbana devido ao processo de aceleração da erosão e sedimentação, escorregamento de massas e outros processos (BARBOSA, 2017). Mesmo havendo diversas denominações para conceituar os modelos que representam tridimensionalmente os diferentes fenômenos que ocorrem no espaço geográfico, deve-se limitar essa escolha conforme o objeto de estudo.

Na presente pesquisa optou-se pela denominação **modelo digital de elevação** para se referir à representação tridimensional gerada. Como dito anteriormente, as nomenclaturas podem variar de acordo com o pesquisador e o objeto de estudo, na presente pesquisa a escolha da sigla MDE é dada pelo nível de detalhamento que se objetiva extrair da imagem. Tal representação abrange o relevo natural da área de estudo, mas também objetiva contemplar objetos antrópicos dispostos na superfície, enquadrando-se, portanto, na definição de Burrough (1986).

Segundo Barros e Cruz (2007), diversos trabalhos foram desenvolvidos no sentido de avaliar a qualidade de MDEs como em Toutin & Cheng (2002), e alguns deles focando especificamente no SRTM como Gonçalves et al. (2005) e Barros et al. (2005). Como ressaltado por Barros e Cruz (2007), em geral, trais trabalhos demonstraram bom desempenho para estes dados, facilitando o acesso a dados tridimensionais que antes estavam disponíveis para um número reduzido de usuários. Nesse contexto, considerando sensores orbitais de resolução espacial submétrica, que também são capazes de gerar dados tridimensionais, também é necessário avaliar os produtos gerados, afim de se

enquadrar as escalas e possíveis aplicações de MDE provenientes de sensores de altíssima resolução espacial.

### 2.3 – ESCALAS EM GEOCIÊNCIAS

O tema escala tem sido recorrente na Geografia nas últimas décadas, por refletir sobre um fenômeno e sua extensão espacial, independentemente do ator responsável por ele, considerando que este é o problema central para qualquer pesquisa na disciplina (CASTRO, 2014). Uma vez que dados e informações geográficas se relacionam com objetos espaciais de diferentes dimensionalidades, a compreensão das dinâmicas em função da extensão dos fenômenos e sua exatidão, são importantes questões a serem consideradas. Como citado por Menezes e Fernandes (2013) uma limitação do geoprocessamento é a não consideração da dimensionalidade dos dados e informações a serem trabalhadas, a não uniformidade das paisagens dificulta a definição de modelos fechados. A construção de modelos representativos da realidade é a primeira barreira a transpor para se obter sucesso em uma análise (MENEZES & FERNANDES, 2013).

Como ponto de partida, apresenta-se o conceito de escala na presente pesquisa por se tratar de parte indissociável de estudos geográficos, uma vez que a escala é o artifício analítico que confere visibilidade à parcela ou dimensão do real (CASTRO, 2014). No âmbito geográfico, o conceito de escala subdivide-se principalmente em: a) *geográfica* e b) *cartográfica*. A escala geográfica refere-se à extensão espacial, à abrangência ou dimensão do fenômeno estudado (MENEZES e FERNANDES, 2013). Nas Engenharias, a extensão também pode significar a magnitude de um determinado projeto, por exemplo, um projeto em grande escala cobre uma grande área, enquanto um projeto de pequena escala recobre uma área pequena, assim como pessoas envolvidas no mesmo (LONGLEY et. al, 2013).

Por fim, escala cartográfica pode ser definida como a relação, ou proporção (*adimensional*), existente entre as distâncias lineares representadas em um mapa e àquelas existentes no terreno (FITZ, 2008). Citado por Menezes e Fernandes (2013), segundo Dent (1985), “*quanto maior a escala de um mapa, maior o nível de detalhamento e a quantidade de informações representadas e menor a generalização imposta aos elementos mapeados e a área de abrangência levantada*”.

Destacada a relevância da escala para estudos geográficos, há também a preocupação da adequação dos produtos provenientes das manipulações em SIG, em vista da quantidade de dados e informações que podem ser geradas atualmente. No Brasil, O Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 estabelece as *Instruções Reguladoras das*

*Normas Técnicas da Cartografia Brasileira* através de procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de documentos cartográficos no território brasileiro, criando o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC (BRASIL, 1984). O PEC estabelece a relação entre erro e precisão, apontando parâmetros para a definição de padrões de exatidão, tanto em nível planimétrico quanto altimétrico (MENEZES e FERNANDES, 2013). Serão enquadrados no PEC, erros altimétricos e planimétricos que não ultrapassem 90% dos pontos, e o Erro Médio Quadrático (EMQ) menor ou igual aos tabulados.

Os produtos enquadrados pelo PEC referem-se a dados analógicos e, mesmo após o advento da Cartografia Digital esta prática permaneceu por considerável período de tempo (ET-ADFV, 2016). Nesse contexto, muito apoiado pelo crescimento do geoprocessamento, especialmente os SIG, surgiu a necessidade de se definir um padrão de avaliação para os produtos em meio digital. A padronização, em território nacional, se deu por meio da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geospaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre (ET-ADGV) do Departamento de Ciência e Tecnologia do Exército Brasileiro.

Os valores propostos para os produtos digitais produzidos pela Especificação Técnica dos Produtos de Conjuntos de Dados Geospaciais (ET-PCDG) são baseados por aqueles estabelecidos pelo PEC, decreto 89.917 de 1984, e estabelecem, portanto, o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Os valores e enquadramentos do PEC e do PEC-PCD, para planimetria e altimetria, são ilustrados pela Figura 8 e Figura 9, respectivamente, segundo ET-ADGV (2016) o valor (1) na tabela representa “os valores determinados, ou adaptados, com base nos valores do PEC Planimétrico previstos no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984, (2) os Produtos Cartográficos Digitais, baseado nos valores utilizados pelo “Ordinance Survey” e “National Joint Utilities Group” do Reino Unido, para a altimetria (curvas de nível) Valores do PEC-PCD iguais a 1 equidistância e EP de 3/5 da equidistância do produto cartográfico.”

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

**Figura 8** – Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria (Fonte: ET-ADGV)

PEC-PCD	1:1.000 (Eq=1m)		1:2.000 (Eq=1m)		1:5.000 (Eq=2m)		1:10.000 (Eq= 5m)		1:25.000 (Eq= 10 m)		1:50.000 (Eq= 20 m)		1:100.000 (Eq=50 m)		1:250.000 (Eq = 100 m)	
	PEC (m)	EP(m)	PEC (m)	EP(m)	PEC (m)	EP(m)	PEC (m)	EP(m)	PEC (m)	EP(m)	PEC (m)	EP(m)	PEC (m)	EP(m)	PEC (m)	EP(m)
<b>A</b>	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,7	1,67	5,5	3,33	13,7	8,33	27,0	16,67
<b>B</b>	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,000	33,33
<b>C</b>	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
<b>D</b>	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,5	5,00	15,00	10,00	37,5	25,00	75,000	50,00

**Figura 9** – Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimetria dos Produtos Cartográficos Digitais (Fonte: Adaptado de ET-ADGV)

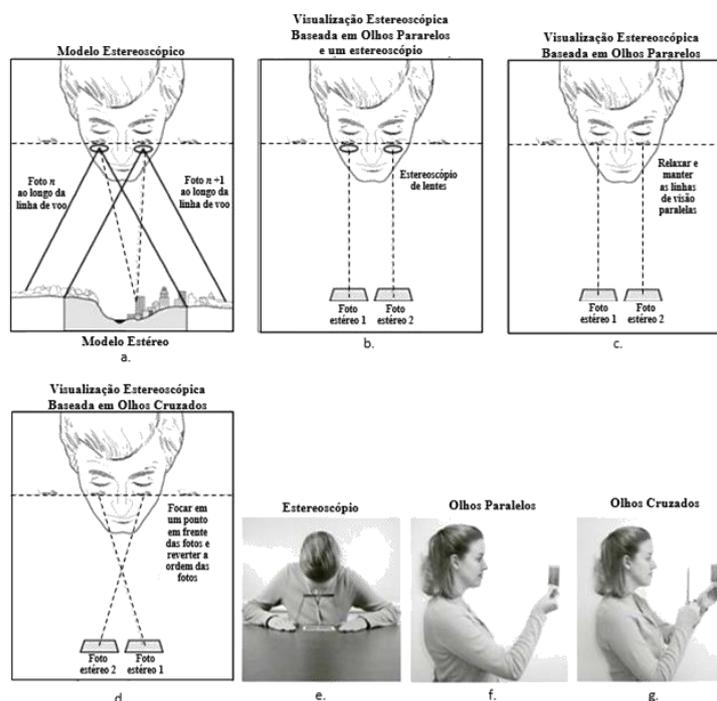
## 2.4 ESTEREOSCOPIA

A observação da Terra, segundo uma perspectiva aérea, permite a identificação de objetos, padrões e as interações entre o homem e o planeta, que poderiam nunca ser completamente compreendidos se as observações fossem limitadas a uma visada a partir da superfície terrestre (JENSEN, 2009). A perspectiva aérea permitiu o desenvolvimento de técnicas e metodologias relacionadas com a tomada de imagens pelas técnicas de sensoriamento remoto, principalmente. O avanço na interpretação de imagens por sensoriamento remoto avançou à medida que possibilitou a tomada de perspectiva sob dois níveis em especial: o orbital e o aéreo. A possibilidade de ampliar a escala geográfica de estudo, segundo uma perspectiva que pode ser obtida desde uma aeronave, como os VANT até satélites com altíssima resolução espacial, permitiu a geração de informação com relação ao terreno de forma que não seria possível caso se mantivesse a limitação de se manter na superfície.

Contudo, ao se interpretar imagens verticais e oblíquas, esbarra-se em uma dificuldade inerente ao próprio ser humano, uma vez que estão acostumados a observar lateralmente os objetos a partir da superfície terrestre e, normalmente, não tem uma avaliação precisa dos objetos imageados a partir de uma perspectiva vertical ou oblíqua (HAACK *et al.*, 1997). Buscando superar estas dificuldades, as técnicas de fotogrametria evoluíram ao ponto que também é possível obter visão tridimensional do terreno, se aproximando da forma binocular com a qual os olhos humanos percebem o mundo. Para se criar esse efeito, simula-se os olhos humanos, através de duas, ou mais, fotografias ou imagens do terreno, sob perspectivas diferentes, a chamada estereoscopia.

A estereoscopia é o que possibilita a percepção de profundidade na área sobreposta de um par de fotografias áreas. O processo de visualização tridimensional em fotogrametria se dava por meio do uso de equipamentos (restituidores) com a condição

da tomada de fotos com sobreposição entre si, possibilitando ao observador visualizar uma das fotos do chamado par estéreo, com o olho direito e o seu par adjacente com o olho esquerdo. Tal representação é apresentada na Figura 10.



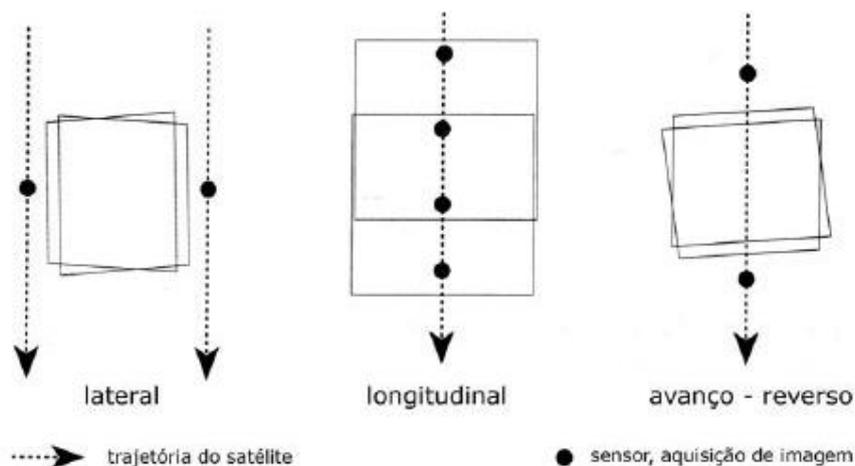
**Figura 10** - Tipos de Visualização Estereoscópica baseados em Fotogrametria. (Fonte: Adaptado pelo autor - Jensen, 2009)

Uma vez que o especialista foca sua observação, num prédio por exemplo, a mente associa as diferenças no *ângulo paralático*. O aparente deslocamento de um objeto qualquer, em função de uma mudança no ponto de visada (FITZ, 2008) e então a diferença entre a base e o topo do edifício é identificada como informação da percepção de profundidade (JENSEN, 2009).

No sensoriamento remoto, a tomada de pares estereoscópicos (duas imagens tomadas sob perspectivas diferentes), teve início com a missão Spot, iniciada pelo Spot-1 em 1986, que trouxe as visadas laterais como uma novidade perante aos sensores lançados até o momento. Segundo Correia (2008). As visadas laterais do Spot-1, afastadas da vertical por até 27° de basculamento do sensor em relação à plataforma do satélite, permitiu a formação de pares estereoscópicos com duas imagens de órbitas distintas representando avanços, inclusive com o surgimento do conceito de período de revisita, já que o tempo entre as duas tomadas era inferior à resolução temporal. (CORREIA, 2008).

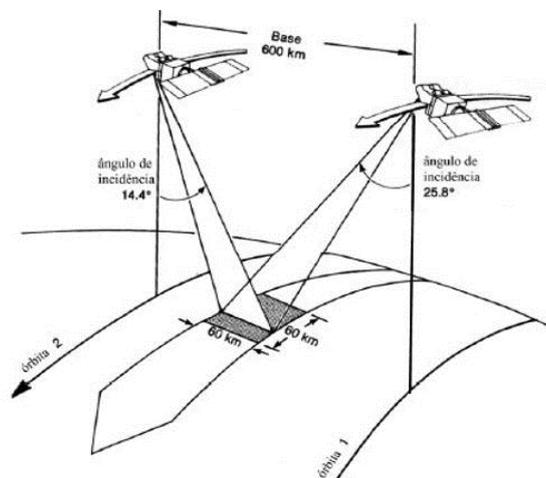
Com relação aos sensores orbitais, a estereoscopia é formada superposição lateral, longitudinal e avanço-reverso (GDTA, 1995). A estereoscopia de superposição lateral, forma-se pela tomada área de duas imagens, uma imagem lateral “direita” e outra lateral

“esquerda”, devido as inclinações dos eixos dos sensores. A superposição sequencial de imagens pelo sensor, na posição vertical, refere-se ao longo da trajetória do satélite, com pelo menos 60% de superposição, a exemplo do clássico método fotogramétrico (GDTA, 1995). Segundo Correia (2008), no avanço-reverso, o sensor compreende um sistema de imageamento móvel, ou dois sistemas fixos, segundo visada reversa no sentido oposto ao deslocamento do satélite e visada de avanço no sentido da trajetória. As formações estereoscópicas são apresentadas na Figura 11.



**Figura 11** - Modos de obtenção de estereoscopia em sensoriamento remoto. Fonte: GDTA (1995)

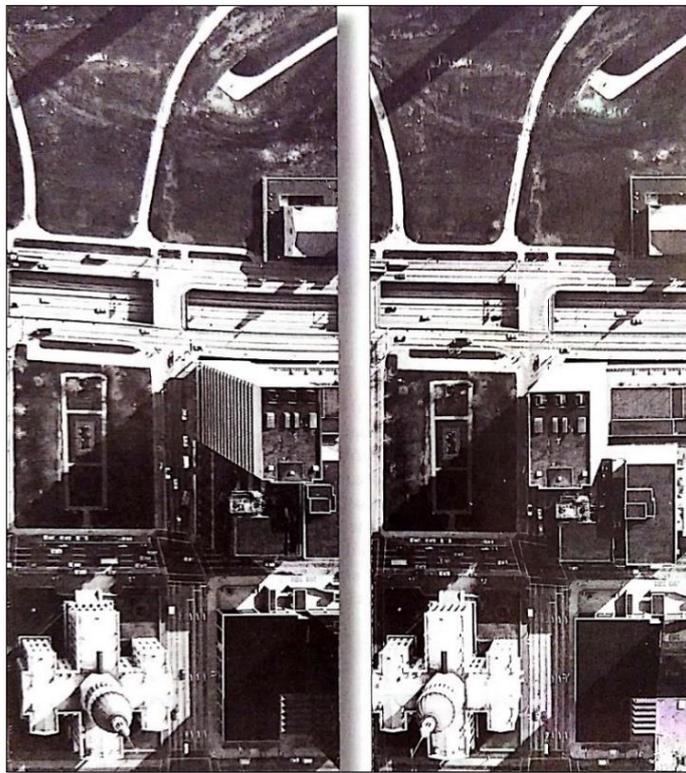
Para sensores cuja disposição aérea consiste em dois satélites de mesma órbita, tal como o Worldview-3, a tomada de imagens resulta em um par em que cada imagem corresponde a uma tomada lateral, no caso a primeira imagem capturada é a imagem da direita, enquanto a segunda, considera-se a imagem da esquerda (Figura 12), essas informações são disponibilizadas nos metadados das imagens.



**Figura 12**- Exemplo de Estereoscopia Lateral (Fonte: Adaptado de Sabins, 1999)

Com o resultado das diferentes tomadas, o modelo 3D é gerado por meio das faces de uma construção ou objeto que fora capturado, desde que ambas as imagens tenham

datas consistentes e ângulo de incidência solar equivalente (QIN, 2011). O resultado é um par de imagens em diferentes ângulos (Figura 13).



**Figura 13-** Estéreo-Par St. Louis – Missouri (Fonte: Jensen, 2009)

## 2.5 GEOTECNOLOGIAS E O ESPAÇO URBANO

As geotecnologias são importantes ferramentas de análise espacial e em especial para a compreensão da dinâmica nas áreas urbanas. Segundo Rosa (2005) constituem:

*" As geotecnologias são compostas por soluções em hardware, software e peopleware que juntos constituem poderosas ferramentas para tomada de decisões. Dentre as geotecnologias podemos destacar: sistemas de informação geográfica, cartografia digital, sensoriamento remoto, sistema de posicionamento global e a topografia georreferenciada." (pag.81)*

As geotecnologias passaram a ocupar um espaço importante na atuação profissional de diferentes especialistas, principalmente nas ações voltadas ao controle e monitoramento ambiental e urbano.

O acelerado crescimento da população urbana representa um problema direcionado às políticas públicas, principalmente quando se refere à infraestrutura que deve acompanhar a expansão decorrente, pois muitas vezes ocorre um crescimento abrupto não acompanhado por serviços simples, tais como abastecimento de água,

saneamento básico e rede de transportes, por exemplo. Para solucionar os problemas fomentados por tal crescimento, é necessário que se tenha a elaboração de planos diretores voltados para o desenvolvimento, planejamento e manutenção do espaço urbano. Com informações minuciosas da cobertura do solo num determinado local é possível gerar uma série de estudos que possam colaborar para um maior controle deste crescimento acelerado. As técnicas de sensoriamento remoto podem contribuir com esta evolução, principalmente por unir dados de diferentes naturezas, como dados populacionais tabulados e mapas de risco de encostas em conjunto, por exemplo. Vale citar que novas técnicas vêm fomentando ainda mais conhecimento, desde o uso dos sensores hiperespectrais, aos de alta resolução espacial, possibilitando uma análise mais eficiente com potencial de uso.

De forma distinta a outros alvos, as áreas urbanas não possuem um comportamento espectral homogêneo, havendo diversas coberturas que as compõem quando comparados a outros alvos como a vegetação e os corpos hídricos. Considerando as diferenças de materiais, o concreto, asfalto, diferentes tipos de telhados que possuem composições diferentes, formas e arranjos, também variam por localidade estudada, uma vez que as ocupações locais podem ocorrer de formas distintas em áreas geograficamente distantes.

Sendo assim, com o advento do sensoriamento remoto, a análise adequada depende primordialmente da resolução espacial da imagem escolhida - *a capacidade que um dado sensor tem para se representar a menor feição passível de detecção pelo instrumento em questão* (NOVO, 2010) - mas também é bastante relevante que se tenha resolução espectral apropriada, ou seja, segundo Novo (2010), a resolução espectral é uma medida de largura das faixas espectrais e da sensibilidade do sistema sensor em distinguir entre dois níveis de intensidade a fim de se obter a maior diferenciação possível dos alvos. Também é essencial a escolha de um sensor com alta resolução temporal, que se refere a capacidade do sensor em visitar uma determinada área tomando imagens da mesma. Quando o estudo em questão aborda dinâmicas urbanas, como detecção de mudanças e processos de expansão, o fenômeno pode ser tão abrupto que a compreensão mais meticulosa possível contribui para resultados de mapeamentos mais precisos.

Como demonstrado por Netzband e Jürgens (2007), o sensoriamento remoto aplicado em áreas urbanas é definido como a medição da reflectância da superfície e das propriedades ligadas à cobertura e uso dos solos nas cidades. Com uma gama de sensores disponíveis, dados cada vez mais específicos e aprimorados vêm sendo gerados e

fornecidos, à medida que a demanda é cada vez mais crescente, com informações aprimoradas em diferentes escalas espaciais, temporais, espectrais e radiométricas.

Considerando as particularidades atribuídas às diferentes áreas urbanas (espaço construído), há uma infinidade de informações a se considerar para a análise com sensoriamento remoto. Uma análise qualitativa deve sempre considerar aspectos como: forma, brilho, cor, textura, e análise de contexto, especialmente quando se realiza um mapeamento de uso e cobertura.

Segundo Kurkdjian (1993), as aplicações do sensoriamento remoto no urbano se dão em duas linhas:

1. *Voltada ao conhecimento e à ação sobre o sistema urbano e sua relação com o meio físico que o sustenta (estudos geológicos, geomorfológicos, de aptidão de terras, direção da expansão urbana, adensamento urbano, etc). Imagens apropriadas para estes levantamentos: Resolução espacial entre 30-50 m, nas faixas espectrais do vermelho visível ao infravermelho.*
2. *Voltada para geração de informações para identificar o tipo de uso e sua conformidade com a Lei de Zoneamento, impermeabilização do solo, localização de vazios urbanos, identificação de áreas para implantação de projetos de arborização, caracterização de áreas residenciais, mapeamento de áreas sujeitas a inundação, ilhas de calor, sistema viário, áreas verdes, regularização fundiária, estimativa populacional, áreas de ocupação irregular ou espontânea etc. Segundo o autor as imagens mais apropriadas para levantamento de dados em áreas urbanas são as de alta resolução espacial.*

Donnay et al (2001), Mesev (2003) e Jensen (2009) apontam que o maior obstáculo na utilização das imagens orbitais para estudos intraurbanos até 1999 esteve relacionado à resolução espacial das imagens. Mudanças nas características dos sistemas sensores, com resolução espacial submétrica, permitiram a geração de imagens com maior precisão dos elementos da superfície terrestre e, conseqüentemente, dos elementos de cobertura do solo intraurbano. É nesse contexto que avança em paralelo o uso de novas plataformas e sensores voltados a geração de dados tridimensionais para aplicações urbanas.

Para se compreender as formas e processos que constituem o espaço urbano é importante aprofundar o debate sobre a sua relação com a sociedade, uma vez que o espaço é a própria sociedade (SANTOS, 1999). Os mais diversos atores sociais que

impõem influências na construção do espaço agem por meio de interesses próprios, de alguma forma pegando emprestado elementos inerentes a sociedades anteriores. Para Manuel Castells (1972) o espaço “*é um produto material em relação a outros produtos materiais - inclusive as pessoas – as quais se envolvem em relações sociais [historicamente] determinadas que dão ao espaço uma forma, uma função e um sentido social*”.

Segundo Corrêa (1989) o espaço numa grande cidade capitalista é constituído, inicialmente de sua apreensão, no conjunto de diferentes usos da terra justapostos entre si, complexos e distintos, estes usos formam a organização espacial da cidade através de um sistema de fluxos, sejam eles de capital, informação, tecnologia ou outros. Este conjunto de diferentes usos da terra é propriamente dito a organização espacial da cidade, heterogênea, fragmentada, distinta. Esses conceitos são apoiados por Lefebvre (2000), afirmando que “*enquanto produto, por interação ou retroação, o espaço intervém na própria produção: organização do trabalho produtivo, transportes, fluxos de matérias-primas e de energias, redes de repartição de produtos*”. Beaujeu-Garnier (1995) aponta que o ambiente urbano é um espaço produzido resultante da interação entre o meio físico e da ação humana, sendo nesse espaço que desenvolvem as relações sociais que configuram os ambientes urbanos. É, portanto, o espaço urbano, um local dependente da ação antrópica, sendo naturalmente produzido e inerente a cada sociedade.

Segundo Jensen (2009), as paisagens urbanas são compostas por um conjunto diversificado de materiais, como concreto, asfalto, metal, telhados, vegetação, árvores e solo, dispostos de maneira complexa e que variam de acordo com o lugar, podendo ter diversas ordenações espaciais. Um grande número de profissionais, instituições e pesquisadores demandam constantemente informações atualizadas sobre a infraestrutura urbana e periurbana (CARLSON, 2003). Nesse contexto, com o advento do sensoriamento remoto, as informações espaciais ganharam uma nova perspectiva, à medida que as novas tecnologias puderam abranger fenômenos urbanos que possuem forte caráter espacial, com ciclo de desenvolvimento identificável.

## **2.6 SENSORIAMENTO REMOTO**

O sensoriamento remoto, segundo Jensen (2009), é uma ciência que aborda a aquisição de dados sobre um objeto sem o contato direto com o mesmo. Novo (2010) define o sensoriamento remoto como sendo a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados, a bordo de plataformas (aeronaves, espaçonaves ou outras), com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e

processos que ocorram na superfície do planeta, a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações.

O termo geoprocessamento, segundo Câmara e Davis (2001), denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. Das geotecnologias que caracterizam o geoprocessamento, fazem parte a *Modelagem Numérica De Terreno* (MNT), o sensoriamento remoto, o banco de dados geográficos (BDG), o sistema de posicionamento global (GPS) e os sistemas de informação geográficas (SIG) (MENEZES & FERNANDES, 2013).

O uso das técnicas de sensoriamento remoto pode ser explicado pela facilidade que o imageamento oferece quando comparado a técnicas empregadas em campo: continuidade espacial da imagem, que pode cobrir grandes áreas simultaneamente; possibilidade de mapear lugares, inacessíveis ou de difícil acesso, de forma rápida e a baixo custo; possibilidade de extrair informações ecológicas e do estado de conservação de bosques; e capacidade de detectar mudanças temporais, avaliando impactos causados por desastres naturais e/ou antrópicos (ARAÚJO, 2010).

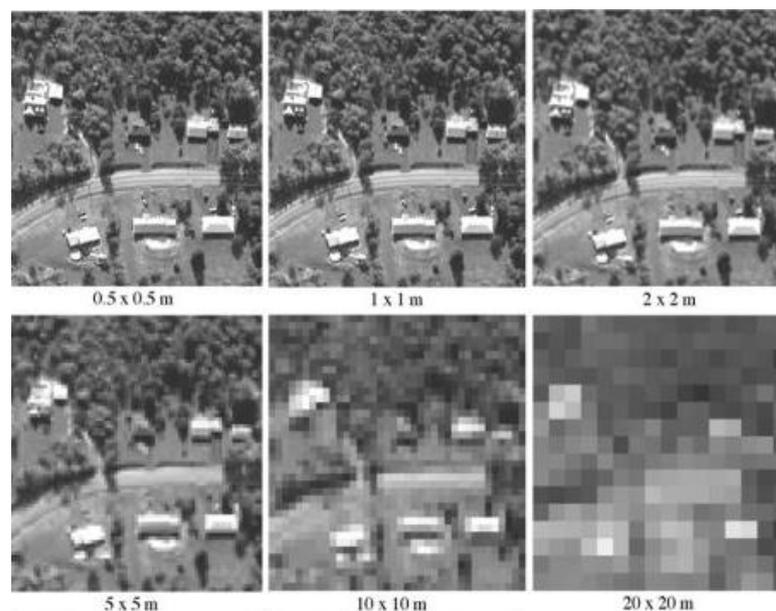
#### 2.6.1 Resolução Espacial

O termo resolução, em sensoriamento remoto, remonta ou seja, a menor separação angular ou linear entre dois objetos que pode ser determinada pelo sistema de sensoriamento remoto, chamada de *resolução espacial*, o quão frequentemente um sensor a quatro principais vertentes: Segundo Jensen (2009) estas variantes são encontradas no registro da energia eletromagnética refletida, emitida ou espalhada em bandas – denominada *resolução espectral*, aos atributos espaciais dos objetos no terreno, registra imagens de uma área particular – *resolução temporal*, e, por fim a sensibilidade de um detector remoto quanto as diferenças na potência do sinal à medida que ele registra o fluxo radiante emitido, em suma, define o número de níveis digitais registrados numa imagem, que é a *resolução radiométrica* (JENSEN, 2009).

Muitos sistemas de sensoriamento remoto em satélites, usam sistemas ópticos que têm um campo de visada instantâneo (IFOV) constante, assim, a *resolução espacial nominal* de um sistema sensor é definida como a dimensão em metros do IFOV projetado no terreno (JENSEN, 2009). Em termos práticos, os *pixels* – *menor estrutura numa representação matricial* – de uma imagem são representados em termos de largura e comprimento. Ao se referir a resolução espacial, portanto, há referência ao tamanho do pixel representado na imagem, para exemplificar, o sensor OLI a bordo do Landsat 8 tem

resolução espacial 15 m x 15 m em sua banda pancromática e 30 x 30 m nos canais espectrais, sendo essas as menores unidades representadas no terreno em função do tamanho dos pixels na estrutura.

Ehlers (2005) propôs uma categorização dos sistemas sensores em função da resolução espacial. Segundo a proposta, sensores que apresentam uma resolução menor que 1 metro: “*Altíssima*”; entre 1 e até 4 m: “*Muito Alta*”, maior que 4 e até 10 m: “*Alta*”; maior que 10 e até 50 m: “*Média*”; maior que 50 e até 250 m: “*Baixa*”, e maior que 250 m: “*Muito Baixa*”. As diferenças visuais entre as diferentes categorias de resolução espacial são ilustradas na Figura 14.



**Figura 14** – Diferentes resoluções espaciais (Fonte: Jensen, 2009)

### 2.6.2 A Missão Worldview

A empresa DigitalGlobe® é a responsável por uma constelação de satélites, que objetivam o monitoramento da superfície terrestre, fomentando a tecnologia e educação em todo mundo. A DigitalGlobe® opera a constelação mais ágil e sofisticada de satélites comerciais de imagem de alta resolução. Juntos, *WorldView-1*, *GeoEye-1*, *WorldView-2*, *WorldView-3* e *WorldView-4* são capazes de coletar mais de um bilhão de quilômetros quadrados de imagens de qualidade por ano e oferecer revisitas diárias ao redor do globo (DIGITALGLOBE, 2018).

A missão WorldView teve seu primeiro satélite lançado em 2007 com o WorldView-1, como o satélite mais rápido já comercializado. Com sua alta capacidade, as imagens pancromáticas fornecem imagens com resolução de 0.5m. Com sua capacidade de geolocalização eficiente, o Worldview-1 fornece soluções eficientes em imagens estéreo, favorecendo a geração de modelos digitais pelo processo de estereoscopia. O segundo satélite WorldView lançado em, 2009, representou uma

inovação ainda maior na área, pois é o primeiro satélite com alta resolução espacial que fornece 8 bandas espectrais, numa faixa de comprimento de onda que vai do azul até o NIR (Infravermelho Próximo). O sistema sensor do satélite WorldView-2 além das quatro bandas multiespectrais clássicas (Vermelho, Azul, Verde e Infravermelho próximo-1), tem mais quatro novas bandas (*Costeiro, Amarelo, Vermelho Costeiro, e o Infravermelho Próximo 2*) (EMBRAPA 2009).

Já o Worldview-3, lançado em 13 de agosto de 2014, e com comercialização em 2015, é um satélite da DigitalGlobe, com capacidade de adquirir imagens de alta resolução espectral através do sensor SWIR (Infravermelho em ondas curtas) e um sensor CAVIS (Da sigla: *Cloud, Aerosol, Water, Vapor, Ice and Snow*) que possui a capacidade de visualização de áreas com presença de interferências atmosféricas tanto quanto as ocorrências de fenômenos ocorridos nesta esfera terrestre. A Tabela 2 identifica as principais características das imagens Worldview-3.

**Tabela 2:** Características geométricas, espaciais e espectrais do satélite Worldview-3 (Fonte: Adaptado pelo autor)

Lançamento	13 de agosto de 2014
Órbita	Heliossíncrona
Altitude	617 km
Faixa de Imageamento	13,1 km em Nadir
Resolução Radiométrica	11 bits na Pancromática, 14 bits SWIR
Resolução Espacial	31 cm (Pancromático) de 2 m a 1.2m (Multiespectral)
Estereoscopia	<b>Disponível</b>
Bandas Multiespectrais	Azul: 450-510 nm Verde: 510-580 nm Vermelho: 630-690 nm Coastal: 400-450 nm Red Edge: 705-745 nm Near IR1: 770-895 nm Near IR2: 860-1040 nm Amarelo: 585-625 nm
Bandas SWIR (Infravermelho de Ondas Curtas)	SWIR 1: 1195-1225 nm SWIR 2: 1550-1590 nm SWIR 3: 1640-1680 nm SWIR 4: 1710-1750 nm SWIR 5: 2145-2185 nm SWIR 6: 2185-2225 nm SWIR 7: 2235-2285 nm SWIR 8: 2295-2365 nm

A Tabela 3 resume as principais diferenças dos sensores pertencentes a DigitalGlobe. As características são resumidas de acordo com as características espectrais e espaciais de cada um.

**Tabela 3:** Diferenças entre imagens de altíssima resolução Espacial (Fonte: Adaptado pelo Autor)

<b>Worldview-1</b>	<b>GeoEye-1</b>	<b>Worldview-2</b>	<b>Worldview-3</b>	<b>Worldview-4</b>
Características Espectrais: PAN	Pan + 4 MS	Pan + 8 MS	Pan + 8 MS + 8 SWIR	Pan+4MS
Resolução PAN: 0.50 m	0.41 m	0.46 m	0.31 m	0.31 m
Resolução MS: N/A	1.64 m	1.85 m	1.24 m	1.24 m

## 2.7 LEVANTAMENTO POR GNSS

Uma das principais etapas para a geração de modelos tridimensionais com foco em áreas urbanas consiste no levantamento de coordenadas *in situ*, utilizando equipamentos específicos, uma vez que um projeto de Geodésia envolve atividades relacionadas com planejamento, coleta, análises preliminares, processamento e ajustamento de dados (MONICO, 2008). Certos instrumentos são fundamentais em levantamentos que buscam posicionar espacialmente um objeto. Atualmente, a tarefa de posicionamento global pode ser realizada com relativa facilidade, valendo-se da disponibilidade de satélites artificiais voltados para a precisão do posicionamento. Determinar as coordenadas e realizar levantamentos em campo tornou-se uma tarefa menos custosa e com resultados mais precisos.

De forma geral, os sistemas de posicionamento global têm sido chamados de GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite), este é um termo geral utilizado para enquadrar sistemas de navegação por satélite em todo mundo (MONICO, 2008). O GNSS fornece cobertura global, exemplos de GNSS incluem o *Galileo* da União Europeia, o NAVSTAR- *Sistema de Posicionamento Global* (GPS) dos EUA, o *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) da Rússia e o Sistema de Satélite de Navegação *BeiDou/COMPASS* da China (GSA, 2017). O mais famoso sistema de posicionamento global, o GPS, consiste em um sistema com 24 satélites, transmitindo pulsos de rádio em intervalos de tempos precisos. Posicionar-se em três dimensões (latitude, longitude e altitude) exige que ao menos quatro satélites estejam acima do horizonte e a acurácia depende do número de satélites e de suas posições (LONGLEY et. al, 2013).

O posicionamento refere-se à determinação da posição de objetos com relação a um referencial específico, podendo ser classificado como posicionamento absoluto, também denominado posicionamento por ponto – *quando as coordenadas estão*

*associadas diretamente ao geocentro - e relativo – coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado por um ou mais vértices com coordenadas conhecidas* (MONICO, 2008). Em outras palavras, no posicionamento absoluto, quando se utilizam efemérides transmitidas, a posição é vinculada ao sistema geodésico utilizado (WGS 84, SIRGAS 200 ou outros). Já no posicionamento relativo, a posição de cada ponto é determinada com relação a uma base, cujas coordenadas são conhecidas. Destaca-se ainda o conceito de posicionamento em tempo real e o pós-processado. Segundo Monico (2008) no primeiro caso, a estimativa da posição da estação de interesse ocorre praticamente no mesmo instante que as informações coletadas, já no posicionamento pós-processado as posições em que cada ponto foi levantado são estimados em processamento posterior ao levantamento.

A utilização da tecnologia GNSS modificou em grande escala a precisão de estudos que necessitam posicionamento espacial e navegação. Nesse contexto, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) implementou em 1996 a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo por GNSS (RBMC), sob o conceito de posicionamento relativo, as estações da RBMC desempenham justamente o papel do ponto de *“coordenadas conhecidas pertencentes ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), eliminando a necessidade de que o usuário imobilize um receptor em um ponto que, muitas vezes, oferece grandes dificuldades de acesso”* (IBGE). Vale ressaltar que as estações da RBMC contam com alto grau de precisão e proporcional alto grau de confiabilidade e qualidade observacional. Os levantamentos realizados pelos sistemas GNSS, em confluência com instalação de estações tal como a RBMC, têm beneficiado diversas áreas, a se destacar agricultura de precisão em controle de produtividade, em estudos topográficos de precisão, no monitoramento ambiental, além de lazer e telecomunicações, sendo aplicado em todos os setores que revelem o posicionamento espacial de alguma forma.

#### 2.7.1 GNSS Trimble R6

Diante das diversas possibilidades de aplicação, há também no mercado grande diversidade de equipamentos GNSS apropriados para levantamentos de dados para um Sistema de Informação Geográfica (MONICO, 2008). Nesse contexto diversas fabricantes destacam-se pela diversidade de produtos disponíveis ao público. A *Trimble®*, empresa estadunidense inaugurada em 1978, disponibiliza ao público soluções na área, relacionado ao mercado de GNSS e SIG.

Dentre os sistemas comercializados pela Trimble®, está o GNSS R6, equipamento que combina um receptor GPS, antena de precisão, bateria de longa duração e comunicações integradas. Este equipamento conta com dois receptores, uma estacionária denominada base, receptor que deve ser posicionado em uma estação cujas coordenadas são conhecidas, como os marcos do IBGE. A estação base transmite sua localização bem conhecida junto com as medições de código e portadora nas frequências L1 e L2 para o *Rover* um receptor que se desloca sobre as feições de interesse que serão levantadas, o Trimble R6 se enquadra, portanto, na categoria *de posicionamento relativo pós-processado* (TIMBÓ, 2000). Os equipamentos Base e *Rover* Trimble R6 são apresentados na Figura 15.



**Figura 15** – Base, Rover e Coletora Trimble R6

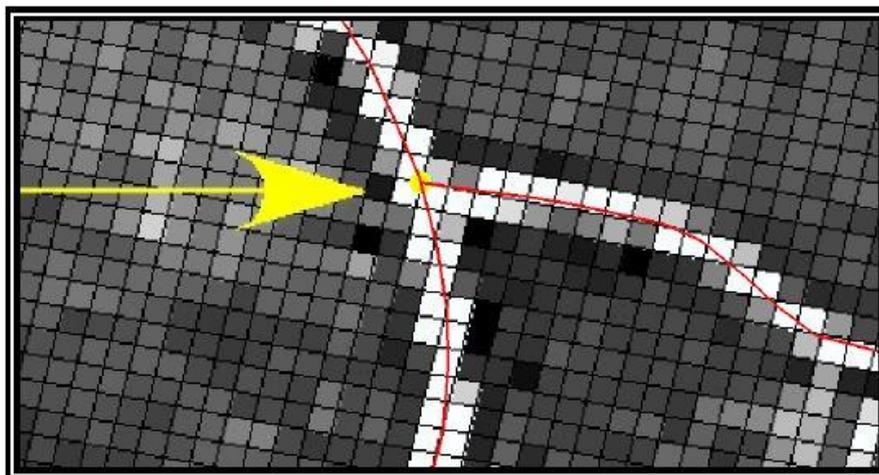
Após o levantamento de campo, os dados são retirados da Base e do *Rover* e são processados em gabinete, o que permite o levantamento em áreas cuja distância entre base e receptor são maiores e há bloqueios físicos quanto ao sinal de rádio, próprio de equipamentos que utilizam o posicionamento relativo cinemático em tempo real (RTK). A possibilidade de atuar em áreas com interferências físicas, como em grandes cidades, atribui grande destaque ao R6, sendo somente necessário um número suficiente de satélites que proporcione boa qualidade de sinal.

#### 2.7.2 Pontos de Controle de Campo (GCP)

O avanço do processamento digital de imagens permitiu aos cientistas a criação de modelos mais fidedignos da realidade, contudo, a precisão destas representações continuam sendo uma função direta da precisão obtida através do levantamento de características *in situ*, entre eles, os Pontos de Controle. A expressão genérica “*ponto de controle*”, em sensoriamento remoto, refere-se aos pontos utilizados para se corrigirem

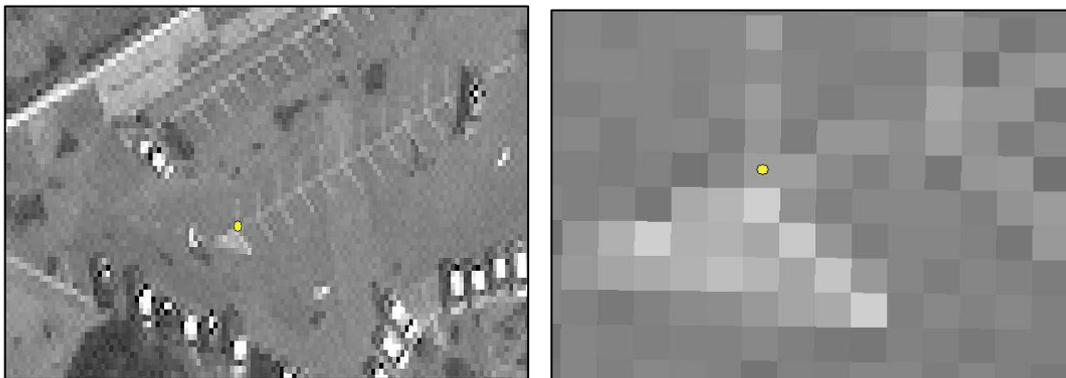
as distorções geométricas de imagens (CORREIA, 2008). Um ponto de controle no terreno (“*ground control point – GCP*”) é definido como qualquer objeto na imagem para o qual as coordenadas no terreno no mundo real, X, Y, Z são conhecidas (LINDER, 2003).

Quanto à sua obtenção, os GCP podem provir de: documento cartográfico (analógico e digital); imagem (orbital e aerofotografia, na modalidade analógica e digital); e por posicionamento pelo sistema GNSS (ABRAHÃO & CORREIA, 2005). A escolha dos Pontos de Controle deve seguir alguns critérios afim de facilitar sua identificação in situ e em gabinete. Nesse contexto, privilegia-se a escolha de locais que formem conexão em formato “T”, uma vez que estas feições são mais facilmente reconhecidas em imagens de altíssima resolução espacial, em áreas urbanas a escolha dos pontos deve ser guiada por cantos de edificações, cercas ou estradas, em função da grande resolução espacial que oferecem em geral (CORREIA, 2008). Um exemplo de conexão em imagem orbital, com 10 metros de resolução espacial, é apresentado na Figura 16.



**Figura 16** - Localização ideal de um ponto de controle (interseção dos eixos em vermelho)  
(Fonte: Abrahão e Correia, 2005)

Em imagens cujo detalhamento de alvos é menor, é recomendado a preferência por locais cuja identificação seja a melhor possível, utilizando interseções de eixos de feições lineares, como estradas, por exemplo, devido à menor definição dos cantos nas imagens de média resolução (CORREIA, 2008). Em imagens orbitais com altíssima resolução espacial, em áreas urbanas, feições como pinturas e sinalizações na pista e ao redor dela, quinas de canteiros e jardins, entre outros, são facilmente identificáveis (CARVALHO, 2011). Um exemplo da demarcação destes pontos em imagem com 0.30 m de resolução espacial é apresentado na Figura 17.



**Figura 17** – Demarcação de GCP em imagem Worldview-3 (canal pancromático).

Ainda com relação a escolha dos Pontos de Controle, o PCI Geomatics (2018) recomenda alguns cuidados extras, tais como:

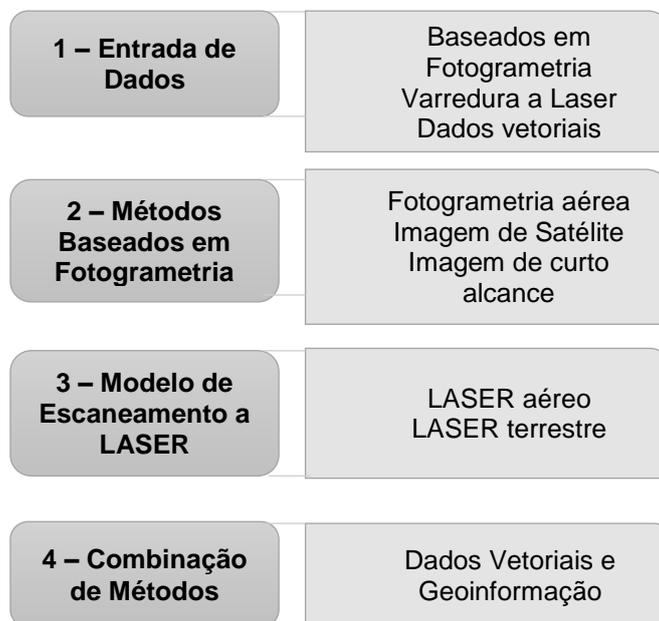
- a) *Evitar a escolha de alvos em áreas de sombras como GCPs;*
- b) *Cuidado ao selecionar feições comuns e repetitivas na região;*
- c) *Identificar as feições da imagem que servirão como ponto de controle antes de coletar as coordenadas no campo, usando um GNSS ou levantamento de solo;*
- d) *Coletar os pontos em variadas elevações (diferentes altitudes) e com ampla distribuição na área do projeto.*

## **2.8 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL EM SIG**

Um modelo de cidade 3D é uma representação de um ambiente urbano com uma geometria tridimensional de objetos urbanos comuns e estruturas, com edifícios como a característica mais proeminente (BILJECKI, 2017). Com o avanço da tecnologia computacional, especialmente a relacionada com SIG 3D, que inclui elaboração de softwares, plug-ins e extensões voltadas a análise tridimensional, os modelos de cidades 3D tomaram outra dimensão, tornando-se valiosos para diversos domínios, Biljecki (2017) destaca, inclusive, potencialidades individuais para casas e planejamento ambiental para ocupação urbana, tal como de visibilidade e estimativa de potencial solar, cadastro 3D, planejamento de infraestrutura e balanço de sombra sobre uma residência. Apesar das aplicações e possibilidades, a modelagem tridimensional, principalmente em âmbito nacional, ainda carece de inventário e aplicação abrangente para áreas urbanas, tendo maior enfoque com relação ao relevo e estruturas naturais.

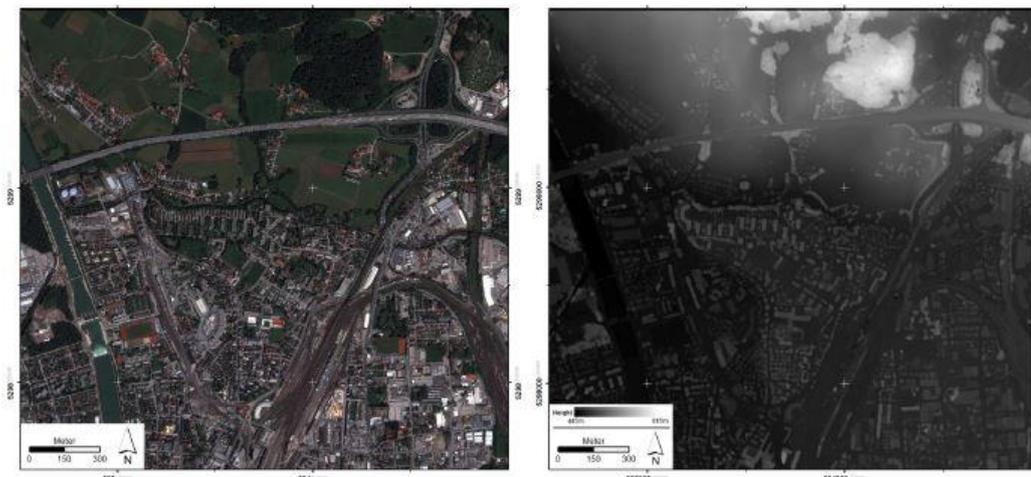
Cada método de geração requer dados específicos, como a elevação do terreno e modelagens complexas que podem variar desde linguagem de programação em algoritmos exclusivos, até conhecimentos de modelagem tridimensional em programas CAD, implicando em dificuldades por parte dos poucos especialistas, que também esbarram em limitantes como valores de equipamentos para levantamentos *in situ*,

ausência de bases tridimensionais gratuitas, elevado preço para obtenção de imagens orbitais com visada estéreo, baixa pesquisa na área são alguns dos problemas encontrados. Segundo Singh et. al, (2013), diferentes técnicas são categorizadas de acordo com os equipamentos utilizados e os seus fins. Os diferentes tipos de inserção de dados e os métodos aplicados são apresentados no Quadro 1.



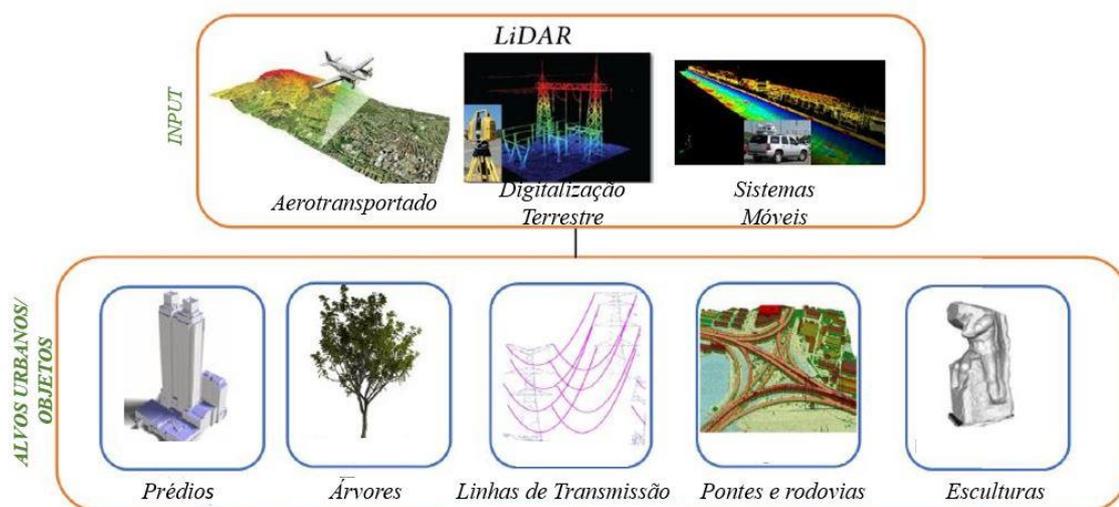
**Quadro 1-** Categorias e métodos de geração tridimensional (Fonte: Singh, 2013)

A escolha do objetivo do estudo interfere diretamente na escolha do método. Quanto a entrada de dados, métodos *baseados* em fotogrametria destinam-se a caracterização de alvos por visualização oblíqua ou vertical e podem ser destinados a escalas geográficas pequenas, no caso da tomada de imagens por VANT ou escalas geográficas maiores, com a tomada de imagens por aviões (Figura 18). Contudo, estes equipamentos nem sempre estão disponíveis por conta de custos operacionais, podendo ser substituídas por imagens orbitais de altíssima resolução espacial, que permite o mesmo tipo de visualização, quando há estereoscopia disponível. Os métodos baseados em fotogrametria objetivam a distinção de alvos gerais no terreno, o que significa extrair feições antrópicas e vegetação numa mesma representação, se este não for o objetivo da pesquisa, então pode-se optar pelo uso de varredura a Laser, como o LIDAR.



**Figura 18** – Exemplo de extração de MDE em modelo baseado em fotogrametria (Fonte: Adaptado de Luethje, 2017)

Nesse sentido a reconstrução urbana por LIDAR permite a extração de feições em visão frontal e são capazes de representar prédios, árvores, pontes, rodovias, linhas de transmissão e até esculturas (WANG et. al, 2017). A Figura 19 ilustra os métodos de levantamento por LIDAR, e apresenta alvos urbanos, naturais e objetos que podem ser extraídos por este tipo de levantamento.

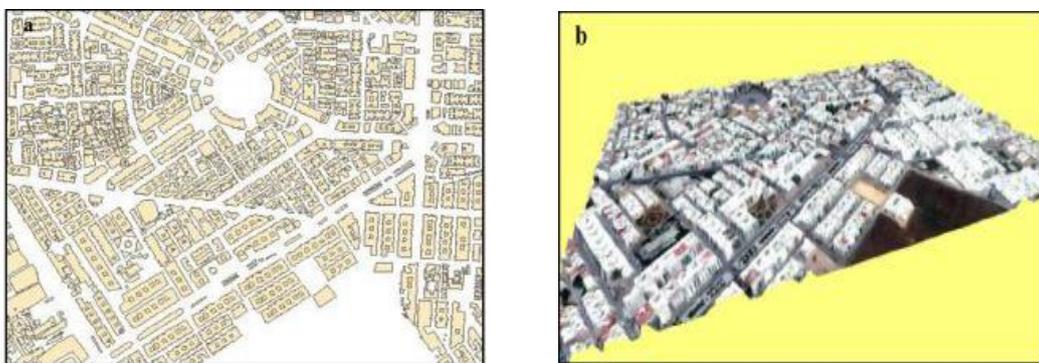


**Figura 19** – Equipamentos, alvos urbanos e objetos baseados em LIDAR (Fonte: adaptado de Wang et. al, 2017)

Quando comparado ao método baseado em fotogrametria, o LIDAR consegue extrair feições mais próximas da realidade com menor poder de processamento, são capazes de superar a dificuldade do modelo orbital e aéreo de reconstrução de texturas, por exemplo, não tendo carga de edição tão relevante (ou simplesmente não tem nenhuma) quando equiparadas ao modelo anterior. Contudo, o uso do LIDAR ainda pode ser bastante complexo para alguns especialistas e o elevado custo do equipamento,

principalmente quando equipado em aviões, restringe seu uso e favorece aos outros métodos de extração, como por dados vetoriais e geoinformação.

A reconstrução tridimensional por dados vetoriais, em que as formas podem ser atribuídas a um certo componente, como os edifícios que podem ser representados como polígonos, as estradas como linhas, as árvores que podem ser tanto polígonos quanto pontos, como visto em El Garouani, *et al.* 2014, na recriação de um ambiente virtual de cidades (Figura 20). Contudo, tal método é mais direcionado para projetos de arquitetura e CAD. Há uma relativa diversidade no que diz respeito as possibilidades de geração de modelos tridimensionais, também vale citar os métodos híbridos que abordam fotogrametria área e imagens de curto alcance, como fotos e vídeos por exemplo.



**Figura 20** – Extração por dados vetoriais. Legenda: a). Dados vetoriais de construções, b) Extrusão dos dados sobre um MDE (Fonte: Adaptado de EL Garouani, 2014)

### 2.8.1 Extração por Estereopares Através de Modelo Matemático *RPC*

Uma variedade de abordagens tem sido sugeridas para a construção de modelos tridimensionais a partir de imagens aéreas, como a extração por estereopares e geração automática. Como o processamento 3D manual de imagens aéreas é demorado, o desenvolvimento de técnicas automáticas ou, pelo menos, semi-automáticas torna-se uma necessidade (EL GAROUANI *et. al*, 2014). Diversos algoritmos foram desenvolvidos para a geração de MDE a partir de imagens orbitais e fotografias aéreas (BUYUKSALIH & JACOBSEN, 2007). Um dos métodos disponíveis é a partir do uso de um par de imagens para a reconstrução de um modelo estéreo tridimensional, no qual a informação altimétrica pode ser extraída (TOUTIN, 1995).

O MDE gerado é uma camada matricial, que representa elevações do solo e objetos construídos ou contidos sobre ele, como edifícios e árvores, em que as alturas são representadas por meio de valores de pixel nas imagens (LUETHJE & EISANK, 2017). Em áreas urbanas, um dos principais requisitos para extração do MDE é a escala espacial da imagem orbital utilizada. Para a extração de alvos com maior detalhamento é

recomendado o uso de pares estéreo de alta a altíssima resolução espacial (PCI GEOMATICS, 2018). Para que a extração do MDE seja bem-sucedida deve-se, então, utilizar modelos específicos de correção, inserindo os parâmetros de calibração das imagens, caso sejam disponibilizadas.

Chamados de modelos de geometria de imagem (*Image Geometry Model – IGM*), são específicos de cada sensor, e fornecidos pelas empresas que comercializam suas imagens, estes dados contém os parâmetros computacionais das câmeras que capturam as imagens e são utilizados em meio computacional para decodificá-los e realizar a correção rigorosa das imagens (CORREIA, 2008).

Destaca-se, dentre dos IGM, o modelo de câmera de coeficientes de polinômios racionais (*Rational Polynomial Coefficient – RPC*), como citado por Correia (2008) estes coeficientes compreendem a divisão de dois polinômios de terceiro grau em 3D que associa latitude, longitude e altitude elipsoidal às coordenadas de *pixel* e de linha das imagens, por meio dos valores dos coeficientes dos polinômios, variáveis ao longo da trajetória do satélite e incluídos nos respectivos arquivos de metadados (DIAL e GRODECKI, 2005).

Cabe ressaltar a existência de diversos modelos matemáticos disponíveis, como citado por Carvalho (2011), na literatura são conhecidos como Modelo Funcional Racional (*RFM: Rational Function Model*), Coeficiente Polinomial Racional (*RPC: Rational Polynomial Coefficient*) e Coeficiente Funcional Racional (*RFC: Rational Function Coefficient*) (DOWMAN, 2002). Contudo, nos softwares específicos utilizados para a geração de Modelos Digitais, os RPC são os mais comuns.

Com os modelos matemáticos disponíveis que podem contar, ou não, com o uso de GCP, variando o erro altimétrico e planimétrico, os softwares utilizam os RPC (no caso mais do, as posições, x, y e z (PCI GEOMATICS, 2018).

Como mencionado na seção 2.4 (Estereoscopia), os satélites ópticos podem gerar imagens estéreo, numa mesma órbita em uma pequena diferença de tempo, este intervalo reduzido é o ideal para a geração de modelos digitais de elevação por capturar duas cenas de um mesmo lugar nas mesmas condições de iluminação, por exemplo. A correspondência automática de imagem comum) juntamente com a correlação das imagens para extração dos pixels correspondentes nas duas visadas e depois, utilizando a geometria resultante do modelo matemático computacional é simplificada por imagens epipolares, reduzindo a busca por pontos correspondentes às linhas epipolares de imagens em perspectiva, sendo assim, a interseção definida por um ponto comum entre ambas as

imagens (JACOBSEN, 2011). Imagens epipolares são pares estereoscópicos projetados para que as imagens definidas em esquerda e direita, tenham a mesma orientação, ao longo de um eixo x comum (PCI GEOMATICS, 2018). A extração do MDE, por par estéreo, em meio computacional pode ser resumida da seguinte forma:

- a) *Definição do modelo matemático;*
- b) *Inserção de Pontos de Controle e Tie Points;*
- c) *Geração de geometria epipolar;*
- d) *Extração do modelo.*

Após a extração do modelo, dependendo da aplicação, outras etapas podem ser seguidas, como a interpolação dos valores em caso de erros, edição de feições para adequação ao nível de detalhamento desejado e suavização de feições, por exemplo. Por fim, o modelo gerado é tal como o exemplificado pela Figura 21.



**Figura 21** – Cidade tridimensional por Modelos Digitais. Imagem Worldview-2 a esquerda e o Modelo Digital de Elevação da mesma área (Fonte: El Garouani et.al 2014)

### III - MATERIAIS E MÉTODOS

A estratégia de elaboração de um modelo digital de elevação, voltado para a caracterização de alvos urbanos a partir de imagem com altíssima resolução espacial, envolve diversas fases e testes, descritos nas etapas seguintes, em função da pouca literatura em âmbito nacional que defina uma metodologia unificadora. Desde o uso de GCP levantados em campo até modelagem em gabinete, o estudo envolveu etapas de elaboração de caderno para trabalho de campo, levantamento *in situ* e testes de filtros para se chegar a caracterização final das feições desejadas.

Em face à importância do estudo, cabe destacar o uso do Software *PCI Geomatics 2018*, disponibilizado pelo Laboratório Espaço de Sensoriamento Remoto e Estudos Ambientais, com o aplicativo *OrthoEngine* para a geração dos modelos, coleta de GCP e pontos de ligação (*Tie Points ou TP*). Destaca-se também, o uso do aplicativo Focus, pertencente ao PCI 2018, para visualização das feições dos MDE gerados, além da confecção de mapas e visualização tridimensional no software *ArcMap e ArcScene*. A metodologia aplicada é demonstrada pelo fluxograma ilustrado na Figura 22.

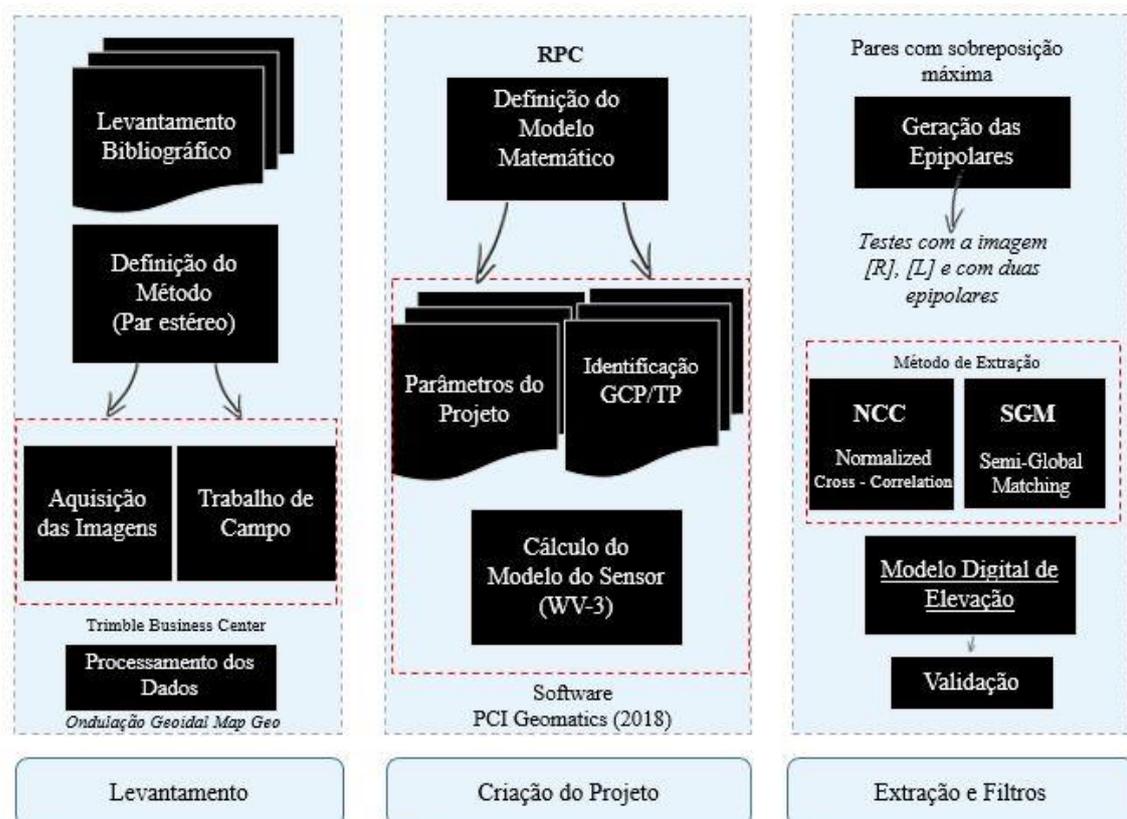


Figura 22 – Fluxograma de Trabalho

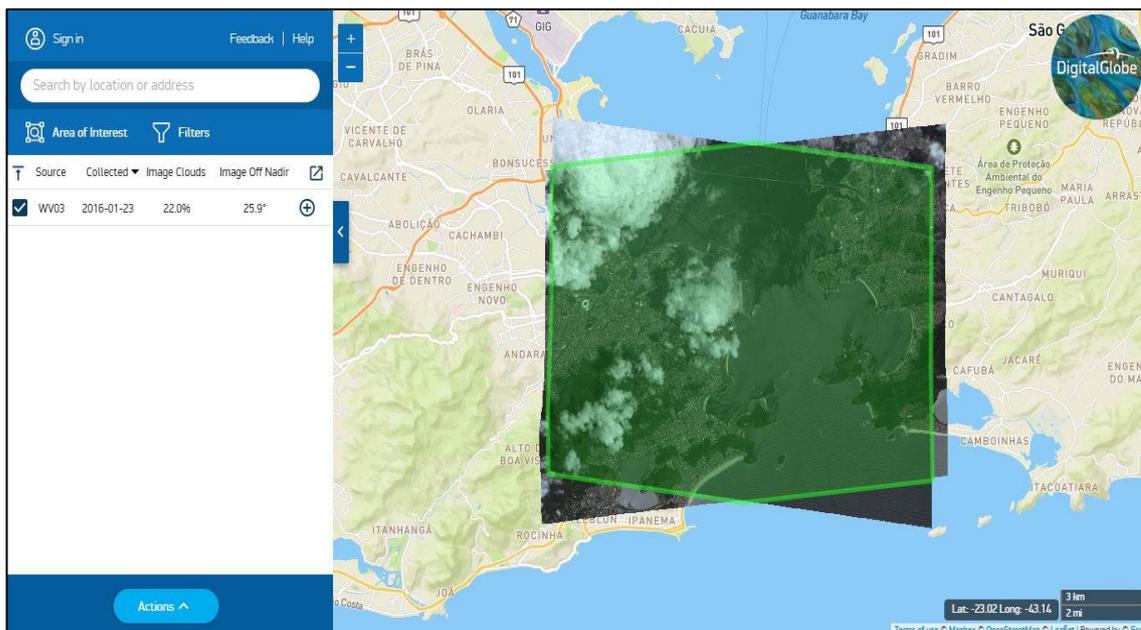
### 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

A etapa metodológica de levantamento de dados envolveu inicialmente a fase de levantamento bibliográfico buscando compreender as diferentes técnicas, insumos, softwares e processamentos necessários para a geração de modelos digitais de elevação aplicados às áreas urbanas. A escolha da técnica se pautou ao considerar os benefícios do modelo escolhido, tal como a facilidade de acesso e as limitações de outros tipos de levantamento, como os custos para levantamentos aéreos tradicionais que poderiam ser substituídos por VANT, mas que esbarram na impossibilidade, por legislação, do sobrevoos deste tipo de veículo em áreas urbanas. Imagens orbitais de altíssima resolução espacial, tal como o Worldview-3, também possuem custos elevados, contudo, foi a técnica escolhida - *geração por imagem de altíssima resolução espacial com o uso de pares estéreo* - uma vez que a cena fora gentilmente cedida pela empresa DigitalGlobe® como forma de fomento à pesquisa, principalmente por se situar em um âmbito de interesse nos cenários nacional e internacional.

A partir da identificação de potencialidades e limitações de cada técnica, como apresentado por Singh (2013), foi possível definir a metodologia e o uso do software necessário. Com isso, o software PCI Geomatics 2018 fora escolhido pela disponibilidade de licença comercial, cordialmente viabilizado pelo Laboratório Espaço de Sensoriamento Remoto e Estudos Ambientais. Tendo definido a técnica e o software, foi feita a elaboração de trabalho de campo para o levantamento de GCP, necessários para a construção e validação do modelo final. O trabalho de campo engloba a escolha por pontos facilmente perceptíveis em ambas as visadas do par estéreo em diferentes níveis de elevação, considerando terrenos mais montanhosos, planos, e também a distribuição de pontos no topo de prédios, visando detalhamento.

#### 3.1.1 Aquisição das Imagens

Em parceria com a DigitalGlobe®, foi definido o uso de par estéreo Worldview-3, com 0.31 m de resolução espacial, em localidade com diferentes níveis de ocupação urbana, baixa presença de nuvens, respeitando os critérios da empresa quanto ao fornecimento de imagens correspondente a até 100 km<sup>2</sup> com tomada estereoscópica. Pelo *sítio DigitalGlobe Discover*, que permite ao usuário a delimitação da área por meio de polígonos, *shapefiles* ou arquivos KML (*Keyhole Markup Language*), definiu-se o recorte de entrada da baía de Guanabara, contudo, pela presença de nuvens fora então solicitado um recorte nas cenas escolhidas (Figura 23).



**Figura 23** – Discover DigitalGlobe® - Definição do recorte escolhido

Na imagem total, o Centro de Niterói é destacado e sem presença de nuvens, com data de obtenção em 23 de janeiro de 2016. Foi escolhido o recorte da área de Niterói (RJ), no qual o Centro do Município é fortemente representado, tendo diversas variações altimétricas, presença de prédios, viadutos, além da Ponte Presidente Costa e Silva (Ponte Rio-Niterói). A existência destas feições colaborou para a definição do recorte apresentado na Figura 24.



**Figura 24** – Definição do recorte em Niterói (RJ)

Com o download das imagens, a fabricante também disponibiliza arquivos *shapefile* para uso em SIG, imagem multiespectral, com 8 bandas, reamostrada para 1,24 metros de resolução espacial e canal pancromático com 0.31 metros. Todas as imagens

são divididas pelo código de suas linhas (*Rows*) e colunas (*Columns*), no total são contabilizados 6 blocos de imagens (R3C2, ou, 3 linhas e 2 colunas) em um par estéreo, logo, 12 blocos da cena Worldview-3. A Tabela 4 identifica as informações fornecidas no metadados da imagem.

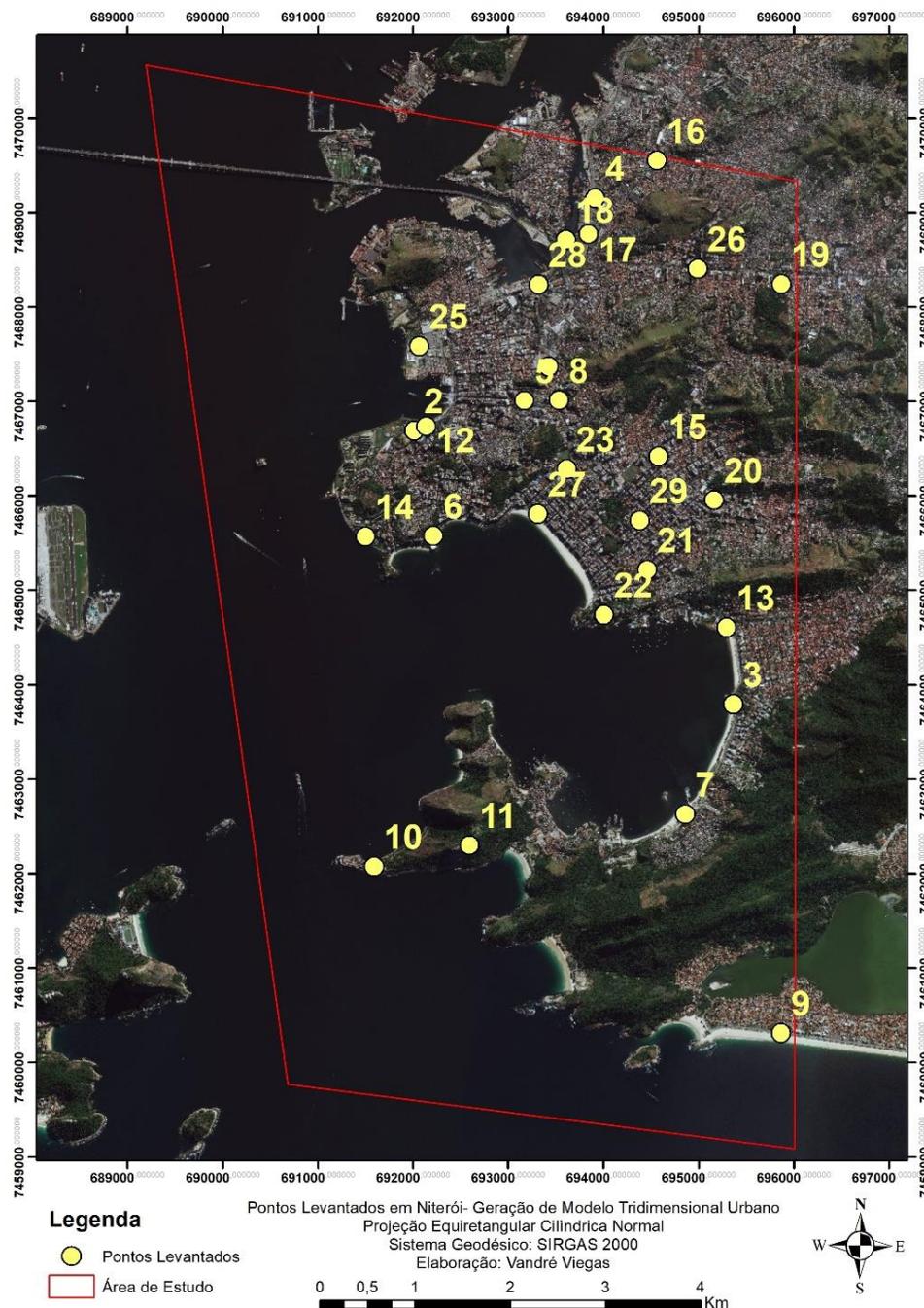
**Tabela 4** – Características do par estéreo Worldview -3

<b>Sensor</b>	Worldview-3
<b>Resolução Espacial</b>	0.31 m
<b>IDs da cena na DigitalGlobe</b>	1040010016A72100, 10400100176F5500
<b>IDs dos pares</b>	16JAN23133046-P2AS; 16JAN23133135-P2AS
<b>Data de aquisição das imagens</b>	23 de janeiro de 2016
<b>Porcentagem de nuvens</b>	15% (ID 1) e 22% (ID 2)
<b>Área de Interesse</b>	63 km <sup>2</sup>
<b>Canais Disponibilizados</b>	Multiespectral e Pancromático

### 3.1.2 Trabalho de Campo e Levantamento de Pontos

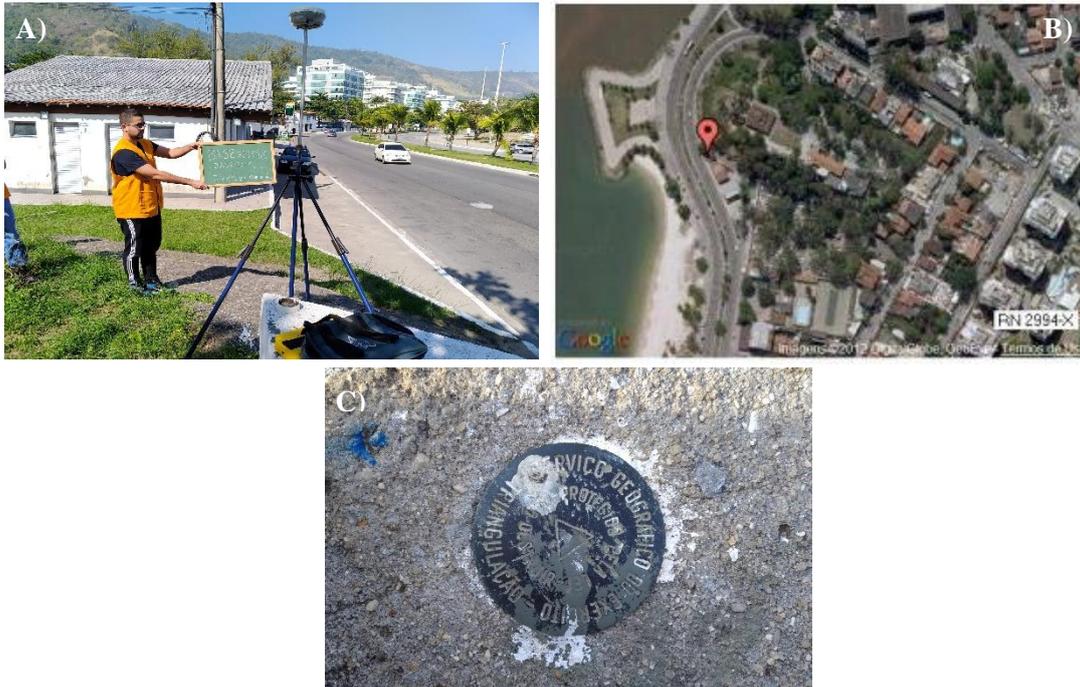
A etapa de levantamento de pontos é crucial para a definição de um modelo digital de elevação com ênfase em áreas urbanas. A escolha dos pontos foi feita a partir de feições comuns às duas visadas, em certos casos pela perspectiva ligeiramente diferente, alguns alvos localizam-se em áreas de sombras, o que dificulta sua visualização no canal pancromático da Worldview-3, uma vez que esta composição possui escala espacial menor do que quando comparada à multiespectral.

Face as feições na área de estudo, os alvos preferenciais foram aqueles em formato de “T” ou em quinas visíveis. Alguns exemplos de escolha de pontos são: ligações em quadras de tênis, estacionamentos, quinas de prédios, mirantes e Fortes como Pico e Santa Cruz, também foram escolhidos pontos na costa, que representaram as elevações mais próximas do nível do mar. Além da variedade visual, procurou-se escolher pontos bem distribuídos por toda cena, respeitando as indicações do *Manual do Usuário do PCI Geomatics (2018)*. No total foram planejados 30 pontos pela área de estudo, mas por se tratar de uma área urbana, houve a necessidade de exclusão de uma localidade devido a segurança da equipe de campo. Os pontos distribuídos são apresentados na Figura 25.



**Figura 25** – Mapa de Distribuição de Pontos de Controle em Niterói

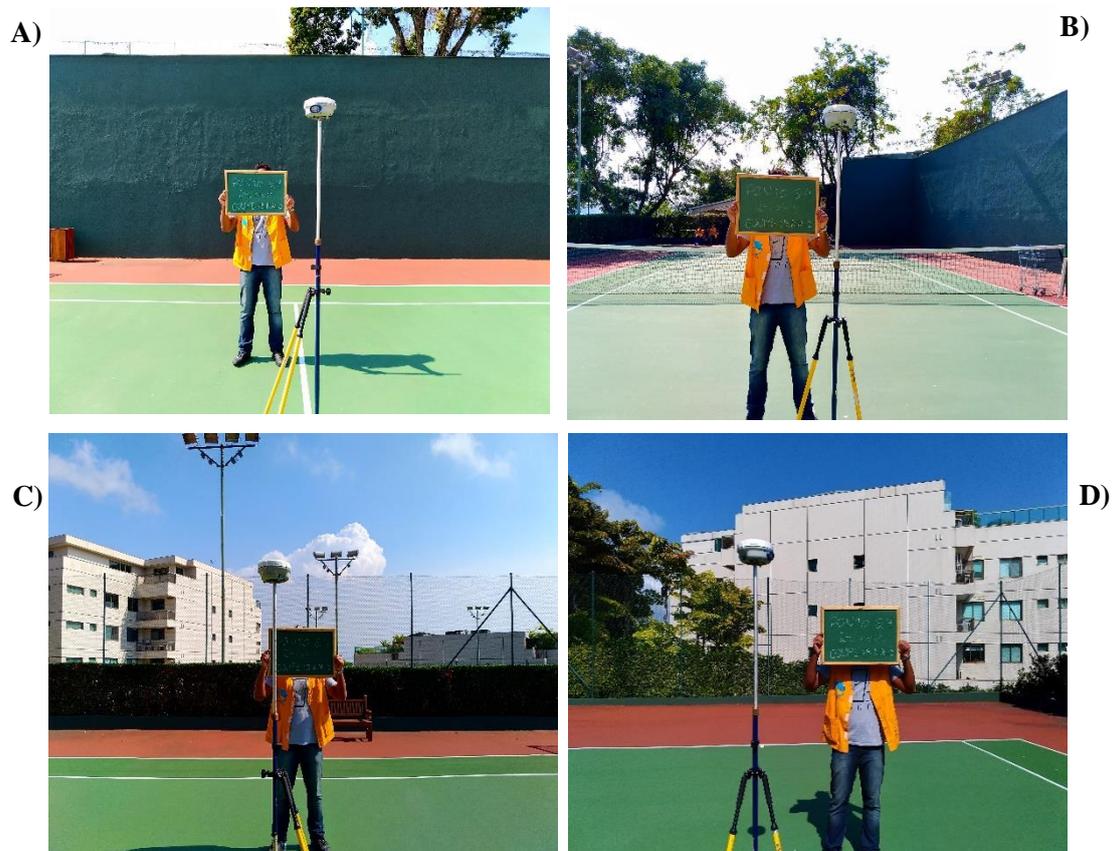
Com o auxílio do equipamento GNSS Trimble® R6, do tipo posicionamento relativo, deve-se posicionar o dispositivo Base em uma localidade com coordenadas conhecidas e percorrer os demais pontos com o chamado *Rover*. Após pesquisa na Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) do IBGE, a base fora estabelecida no início da praia de Charitas, no marco **2994X**, do tipo Referência de Nível (RN) com as coordenadas **UTM (N) 7.463.809,408 UTM (E) 695.389,655 (Anexo I)**. A Figura 26 identifica a localização da base 2994X e a chapa metálica de identificação.



**Figura 26** –Identificação da base 2994X (a- Localização da Base e equipamento GNSS Trimble R6, b – Posição da base em imagem do Google Earth c – Chapa Metálica 2994X)

Com o auxílio de caderno de campo, que contou com a posição do ponto em dois diferentes níveis de zoom: no pixel correspondente e caracterização próxima na imagem Worldview-3, e também a posição espacial para fins de locomoção, foi possível realizar o levantamento nos dias 24/07/2018, 25/07/2018, 26/07/2018 e posteriormente nos dias 01/08/2018 e 02/08/2018. Além da caracterização visual também foi elaborado espaço para croqui da área e descrição das coordenadas de cada ponto para inserção em GPS, o que facilitou o reconhecimento da feição, respectivamente no caderno de campo e no terreno.

O levantamento dos pontos contou com 29 localidades no total, porém, somente **28 pontos** foram utilizados ao final, uma vez que foram verificadas, na etapa de processamento dos dados, interferências de sinal do GNSS, o que provavelmente ocorreu por conta de chuva no momento do levantamento. Os pontos foram caracterizados através de fotos em Norte, Sul, Leste e Oeste, com o auxílio de quadro descrevendo o número, data e iniciais dos integrantes da equipe para cada ponto. Um exemplo é apresentado na Figura 27.

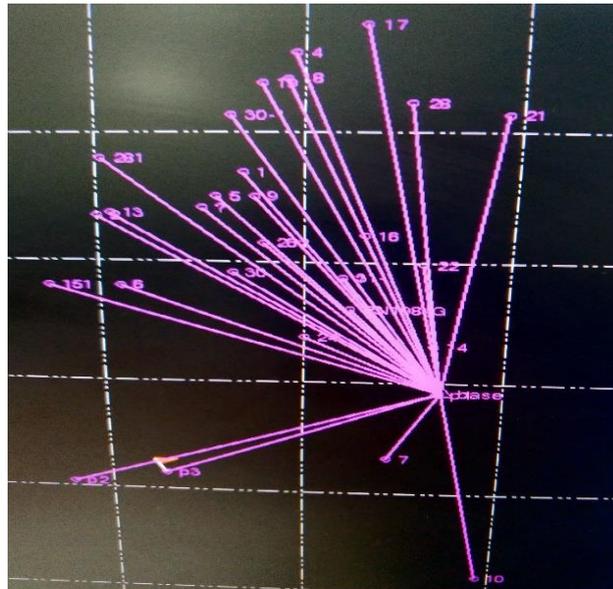


**Figura 27** – Caracterização do ponto 24 (a, b, c, d – Caracterização Norte, Sul, Leste e Oeste)

### 3.1.3 Processamento dos Dados

Após o levantamento dos pontos, em gabinete, os dados foram extraídos da Base e do *Rover*, com o auxílio da coletora do R6. No software *Trimble Business Center*, criou-se um projeto novo adicionando os arquivos do GNSS e coletora, estabelecendo o sistema geodésico WGS 84 como base das coordenadas, uma vez que este foi o sistema seguido na criação do projeto no R6.

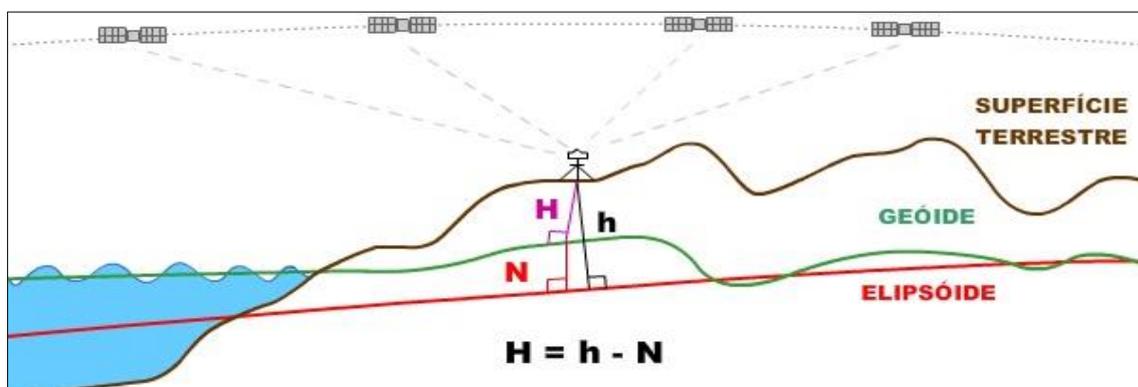
Foi necessário alterar as coordenadas da base 2994X para aqueles referentes ao Relatório de Estação Geodésica do IBGE. Estabelecendo os 29 pontos como “controle”, computou-se as coordenadas de acordo com aquelas inseridas na base, fazendo uma ligação entre os pontos de controle. O ajuste das coordenadas da base e os pontos de controle são apresentados na Figura 28.



**Figura 28** – Ajuste das coordenadas da base e pontos de controle no Trimble Business Center

Ao exportar os pontos, o Trimble Business Center gera informações de identificação (ID), coordenadas Leste e Norte, e a altitude elipsoidal. Contudo, deve-se lembrar que a latitude e longitude provêm de modo direto de uma simples transformação geométrica das coordenadas terrestres, já a altitude elipsoidal gerada nessa transformação é apenas geométrica e difere do conceito físico utilizado na prática (CORREA, 2008).

Uma vez que a medição no GNSS tem mensuração elipsoidal, e considerando o formato da Terra como o geóide – *superfície física ao longo da qual o potencial gravitacional é constante e a direção da gravidade é perpendicular, ou simplesmente, a superfície do nível médio dos mares supostamente prolongada sob os continentes* (MENEZES & FERNANDES, 2013) – é necessária a conversão de altitudes elipsoidais (Figura 29), obtidas com o GNSS R6, em altitudes ortométricas, ou seja, altitudes relacionadas à superfície equipotencial do campo de gravidade (MAPGEO, 2005).

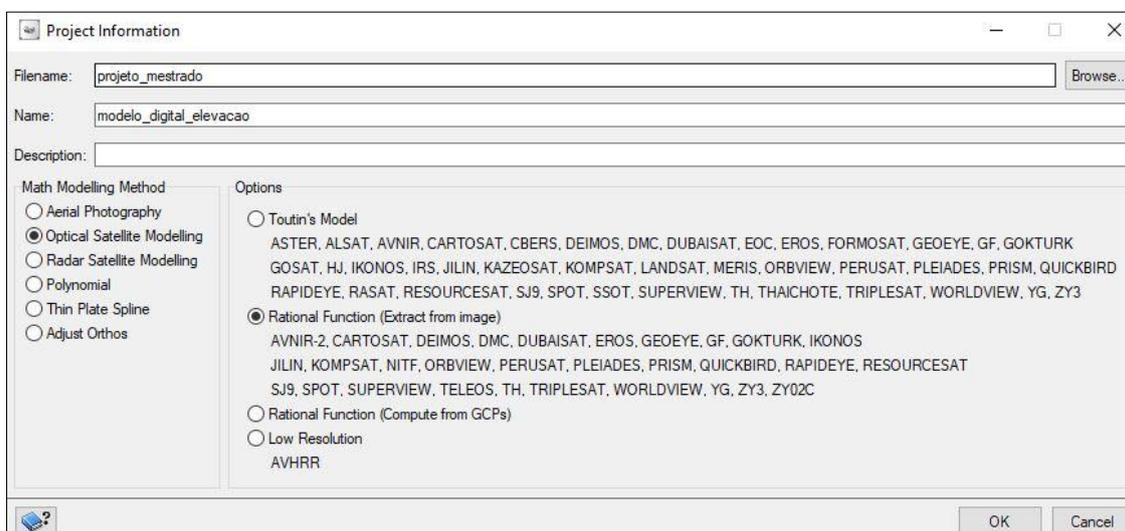


**Figura 29** – Relação entre altitude ortométrica (H) e elipsoidal (h) (Adaptado de IBGE, 2015)

Para a conversão de altitudes, foi utilizado o software MAPGeo 2015 do IBGE, programa que permite obter a ondulação geoidal (N) para um ponto ou conjunto de pontos. Com isso, as coordenadas e altitudes processados no pós-campo foram listados em uma tabela e inseridos no MAPGeo, fornecendo os valores de ondulação, que através da expressão:  $H$  (ortométrica) =  $h$  (elipsoidal) –  $N$  (geoidal), foi possível obter os valores de altitude ortométrica para todos os pontos, podendo seguir a etapa de processamento do modelo digital de elevação.

### 3.2 CRIAÇÃO DO PROJETO

Em posse das coordenadas e altitudes ortométricas de campo, a etapa seguinte consistiu na geração do modelo digital de elevação utilizando o software *PCI Geomatics* 2018. A primeira fase para criação do projeto e geração do MDE é a seleção do *modelo matemático* de operação. Segundo o *PCI Geomatics* (2018), um modelo matemático é um relacionamento matemático usado para correlacionar os pixels de uma imagem para corrigir os locais no solo e considerar as distorções conhecidas. O modelo matemático escolhido afeta diretamente o resultado do projeto. As opções de modelos matemáticos disponíveis (Figura 30) no *PCI* 2018 são: a) Fotografia Aérea b) Modelagem de Satélite Ótico c) Modelagem por Satélite de Radar d) Polinomial e) *Spline (Thin Plate Spline)* f) Ajustar Orthos



**Figura 30** – Definição do Modelo Matemático *PCI Geomatics* 2018

Compreender qual modelo se aplica ao objeto do estudo é a parte mais importante na geração de um MDE. O modelo por RPC fora escolhido, uma vez que tais informações são condicionadas ao par estéreo Worldview-3, e sua utilização é obrigatória por conter o modelo físico necessário para as correções, uma vez que o arquivo dos coeficientes contém as informações referentes a calibração das câmeras e ângulos de aquisição do par.

No PCI Geomatics, existem outras opções de modelos matemáticos que podem ser abordados (Tabela 5) de acordo com o produto disponível, e cada opção contém recomendações de acordo com informações de calibração de câmeras, o formato das imagens e a utilização de GCP e TP.

**Tabela 5** – Modelos Matemáticos para imagens orbitais e áreas (Fonte: Adaptado de PCI Geomatics, 2018)

Projeto		Fotografia Aérea	Satélite Ótico: Modelo de Toutin	<i>Rational Functions:</i> Computar dos GCP	<i>Rational Functions:</i> Extrair de um arquivo
Preparação	Imagem ( <i>Arquivos necessários</i> )	Informações de calibração da câmera	Formato <i>pix</i>	Qualquer formato suportado	Exige RPC associados
	GCP ( <i>Ground Control Points</i> )	Requer <u>Obs: (GCP/TP ou somente GCP)</u>	Exige um número mínimo	Obrigatório	Opcionais <u>Obs: (1 a 3 para melhora do modelo)</u>
	TP ( <i>Tie Points</i> )	Requer <u>Obs: (TP/ GCP ou somente TP)</u>	Opcional	Não deve haver	Obrigatório
	Modelo	Blocos de Fotos	Bloco de Imagens	Imagem Individual	Blocos de Imagens
Extração	Importar/Gerar MDE	Disponível	Disponível	Disponível	Disponível
	Suporte a imagens estéreo	Sim	Sim	Não	Sim <u>Obs: (Elevações referenciadas a alturas elipsoidais)</u>

Especificamente, a modelagem por satélite ótico é projetada para compensar distorções, como a geometria do sensor, as variações de atitude e órbita de satélite, a forma, rotação e relevo da Terra. Este modelo matemático é baseado na condição de colinearidade, que modela a transformação entre o espaço da imagem e o do solo (PCI GEOMATICS, 2018). Além disso, é relevante citar que na ausência dos RPC, o guia do usuário do PCI Geomatics indica que estes coeficientes podem ser gerados através da coleta de 20 ou mais GPC na imagem, possibilitando o cálculo do modelo diretamente dos pontos de controle ou criando um RPC próprio.

### 3.2.1 Coleta de Pontos de Controle (GCP) e *Tie Points*

Respeitando os critérios indicados pelo software e na literatura como em Toutin (2004) e Correia (2008), dos 29 pontos levantados em campo, utilizou-se 3 deles (Id: 4, 9 e 11), tendo sido escolhidos pelas extremidades das imagens e em diferentes elevações. Outros testes foram feitos com diferentes pontos e sem nenhum. A coleta de pontos no PCI se dá a partir da importação de um arquivo texto contendo informações de identificação (ID) e coordenadas (X, Y, Z). Cabe ressaltar que estas informações precisam estar adequadamente espaçadas para que o programa consiga interpretá-las.

Após a inserção dos dados, os pontos levantados em campo são localizados em suas correspondências no par estéreo. Com isso, pode-se exportar novamente os GPC de forma a gravar as informações de linha e coluna que tal ponto fora localizado na imagem e, com isso, o arquivo poderá ser replicado em outros projetos sem a necessidade de realocar o ponto a cada vez que o modelo for processado. Os pontos escolhidos e um exemplo de sua localização nas imagens é apresentado na Figura 31.

Point ID	Residual	Res X	Res Y	Type	Image X
11	0.65	-0.65	-0.09	GCP	782
4	0.29	0.03	-0.28	GCP	1025
9	0.80	0.76	-0.25	GCP	1473

**Figura 31** – Coleta de GCP no PCI Geomatics

Já a coleta dos pontos de ligação, chamados de *Tie Points*, o processo não envolve a inserção de dados externos. *Utilizados em modelos rigorosos, como modelos de fotografia aérea, modelagem por satélite óptico e modelos de radar de modelagem por satélite*, os TP identificam como as imagens em seu projeto se relacionam umas com as

outras (PCI GEOMATICS, 2018). Na etapa de coleta dos TP, o usuário deve associar pontos em comum a ambas as imagens visando o melhor ajuste entre elas e, nesse caso, definiu-se um total de 100 pontos de ligação entre ambas as imagens. O número de *Tie Points* escolhido difere bastante do número de GCP, uma vez que os últimos são opcionais, já que os RPC foram disponibilizados com o par Worldview-3. Com o número de pontos de ligação relativamente alto o usuário tem a possibilidade de alterar a precisão do modelo e escolher dentre os mais precisos, o que pode ser verificado de acordo com os erros residuais apresentados pelo programa.

Após a coleta dos *Tie Points* o usuário pode seguir o mesmo processo realizado com os GCP e exportá-los em arquivo de texto com informações de identificação para cada ponto (ID), linha, coluna de localização na imagem e coordenadas X, Y e Z. Esta etapa é particularmente importante, por ser útil em projetos com muitas imagens, e por não ser prático coletar 100 pontos a cada processamento em um computador ou projeto diferente, o que permite testes de parâmetros em diversas máquinas, por exemplo.

### 3.3 EXTRAÇÃO E FILTROS

Após a coleta de GCP e TP, as etapas seguintes para a geração do modelo envolvem mais de uma variável, exigindo entendimento conceitual geométrico e dos filtros disponibilizados pelo software escolhido. A etapa imediatamente anterior a geração do MDE refere-se à construção da geometria epipolar. Ao considerar as duas visadas capturadas da mesma cena, cada uma com seu respectivo centro de projeção sendo não coincidentes, cada par capturado representa duas perspectivas diferentes de uma mesma cena estática (SANTOS, 2012). Para permitir a extração da elevação, o par estéreo deve passar pelo processo de localização de pontos correspondentes em ambas as imagens. Considerando as imagens  $P_L$  (imagem da esquerda) e  $P_R$  (Imagem da direita) com relação a um ponto  $P$  observado nas duas cenas com centros ópticos  $C_L$  e  $C_R$ , a relação entre as duas imagens é dada pelo plano epipolar  $\pi$  (Figura 32).

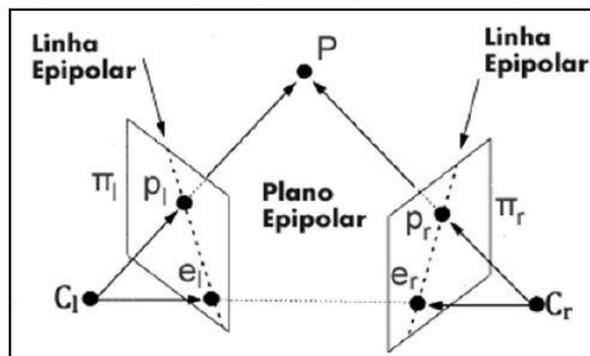
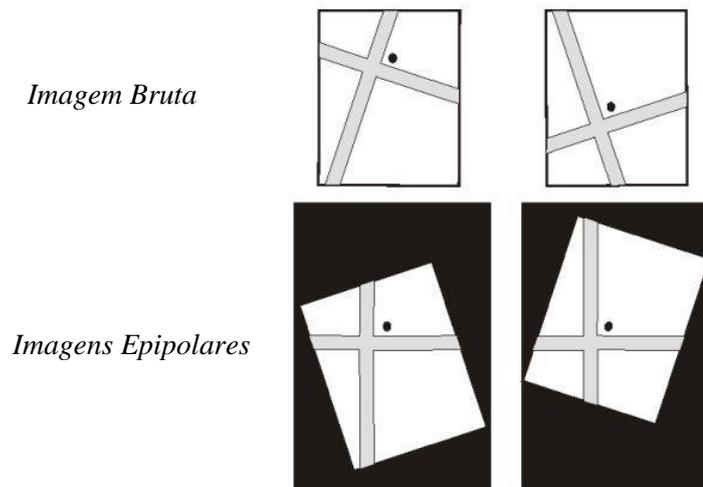


Figura 32 – Geometria Epipolar (Fonte: Adaptado de Hartley, 2004)

Resumidamente, imagens epipolares são os pares estereoscópicos projetados para que as imagens definidas como esquerda e direita ( $P_L$  e  $P_R$ ) tenham a mesma orientação, ao longo de um eixo X comum entre ambas (Figura 33).



**Figura 33** – Imagem Bruta e Imagens Epipolares (Fonte: Adaptado de PCI Geomatics, 2018)

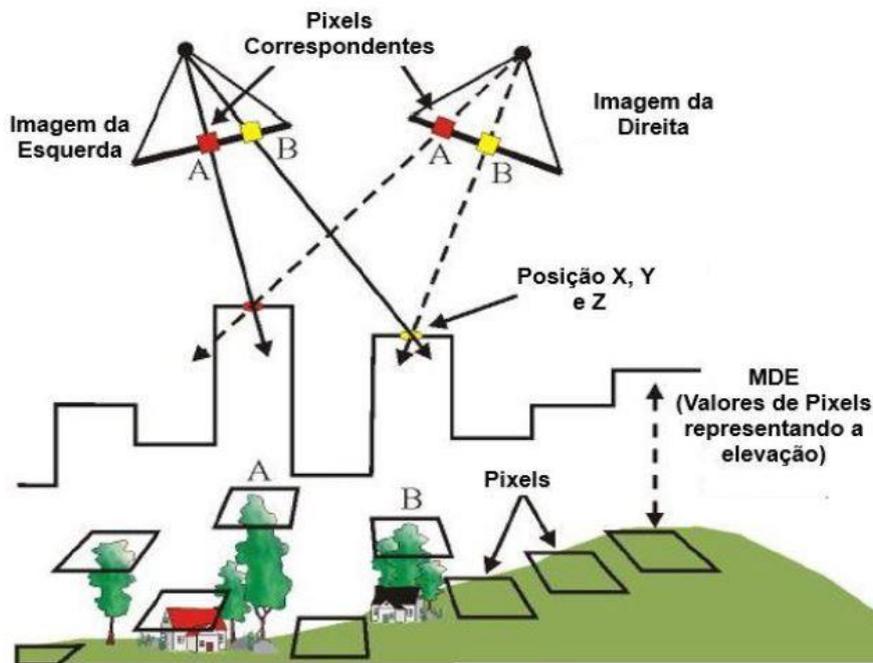
Os pares foram renomeados para facilitar a geração das Epipolares. A imagem estéreo da direita (IED) foi nomeada como 3315 e a imagem da esquerda como 33046 (IEE). Cabe salientar que o reconhecimento das geometrias pode ser consultado no metadados das imagens. Em vista da compreensão da geometria epipolar, foram geradas duas epipolares distintas: **Conjunto 1**: Imagem 33036 como *imagem da esquerda* e 33135 - *imagem da direita (primeira epipolar)* e **conjunto 2**: c) Imagem 33046 como *imagem da direita* e Imagem 33135 - *imagem da esquerda (segunda epipolar)* (Figura 34). Esta etapa foi realizada selecionando a opção “Maximum Overlapping Pairs” (Máximo de Pares Sobrepostos) para selecionar automaticamente as cenas que demonstram a maior quantidade de sobreposição. Cada imagem forma pares com as duas imagens que mais se sobrepõem, justificando a geração de todas as possibilidades de epipolares num par estéreo.

Epipolar pairs:					
Number	Select	Left File	Right File	Left Channels	Right Channels
1	<input checked="" type="checkbox"/>	16JAN23133046-P2A	16JAN23133135-P2A	1	1
2	<input checked="" type="checkbox"/>	16JAN23133135-P2A	16JAN23133046-P2A	1	1

**Figura 34** – Pares epipolares no PCI Geomatics

Tendo finalizado a etapa de geração dos pares epipolares, a etapa seguinte consiste na construção final do modelo digital de elevação. O MDE gerado é um arquivo *raster* que representa a elevação do solo e seus objetos, como feições antrópicas e árvores, tendo os valores de extração representados nos pixels da imagem. Segundo o manual do usuário

(2018) o *OrthoEngine* usa a correlação de imagens para extrair pixels correspondentes nas duas cenas e, em seguida, usa a geometria do sensor do modelo matemático computado para calcular as posições x, y e z (Figura 35).



**Figura 35** – Extração do MDE no PCI Geomatics (Fonte: Adaptado de PCI, 2018)

Há uma série de métodos de extração, filtros de suavizações e níveis de detalhe que podem ser escolhidos no PCI 2018. Quanto ao método de extração, há duas opções disponíveis: O *Normalized Cross-Correlation* (NCC) ou Correlação Cruzada Normalizada e o *Semi-Global Matching* (SGM – Correspondência Semi-Global). O NCC é um método de extração, que utiliza pontos correspondentes em uma imagem com visada da esquerda e direita, correlacionando ambas. O algoritmo calcula a disparidade para cada par de pontos e combina este valor com o modelo geométrico definido para a imagem (PCI, 2018). O NCC produz modelos digitais de elevação de média a baixa qualidade, com probabilidade de maiores erros e em qualidade visual menor, porém os resultados são mais rápidos e requerem menor poder de processamento.

O método SGM, proposto pela primeira vez pelo pesquisador Heiko Hirschmüller (2005) baseia-se na correspondência de pixels (pixel a pixel) semelhantes em informações mútuas. No PCI o algoritmo se auto ajusta para compensar pequenos erros na linha epipolar, o que produz um MDE de maior qualidade com menor possibilidade de propagação de erros e alto detalhamento, mas que exige certo nível de processamento já que o algoritmo lida numa abordagem pixel a pixel, cuja ordem de grandeza pode ser de milhões numa imagem. Em testes, de fato, foi possível perceber diferenças substanciais entre o tempo de construção do modelo entre os dois métodos. Cabe destacar que a

implementação dos algoritmos, por parte do PCI Geomatics, foi desenvolvida internamente. Como disposto pelo fabricante, o PCI é “*proprietário e detalhes completos dos algoritmos não estão disponíveis*” (PCI, 2018).

Outra opção disponível – *Smoothing Filter* (Filtro de suavização) – permite ao usuário escolher entre 5 opções: a) Sem filtros; b) *Fill Holes* (preencher buracos); c) Baixo d) Médio; e) Alto. Os filtros buscam suavizar feições, evitando objetos muito retilíneos por exemplo, o que é um problema quando se deseja representar áreas urbanas, tendo em vista a geometria de prédios, por exemplo. Com isso, nos testes gerados, 3 parâmetros foram escolhidos como teste de possibilidades – sem filtros, para compreender o nível de suavização do software, *Fill Holes* que preenche possíveis “buracos” sem elevações ou com erros no MDE. Testou-se também, a suavização mínima para que não houvesse alvíos em quinas ou em conjunto de prédios.

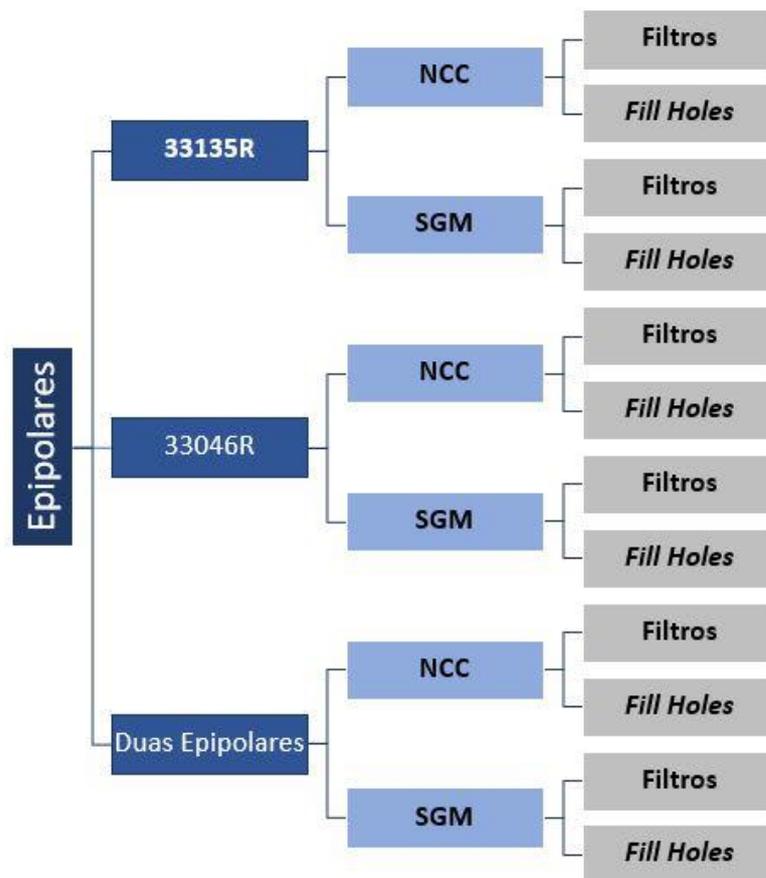
Também é possível selecionar a qualidade do MDE entre baixo, médio, alto e muito alto, assim como a resolução espacial final do modelo, podendo alterar o nível de detalhe espacial. Destaca-se a possibilidade de escolha do tipo do terreno entre a opção padrão como acidentado (*Hilly*), além de montanhoso (*Mountainous*) e plano (*Flat*). Definiu-se o tipo de terreno como acidentado pela característica da área de estudo e em recomendação do guia do usuário do PCI 2018. Destaca-se também o *Filtro Wallis*, que fora utilizado em todos os testes uma vez que, segundo o PCI Geomatics (2018), este filtro é útil com dados que contenham sombras significativas, como regiões montanhosas ou cenias urbanas.

Sendo assim, foram definidos diversos testes para se chegar a um MDE em que fosse possível destacar os alvos urbanos com maior qualidade. Entre os testes gerados foi estabelecido:

- a) Reamostrar a resolução espacial para 1 metro buscando diminuir o tempo de processamento;
- b) Selecionar o Filtro Wallis em todos os testes;
- c) Filtros de suavização selecionados como mínimo;
- d) Diferenciar o método de extração SGM e NCC;
- e) Compreender a importância do uso de até três geometrias Epipolares.

Além das opções supracitadas, também foram realizados testes sem nenhum tipo de suavização ou filtro e testes pontuais com suavização máxima. As experiências foram escolhidas de forma a compreender as principais alterações que se pode ter num MDE. Cabe ressaltar, também, teste extra sem o uso de GCP mas com *Tie Points*, tal como

recomendado na Tabela 5. A Figura 36 esclarece os testes realizados, onde o ‘R’ (Referência a *Right*) ao final do código da imagem representa a escolha de tal cena como a imagem da direita.



**Figura 36** – Testes para a geração dos Modelos Digitais de Elevação

### 3.4 VALIDAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O teste de qualidade posicional e altimétrica dos dados do modelo digital de elevação será elaborado por meio do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) a partir das coordenadas levantadas em campo. O enquadramento será realizado para compreender a qual, ou quais escalas, o MDE gerado poderá atender. Além disso, será descrito o *Relatório de Erros Residuais Médios*, arquivo gerado pelo PCI Geomatics que ajuda a determinar se a solução do modelo matemático escolhido é boa o suficiente para o projeto.

Em vista da validação dos resultados, os alvos também serão analisados pela caracterização visual do modelo de acordo com a disposição das mesmas feições no terreno. Com isso será possível determinar não só a qualidade altimétrica do MDE, como também permitirá a compreensão do nível de detalhamento alcançado, tanto quanto identificar possíveis problemáticas e carga de edição, quando necessária.

## IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em vista da metodologia e objetivos propostos, a etapa de resultados busca detalhar os produtos gerados em cada estágio da geração do MDE. Nesta seção serão descritos os resultados obtidos de forma a indicar os melhores parâmetros, as semelhanças e diferenças entre eles, dificuldades encontradas e possíveis soluções.

### 4.1 LEVANTAMENTO DE COORDENADAS

Frente a etapa de levantamento de dados, cabe destacar algumas nuances próprias trabalho de campo em grandes cidades. A escolha dos pontos, no caso de ocupações urbanas com alta densidade, é facilitada pelas diferentes coberturas no terreno, como a presença de quadras de tênis, marcações em prédios e quinas de fácil identificação em campo e gabinete, contudo, o tráfego intenso de caminhões, que causavam trepidações nos equipamentos, perigos inerentes a violência urbana, foram algumas das dificuldades encontradas. As coordenadas levantadas em campo são dispostas no [Anexo II](#), enquanto o Quadro 2 exemplifica o equipamento Base (RN 2994X) e o ponto com maior elevação extraída pelo GNSS Trimble® R6.

		<b>Base RN 2994X</b>
		Coordenadas RBMC:
		<b>UTM (N):</b> 7463809,408
		<b>UTM (E):</b> 695389,655
		<b>Elevação:</b> 4,2399 m
		<b>Ponto 11 – Forte do Pico</b>
		Coordenadas GNSS:
		<b>UTM (N):</b> 7462300,028
		<b>UTM (E):</b> 692596,3999
		<b>Elevação:</b> 206,053253 m

**Quadro 2** – Coordenadas da Base RN 2994X e Forte do Pico

### 4.2 CRIAÇÃO DO PROJETO

A etapa de criação do projeto define a qualidade final do modelo. Frente ao exposto na Tabela 5, a geração de MDE por meio de satélites óticos com o uso de RPC, pode ou não envolver o uso de GCP, que podem variar de 3 a 4 para melhorar a exatidão

altimétrica do modelo, portanto, os pontos de controle são opcionais na presença do coeficiente polinomial racional. Contudo, os *Tie Points* são presença obrigatória e sua exatidão pode interferir na qualidade final do MDE.

Através do *OrthoEngine*, o usuário pode utilizar uma ferramenta chamada “*Relatório de Erro Residual*”, uma aplicação capaz de gerar um relatório preciso com relação a operações estatísticas. Dentre elas, ao Erro Médio Quadrático (RMSE ou RQEM) expressa pela Equação 1, onde  $Y_i$  e  $\hat{Y}_i$  representam o valor observado e o estimado pelo PCI dos pontos em análise.

$$RQEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-1}}$$

**Equação 1** – Erro Médio Quadrático (Fonte: Leite et. al, 2011)

A função *bias* (Equação 2), representa a tendenciosidade das amostras, pode ser representado como a acurácia e representa o erro médio dos pontos.

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)$$

**Equação 2** – Tendenciosidade (Fonte: Leite et. al, 2011)

O desvio padrão (Equação 3), expressa o grau de dispersão das medidas com relação a sua média.  $X_i$  representa cada medida e  $\bar{x}$  a média geral dos pontos

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

**Equação 3** – Desvio Padrão

O Relatório de Erro Residual é capaz de inferir as estatísticas citadas para estimar a qualidade posicional dos *GCP*, *Tie Points*, *Pontos de Check* (utilizados para avaliação) e *GPC Estéreos*, para o caso de pontos de controle gerados automaticamente.

Quanto a avaliação dos TP, foram selecionados 100 pontos comuns no par estéreo, tendo posteriormente excluído 2 destes pontos, por conta de altos erros apresentados, ao final os modelos foram gerados com um total de 98 TP. O Relatório de Erro Residual tem como resultado os valores dispostos na Tabela 6, para as coordenadas X, Y e a elevação Z. RMS 5%, raiz do valor quadrático médio, refere-se a ao quinto pior valor encontrado na lista dos TP.

**Tabela 6** – Erros Residuais dos Tie Points

	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>Z (m)</b>
<b>RMSE (+/-)</b>	0.096	0.029	0.044
<b>BIAS (+/-)</b>	0.000	0.001	0.000
<b>Desvio Padrão (+/-)</b>	0.097	0.029	0.044
<b>RMS 5% (+/-)</b>	0.367	0.109	0.168

Com relação a precisão dos pontos de controle, 4,9 e 11 os resultados são listados na Tabela 7. Para os GCP, o software não calcula os RMS 5% pela quantidade de pontos disponíveis.

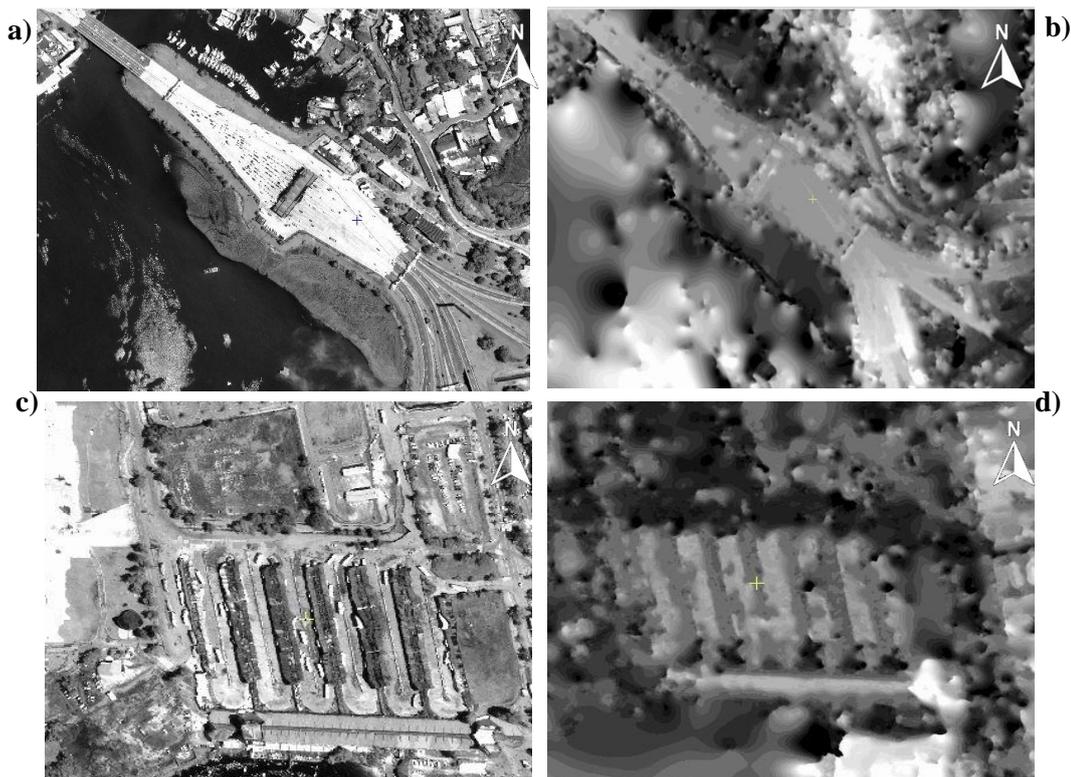
**Tabela 7** – Erros Residuais dos Pontos de Controle

	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>Z (m)</b>
<b>RMSE (+/-)</b>	0.104	0.169	0.265
<b>BIAS (+/-)</b>	0.022	0.150	0.019
<b>Desvio Padrão (+/-)</b>	0.101	0.078	0.264

### 4.3 EXTRAÇÃO E FILTROS

O Software PCI Geomatics 2018 oferece uma série de métodos de extração e filtros de suavização que podem ser utilizados para a geração de um modelo digital de elevação. A escolha entre os dois métodos de extração engloba subgrupos que também podem alterar as características visuais do modelo como sua precisão final.

Os resultados apresentados nesta seção foram realizados buscando compreender um alto número de combinações possíveis entre as opções disponíveis no software. Os testes no PCI 2018 também contaram com outras opções de seleção, não necessariamente englobando todas, uma vez que os resultados encontrados foram próximos não afetando diretamente a visualização final do modelo. Um exemplo é baseado na seleção de filtros de suavização que engloba: sem filtros, somente preencher buracos (Fill Holes), baixo, médio e alto. Por esta razão os testes foram efetuados com: a ausência de filtros, o preenchimento de buracos e filtro baixo, uma vez que suavizações médias e altas não apresentavam grande detalhamento dos alvos, como pode ser visto no Quadro 3.



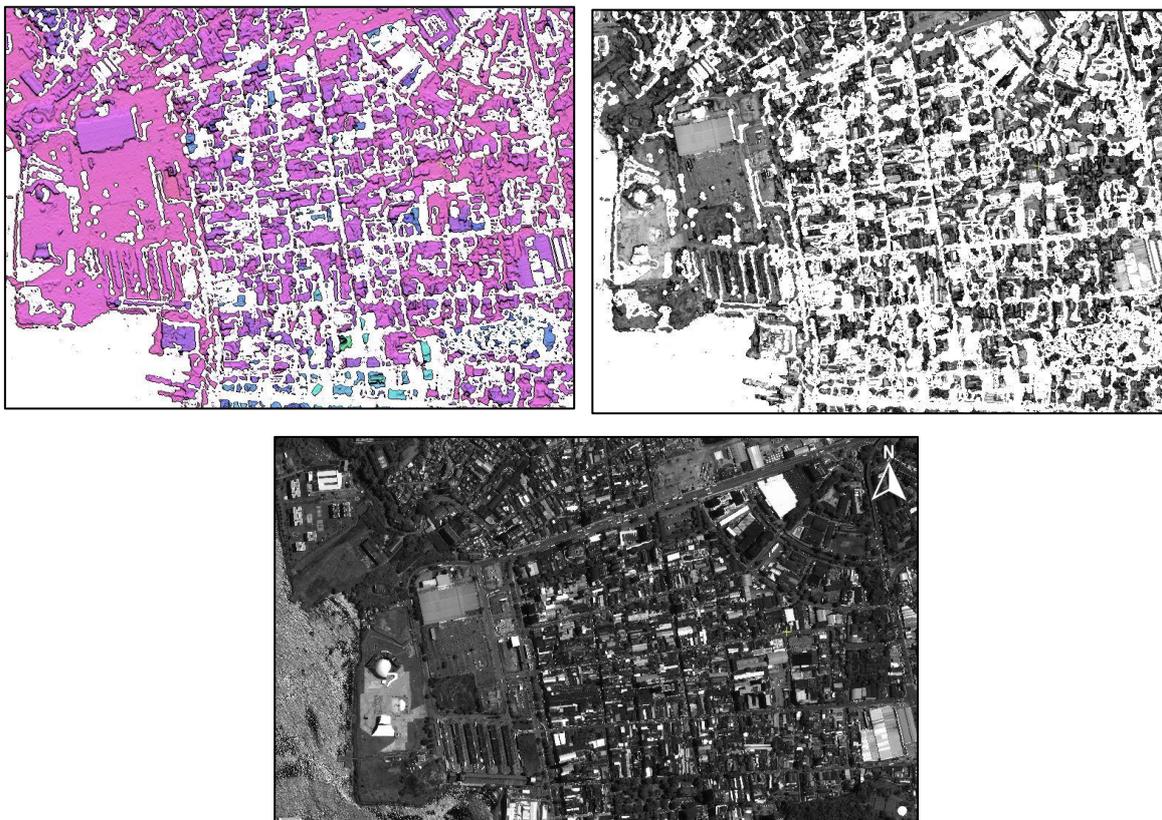
**Quadro 3** – Exemplo de estruturas com alta suavização. a) Praça do Pedágio Ponte Rio-Niterói b) MDE Praça do Pedágio c) Terminal Rodoviário de Niterói d) MDE Terminal Rodoviário

O filtro máximo de suavização, visto no Quadro 3, apresenta bons resultados com relação a pontes e viadutos, como é possível perceber na área da praça do pedágio da Ponte Costa e Silva. Estruturas retilíneas como a do terminal rodoviário de Niterói também foram bem representados, contudo, as nuances de elevação não foram bem representadas, prédios e casas não apresentaram alto grau de detalhamento.

Uma vez que modelos gerados com filtro de suavização máxima não apresentavam alto grau de detalhamento, foi realizado outro teste, dessa vez com o parâmetro imediatamente oposto, a construção de um modelo sem qualquer tipo de filtro. Este experimento foi aplicado para compreender quais os alcances de detalhe o MDE poderia atingir. Cabe destacar que o PCI Geomatics 2018 somente permite o teste sem filtros no método de extração NCC, o de menor detalhamento, não sendo possível aplicar esta técnica com o método SGM.

No modelo sem filtro consegue-se perceber lacunas sem preenchimento de dados. Isto ocorre porque o programa interpreta áreas de sombras e estabelece o valor de *background* ou *elevação de plano de fundo* nestas regiões, o valor inserido representa as áreas do MDE para as quais não há dados fornecidos e que podem ser alterados pelo usuário no momento de geração do modelo. A diferença de detalhamento ocorre mais

intensamente em áreas com grandes edificações e, portanto, mais sombras. Como resultado é possível perceber um modelo com mais ruídos (Quadro 4).



**Quadro 4** – Modelo Digital de Elevação Sem Filtros – Recorte do bairro Centro

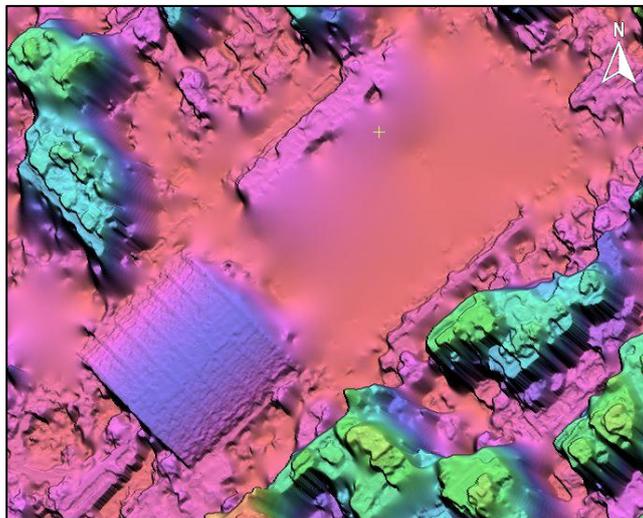
Tendo compreendido os cenários extremos (filtro máximo e sem filtros), os experimentos partiram então para a questão dos métodos de extração: SGM e NCC. Considerando que cada método utilizou variações, como o uso de filtros, e quantidade de epipolares, no total foram realizados 6 testes para o método SGM e NCC, totalizando 12 experimentos. Somando com dois testes sem GCP, com filtro máximo e sem nenhum tipo de suavização, no total 16 MDE foram gerados na presente pesquisa. Cabe destacar que serão apresentados somente os resultados mais relevantes de cada categoria e suas variações, esclarecendo as nuances que, porventura, detalharam mais ou menos os MDE.

#### 4.3.1 *Normalized Cross-Correlation (NCC)*

Em vista dos testes anteriores o método NCC, considerado o de menor detalhamento, era a técnica exclusiva presente no PCI Geomatics até sua versão 2016. Por essa razão, além dos experimentos de detalhamento, o NCC fora testado para avaliar qual versão do software poderia atender a modelos digitais de elevação dedicados a extração de feições urbanas.

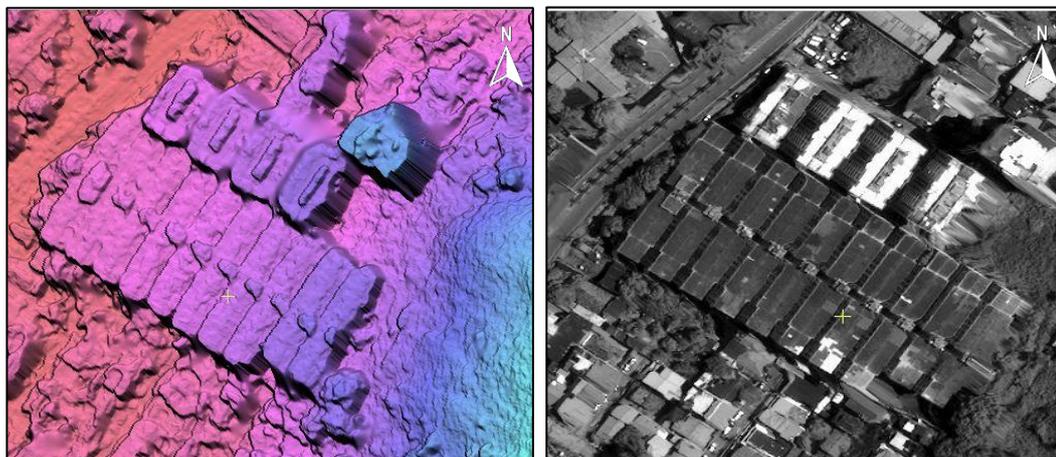
Foram testadas variações de epipolares e filtros, contudo, não houve mudanças significativas nas feições de acordo com as alterações de suavização nem com relação a

quantidade e especificidade de imagem da posição esquerda e direita. A Figura 37 ilustra um exemplo de suavização mínima com a técnica NCC e sua interferência nos alvos. Todos os testes desta seção foram feitos com a seleção de 3 GCP na área de estudo.



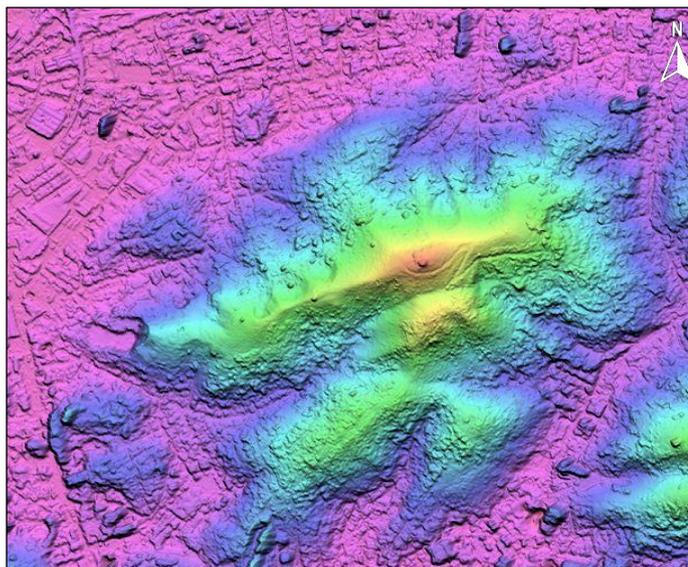
**Figura 37** – MDE Método NCC com Suavização Mínima. Estádio Caio Martins

É possível perceber que filtros, mesmo no mínimo, suavizam intensamente os objetos no solo. Por mais que alguns traçados apareçam retilinearmente, a suavização tende a gerar uma superfície em que a elevação é constante em todos os pontos. Considerando que esta visualização não atendia aos objetivos principais da pesquisa, também foi considerando somente a opção *Fill Holes*. Gerando o resultado apresentado pela Figura 38.



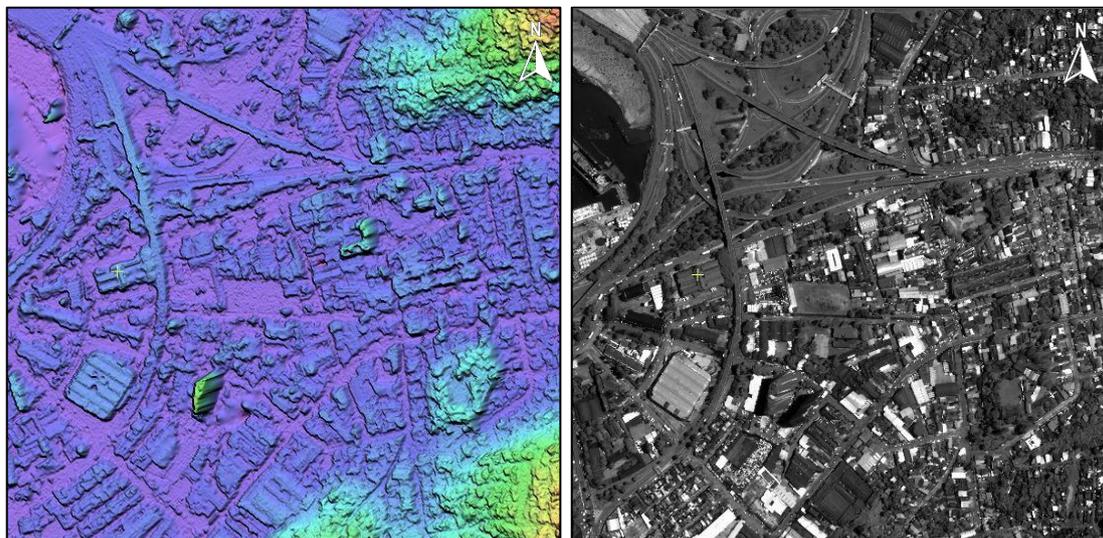
**Figura 38** – Comparação método NCC *Fill Holes* e a imagem Pancromática associada

A alternância para o método *Fill Holes* se mostrou pertinente e apresentou acréscimo de qualidade. Contudo, o método NCC ainda apresentara feições não exatamente lineares, tendo aspecto “derretido” especialmente nas bordas de prédios, e em vegetação. Ainda que não possua o detalhamento previsto, o método se mostrou bastante adequado para o relevo natural e em escalas geográficas maiores (Figura 39).



**Figura 39** – Exemplo de Relevo com o Método NCC

O mesmo padrão de definição de relevo foi apresentado para toda a área. A técnica NCC com filtros apresentou melhores resultados que em comparação ao modelo sem nenhum tipo de suavização, não havendo alterações excessivas por parte do software e sem interferências significativas de sombras que foram totalmente preenchidas neste modelo. Exemplo de área com diferentes intensidades de níveis digitais (ND) e sombreamento, é apresentada na Figura 40.



**Figura 40** – Áreas sombreadas e o método NCC na saída Ponte Rio Niterói

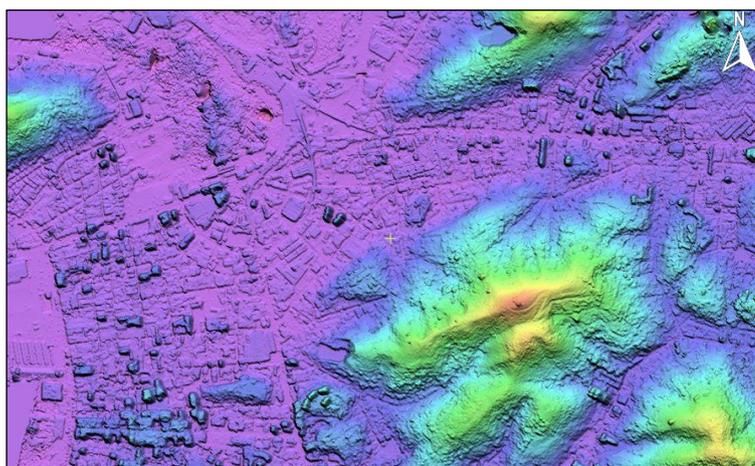
A diferenciação de áreas com radiometrias díspares pela técnica NCC, é explicada pela forma com a qual o método lida com diferenças radiométricas como vieses (bias) e mudanças de ganho, o método de correlação cruzada normalizada assume o ruído gaussiano nos valores dos pixels correspondentes (HIRSCHMULLER et al, 2005). Contudo, foi possível perceber a necessidade de uma certa carga de edição, principalmente quando há a presença de muitos prédios aglomerados, por exemplo.

#### 4.3.2 Semi-Global Matching (SGM)

O método SGM, diferentemente do NCC, não possibilita ao usuário a geração de MDE sem suavizações e a aplicação do filtro de sombras (Wallis) que é automaticamente inserido no modelo final. Há também a possibilidade de ativar a opção “*epipolar tracking*” que segundo o manual do usuário é uma ferramenta que procura por erros nas linhas das epipolares no momento da extração, melhorando a qualidade final do modelo (PCI, 2018).

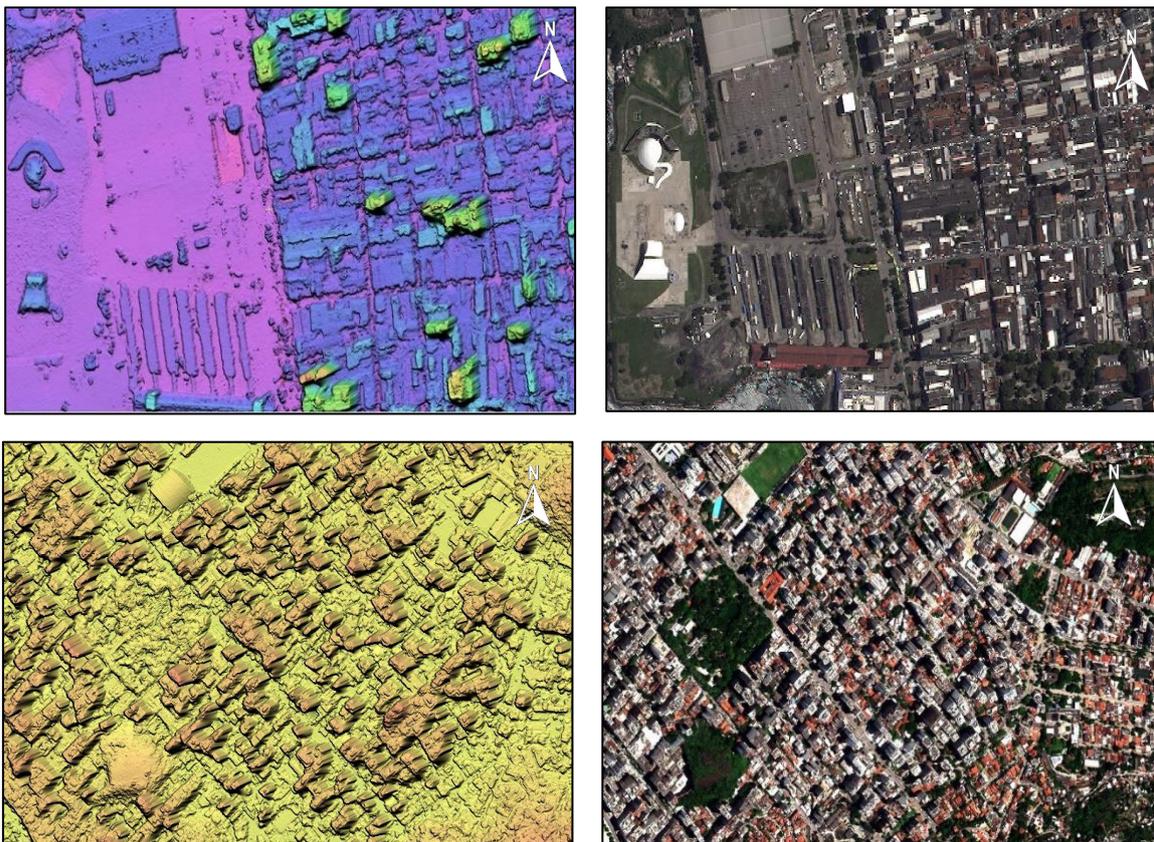
Notavelmente, o método SGM tende a ser mais demorado e exige maior poder de processamento da máquina. É importante que este seja um processo dedicado exclusivamente a geração do modelo, sem nenhum outro software operando, o que pode acarretar em erros durante o processamento.

Assim como o método NCC, o SGM não produziu mudanças significativas com relação a alternância de epipolares, porém, os resultados de fato se mostraram mais detalhados que o modelo anterior, como pode ser observado na Figura 41.



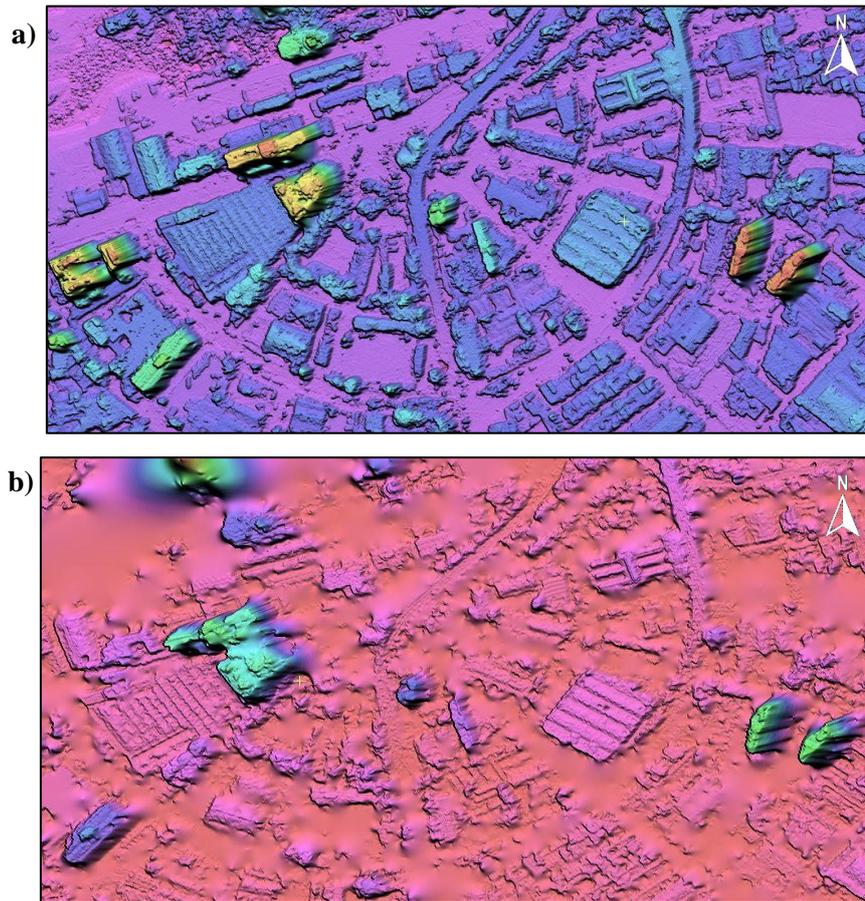
**Figura 41** – MDE método SGM (Fill Holes)

No caso da técnica SGM, o modelo foi capaz de detalhar mais precisamente prédios, rodovias e pontes, contudo, o relevo não apresentou mudanças de qualidade significativas que em comparação com o método NCC. Um exemplo de detalhamento é apresentado no Quadro 5. No Anexo 4, são apresentados mapas com o recorte do MDE para dois bairros de Niterói – Centro e Icaraí.



**Quadro 5** – Exemplos de detalhamento do MDE pelo método SGM [na esquerda dois recortes do MDE – Centro (caminho Niemeyer) e Icarai – Na direita a imagem Worldview]

Comparando o método SGM com o NCC, de fato, há maior detalhamento no primeiro método. Além das particularidades dos alvos, ao se comparar opções semelhantes, o *Semi-Global Matching* apresentou suavizações menores do que o *Normalized Cross Correlation*. Este fato fora percebido ao se comparar a mesma área, com mesma quantidade de epipolares (duas), mesmos níveis de suavização (*Fill Holes*) e quantidade de GCP. Cabe ressaltar que não houve nenhum tipo de alteração na escolha dos pontos de Controle e dos *Tie Points*, uma vez que o projeto de testes fora o mesmo para todos os modelos. O resultado da comparação é ilustrado na Figura 42.

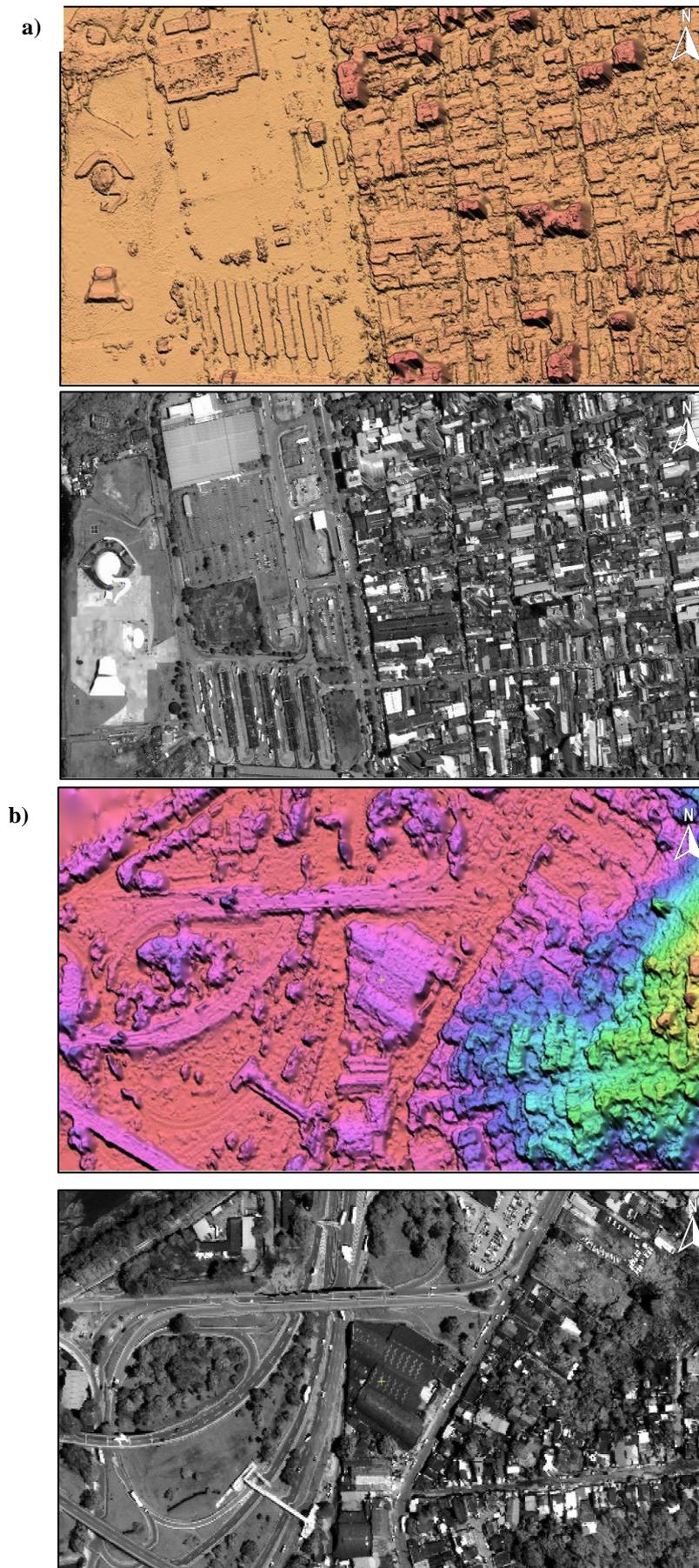


**Figura 42** – Diferenças entre o método SGM e NCC [a) – Método SGM b) - Método NCC]

É bastante perceptível as diferenças entre o método SGM e NCC. As feições extraídas pela primeira técnica se mostram mais fiéis e detalhadas no solo, o que não acontece com a segunda, tendo certo exagero. Objetos com maior rugosidade são mais suavizados que outros, o que não acontece com o SGM, capaz de representar minuciosamente pontes, prédios, casas e pequenas variações altimétricas.

#### 4.3.3 Modelo Digital de Elevação sem *Pontos de Controle*

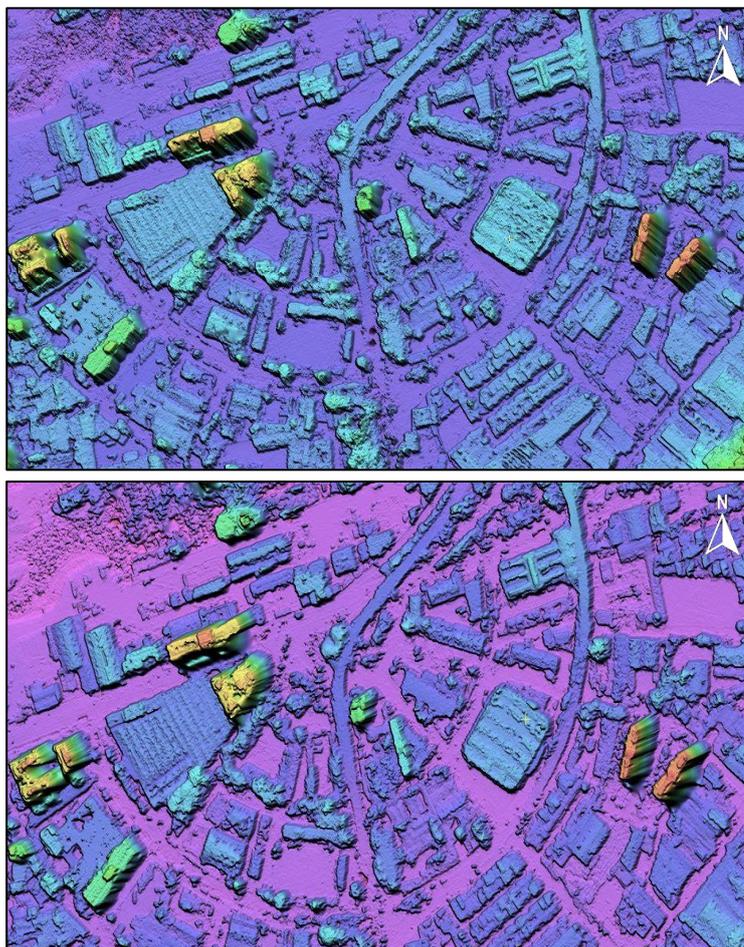
Considerando que os primeiros testes foram feitos com o recomendando de 3 pontos de controle e 100 *Tie Points*, os testes seguintes buscaram compreender como os GCP afetam a qualidade visual e altimétrica do modelo. Para isso, foram gerados dois diferentes experimentos para o caso da ausência de pontos de controle: os métodos NCC e SGM. Os dois modelos gerados foram construídos com as seguintes opções: uma epipolar (33015 R e 33046 L – geometrias verdadeiras), filtro *Wallis* e sem a aplicação de suavização, somente preenchimento de buracos (*Fill Holes*). Exemplos de detalhamento dos modelos sem a presença de GCP são apresentados no Quadro 6 para o método SGM e NCC.



**Quadro 6** – Detalhamento de Modelos sem GCP

[ Legenda a) Método SGM b) Método NCC ]

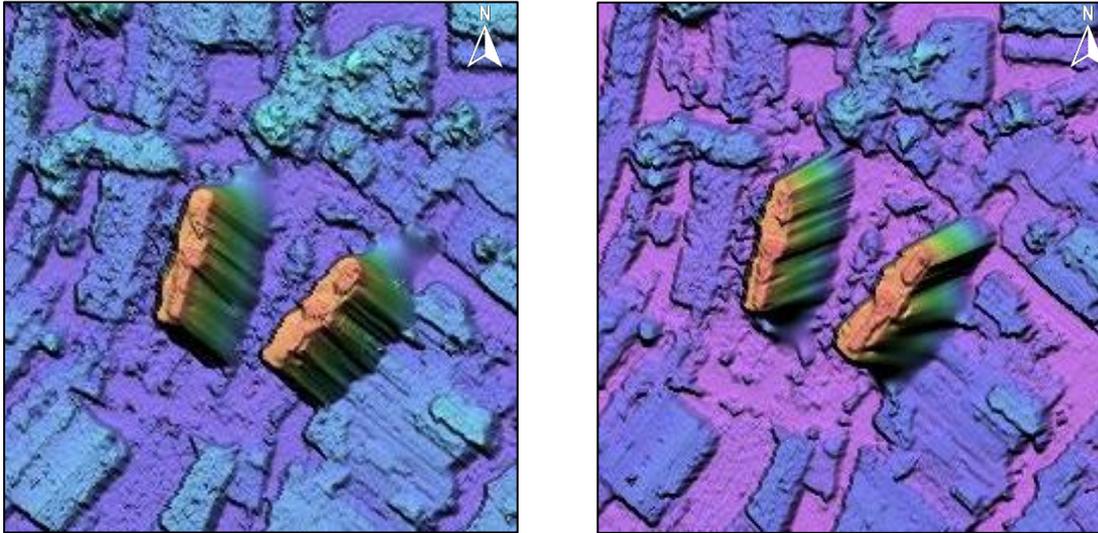
O mesmo padrão apresentado pelos modelos com pontos de controle se repete em sua ausência. Significa, portanto, que de fato a técnica SGM apresenta maior detalhamento quando comparada com o método NCC. Como comparação visual final, utilizando os parâmetros que fornecem os melhores resultados (*SGM e Fill Holes*) foram diferenciados os MDE na presença e ausência de pontos de controle (Figura 43).



**Figura 43** – MDE pelo método SGM com e sem GCP

Não foram notadas diferenças *visuais* (detalhamento) relevantes no tocante a seleção de GCP no método SGM. As distinções mais substanciais percebidas foram com relação a orientação de edifícios altos.

No modelo sem pontos de controle, os prédios possuíam inclinações acentuadas, enquanto no modelo com seleção dos pontos, os prédios apareciam com inclinação reduzida, mais próximas do real, característica extremamente relevante para áreas densamente urbanizadas. As alterações de orientação (Figura 44), mais ou menos inclinadas pode ser explicada pela adequação das epipolares de acordo com a presença de GCP, o que corrigiria tais orientações, concordando com o apresentado pela Tabela 5, mostrando que a presença de GCP, por mais que não seja obrigatória, colabora com a precisão do modelo.



**Figura 44** – Diferenças de inclinação de prédios com e sem GCP (Legenda: imagem da esquerda com GCP e direita sem GCP)

#### 4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Na medida em que os pontos de campo são enquadrados para as respectivas posições do modelo, os valores de elevação podem ser extraídos do MDE através foi feita através da função Extrair Valores para Pontos (*Extract Values to Points*) do ArcMap 10.5. Como resultado, é gerado um atributo no arquivo de pontos contendo os dados de elevação para cada modelo. A Tabela 8 ilustra os valores de exatidão para os modelos gerados por método e presença/ausência de GCP. Os resultados se dão através da subtração dos valores de elevação encontrados pelo levantamento em campo e as respectivas medidas extraídas do modelo. Os valores destacados se referem ao **LE 90**, ou seja, o valor de exatidão da elevação para 90% dos pontos, em ordem crescente como no **Anexo 3**. Na Tabela 8 os valores são organizados por pontos, sem classificação crescente ou decrescente e as unidades são dadas em **metros**.

**Tabela 8** – Valores de Exatidão para os Modelos Digitais de Elevação

Ponto	NCC (3 GCP)	SGM (3 GCP)	NCC (sem GCP)	SGM (sem GCP)
1	3,83	2,13	2,25	2,13
2	3,54	1,72	2,23	2,23
3	3,54	1,95	2,58	2,59
4	3,84	2,49	2,46	2,50
5	3,66	1,77	2,05	2,02
6	10,51	2,61	0,61	1,26
7	4,00	1,96	1,40	1,97
8	8,90	3,16	3,52	0,83
9	4,05	2,38	0,80	2,18
10	3,95	2,01	2,09	1,96
11	3,20	2,52	2,14	1,49
12	3,68	2,24	3,04	1,96
13	3,51	1,86	1,74	1,94
14	3,83	1,95	1,85	1,98
15	5,45	1,39	1,16	0,87
16	3,85	1,99	2,07	2,07
17	2,22	2,03	1,81	1,71
18	3,65	2,15	2,21	2,33
19	2,96	2,12	1,82	2,79
20	3,88	1,49	1,98	1,53
21	3,61	1,89	2,21	2,13
22	2,98	2,64	3,18	2,68
23	3,49	2,60	2,48	0,19
24	1,76	2,90	3,80	3,88
25	3,73	2,39	2,59	2,49
26	3,32	2,21	2,34	2,46
27	3,92	2,29	0,47	0,38
28	3,32	3,11	2,46	2,42

Através da análise dos valores da Tabela 8, percebe-se que não há uma tendência de erro para cada ponto e/ou método de extração, ou seja, pontos que representam os maiores erros (ou menores) para um modelo, não necessariamente se repetem para os demais. Exemplificando, para o ponto 6 que apresenta um valor de exatidão (LE90) de 10,51 m para o método NCC com GCP (o maior erro apresentado entre todos), o mesmo não se repete para os demais modelos, que apresenta valor de exatidão de 0,61 m para o modelo NCC sem GCP. O resumo dos enquadramentos às respectivas escalas do PEC-

PCD é apresentado pela Tabela 9, as unidades são dadas em metros e as tabelas com os cálculos são anexadas ao final do trabalho.

**Tabela 9** –Resumo dos enquadrados dos produtos ao PEC-PCD

<b>Método</b>	<b>Exatidão (LE90)</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Enquadramento Escala (s) PEC-PCD</b>
<b>NCC (com GCP)</b>	4,05	1,74	1:25.000 Classe B
<b>SGM (com GCP)</b>	2,64	0,44	1:10.000 Classe C
<b>NCC (sem GCP)</b>	3,04	0,78	1:25.000 Classe B
<b>SGM (sem GCP)</b>	2,59	0,76	1:10.000 Classe C

A partir dos valores ilustrados, consegue-se perceber uma diferença substancial entre o método NCC e SGM. Os valores de exatidão foram bem diferentes quando comparados entre si em todos os casos, com e sem GCP, corroborando com a qualidade visual superior do SGM e concordando com o exposto pelo Guia do Usuário do PCI 2018.

Considerando a escala 1:10.000 como o enquadramento do método SGM, o MDE gerado deve atender a cartas cadastrais urbanas, propriedades rurais, também por se tratar de um produto com detalhamento relevante, sendo especialmente aplicada em projetos de engenharia. Já os produtos provenientes do método NCC, na escala 1:25.000 são aplicáveis a cartas topográficas com médio detalhamento planimétrico e altimétrico. Contudo, cabe destacar que anteriormente a geração dos modelos, esperava-se atingir escalas em cerca de 1:5.000 por conta da altíssima resolução espacial (0.31m) da imagem Worldview-3

Pelos resultados apresentados, também é possível perceber que o uso de GCP não afeta a escala de enquadramento dos produtos. O método SGM sem GCP apresenta valor de exatidão menor do que quando comparado com o mesmo modelo com a presença de GCP. Esta diferença pode ter ocorrido por propagação de erro na escolha dos pontos, mas ainda assim o modelo com pontos de controle apresenta erro padrão menor do que na ausência de GCP. O mesmo ocorre no método NCC, porém, com uma discrepância maior do que em relação ao anterior.

Por mais que a escala final não seja modificada, ambas as técnicas apresentaram melhores resultados quando não são utilizados pontos de controle, o que demonstra boa adequação dos RPC e, por fim, mostra a veracidade do exposto quanto a não necessidade de utilização de pontos de controle, sendo sua aplicação mais adequada para melhoras visuais, mas que não possui necessariamente valores de elevação mais próximos aos levantados em campo.

## V – CONCLUSÕES

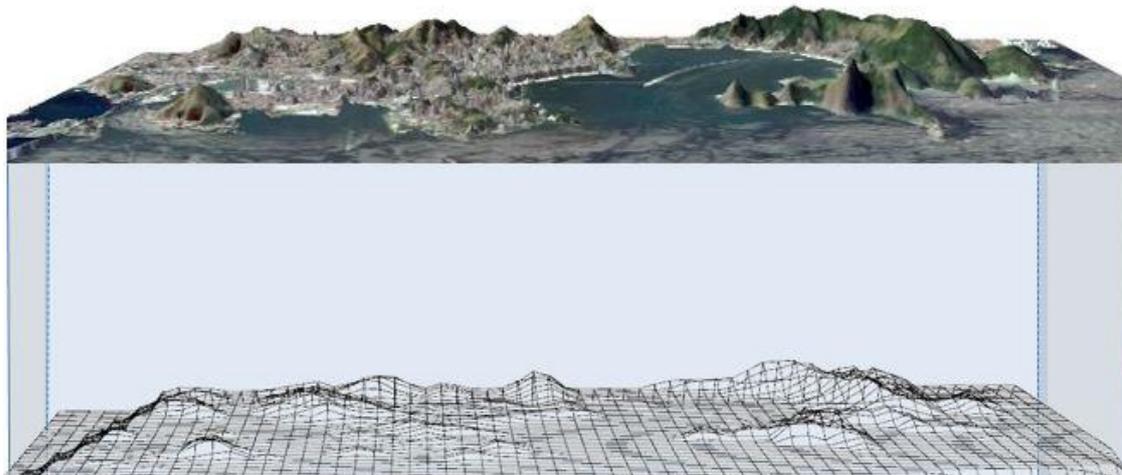
O meio ambiente enquanto estrutura complexa e holística, necessita de abordagem ampla que releve todas as nuances atuantes. O uso das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicadas como ferramentas de análise podem preencher essa lacuna, à medida que as geotecnologias podem abranger, praticamente de forma simultânea, espaço tempo e dimensões taxonômicas, trazendo capacidade preditiva à pesquisa ambiental (XAVIER DA SILVA, 2015). Hoje, os modelos 3D e a visualização, são consideradas mais confiáveis do que outras representações tradicionais por suportarem compreensão superior dos dados espaciais (AHMED, 2017). Uma das principais vantagens de um modelo tridimensional é sua ilustração realista do mundo. Modelos podem ser usados para simulação dinâmica, fornecendo aos tomadores de decisão visualizações impactantes de alternativas futuras (LONGLEY et. al, 2013).

Segundo Longley, et. al (2013) é importante considerar o desenvolvimento de modelos de cidades em escala fina, e de sistemas de visão ao nível da rua que permitam aos usuários visualizar informações matriciais e vetoriais, incluindo características como edifícios e árvores, ao lado de exibições artificiais e realistas, globais e locais. Quanto ao desenvolvimento de estudos tridimensionais voltados a áreas urbanas, em âmbito nacional, há uma grande lacuna a ser preenchida. Nos levantamentos bibliográficos prévios foi possível perceber que, nos últimos 5 anos, nacionalmente poucos especialistas tem se dedicado ao âmbito tridimensional. Classificações urbanas ainda são muito atreladas a imagens de média resolução espacial, como a série Landsat, é necessária uma quebra de paradigma. Nesse caso deve-se reavaliar a forma como as cidades e assentamentos humanos estão estruturados e possibilitar um melhor planejamento, e ações para promover o desenvolvimento sustentável (NOVA AGENDA URBANA, 2016).

À luz dos recentes eventos naturais do Município, principalmente aqueles relacionados com ocupações em áreas de risco e elevações acentuadas, a geração de estudos mais detalhados pode contribuir com projetos de reestruturação urbana, tal como a iniciativa de **revitalização urbana da área central**. Através dos MDE gerados, e suas adequações ao PEC, é possível combinar dados de elevação com informações de ocupação urbana, declividade, estado do solo e precipitação, por exemplo. Mapas desta natureza podem gerar resultados interessantes no tocante ao planejamento urbano.

As representações de modelos digitais de elevação, com destaque para áreas urbanas, também são capazes de atender a outras áreas, como em simuladores e

navegação. Isso é possível, pois, uma das maneiras de se representar um MDE é através de sua visualização tridimensional utilizando outra imagem como base. Softwares específicos, como o ArcScene, utilizam os dados de elevação em cada pixel do modelo e os associa com uma imagem de mesma resolução espacial sobreposta ao modelo (Figura 45). Como resultado é possível visualizar o terreno tridimensionalmente. Através deste tipo de representação os MDE também podem ser utilizados em navegação pela área de estudo, visualização de mudanças verticais (exige modelos e imagens de uma série temporal) e também podem ser utilizadas em instrumento de simulação e imersão.



**Figura 45** – Modelo Digital de Elevação sobreposto a imagem

Com relação a técnica e equipamentos para a geração do modelo, a etapa de trabalho de campo exige certo cuidado, principalmente por se tratar de uma área intensamente urbanizada. Recomenda-se realizar visitas prévias aos pontos pré-selecionados em gabinete para verificação do estado do alvo escolhido, marcações podem estar com baixo grau de conservação e ficar pouco visíveis, além disso, é necessária a presença de equipe de campo com pelo menos 3 membros, uma vez que um integrante deve ficar na base enquanto os demais levantam os pontos. Riscos de segurança também devem ser relevados. Outra recomendação, para áreas urbanas, reside na necessidade de elaboração de documento de autorização para permitir a entrada em edifícios, por vezes, as autorizações são demoradas ou não são permitidas, portanto, levantar previamente quais localidades podem ser acessadas é uma boa sugestão.

Com relação ao GNSS R6, é interessante que se realize uma pré-etapa para se treinar o uso do equipamento, evitando possíveis erros durante o levantamento. Também foi percebido a necessidade de se carregar as baterias pelo menos um dia antes do levantamento in situ. Ademais, recomenda-se estar acompanhado de baterias extras para o caso de alguma descarregar. Nesse contexto, o membro da equipe de campo da base

deve estar alerta ao equipamento, e avisar aos demais membros, caso a bateria seja descarregada, sendo necessário interromper o levantamento até a troca. Dessa forma, também é recomendando o uso de rádios para comunicação o mais rápido possível.

No que diz respeito as opções para geração do modelo, alguns parâmetros obtiveram resultados superiores aos demais. Mesmo nos dois cenários extremos que foram testados (com filtro máximo e sem nenhum tipo de filtro), ainda é possível perceber algumas aplicabilidades dos MDE, destaca-se para o filtro máximo: mesmo suavizando demasiadamente os alvos urbanos, este filtro pode ser usado como meio de se reduzir o processamento para a conversão de MDE para MDT, através de algoritmo do próprio PCI Geomatics. O nível de processamento tende a ser menor, porque no filtro máximo, as feições já estão suavizadas em seu maior nível, dessa forma o software sobrepõe a etapa de suavização, sendo mais simples “retirar” do terreno feições antrópicas e árvores, resultando em um MDT em menor tempo, além disso também podem ser extraídas curvas de nível a partir do modelo digital do terreno.

Com relação ao modelo sem nenhum tipo de filtro, este é gerado de forma a não representar em dados áreas intensamente sombreadas. Por mais que este seja um problema nas áreas urbanas, este tipo modelo tem maior detalhamento poligonal, o que pode ser útil em outros estudos. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de El Garouani (2014). O autor, ao inserir um modelo deste tipo em um software de classificação de imagens, utilizando a metodologia GEOBIA (*Geographic Object-Based Image Analysis*) ou Análise de Imagem Baseada em Objetos Geográficos, que como um de seus diferenciais, utiliza a segmentação – *processo que divide a imagem em regiões de correspondências às áreas de interesse* – para extrair as feições que foram delimitadas. Com isso, é possível partir para a etapa de treinamento, selecionando segmentos urbanos e não urbanos, somente classificando os polígonos em que há informação. Utilizando este método o especialista consegue extrair feições poligonais (shapefiles) de casas, prédios, ruas, e então, é possível gerar uma base vetorial a partir do MDE.

Outro ponto de destaque são os GCP. Foi possível perceber que a não utilização de pontos de controle não afeta diretamente a qualidade final do modelo. Podem ocorrer possíveis distorções geométricas, mas que podem ser superadas com alguma carga de edição. A não utilização de pontos de controle só pode ser feita em modelos matemáticos que utilizam RPC. Quando se deseja trabalhar com uma imagem que não disponibiliza os coeficientes, o especialista deve coletar um número superior de pontos de controle em

campo, recomenda-se 30 pelo Guia do Usuário do PCI, em contraposição a no máximo 3 pontos no caso da presença dos RPC.

De maneira geral, os modelos digitais de elevação gerados tendem a superar uma das limitações do geoprocessamento: a de não considerar a dimensionalidade dos dados e informações a serem trabalhados, os quais são avaliados pelas observações em superfície planimétrica (projetada) e não em superfície real (modelada), podendo mascarar a interpretação da estrutura e dinâmica dos elementos espaciais (MENEZES & FERNANDES, 2013). Dessa forma, os produtos obtidos, em escala 1:10.000 são úteis para o cadastro urbano, delimitação de alvos de acordo com suas coordenadas horizontais (x, y) e vertical (z).

Como aplicação para os produtos da pesquisa, citam-se estudos de ocupação urbana em declividades, podendo gerar pesquisas de uso e cobertura da terra em confluência com o relevo, tendo produtos finais que podem delimitar áreas de risco de ocupação, devido a deslizamentos de massa, por exemplo. Além de estudos de caráter mais geográficos, o MDE quando sobreposto a uma imagem de altíssima resolução espacial, aliado a edição visual, também atende a empresas e órgãos que utilizam simuladores para treinamentos de navegação de navios, por exemplo.

Como etapa futura proveniente da presente pesquisa, os modelos digitais de elevação serão editados para se obter o maior detalhamento e distinção possível de alvos, os modelos também passarão por etapas de design visual, e juntamente com imagens de altíssima resolução do terreno pretende-se atender a demanda de seu uso como subsídio a simuladores de navegação e manobras marítimas.

Fenômenos físicos devem ser representados de acordo com sua real apresentação no terreno. Das informações derivam três tipos de observação relativos aos fenômenos: a posição, a forma e o tamanho (GOMES, 2017). Os modelos 3D permitem a compreensão da distribuição de fenômenos melhor observados tridimensionalmente, por exemplo, correntes oceânicas, temperaturas atmosféricas, rotas de navegação e temperatura de superfície, bem como uma análise detalhada das características locais nos ambientes natural e construídos, como o impacto do corte de árvores na visão panorâmica de áreas turísticas (LONGLEY et. al, 2013).

A presente dissertação procurou detalhar esmiuçadamente os parâmetros selecionados para facilitar pesquisas futuras nesse mesmo âmbito, numa forma de fomento a estudos urbanos mais completos, complexos e que revelem nuances somente observáveis na perspectiva tridimensional. Espera-se colaborar na tomada de decisão,

com políticas públicas inteligentes em função de instrumentos de gestão ambiental mais precisos. A migração da visualização bidimensional já ocorre em diferentes meios tecnológicos, e a Geografia deve-se manter em lugar de destaque como uma ciência que compreende a aplicabilidade de novos meios tecnológicos no dia a dia. Como dito por Gomes (2017), a Geografia é “*uma forma de ver, uma forma de pensar*”, espera-se, então, que a modelagem urbana tridimensional colabore como um novo pensar espacial.

## VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, E. P.; CORREIA, J. D. Sistema de pontos de controle geométrico de imagens orbitais do IBGE, versão 1.0. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. 2005, Goiânia. Anais. São José dos Campos: INPE, (2005).

AL GORE JR. A.A., In: BROTTON, J. Uma História do Mundo em Doze Mapas. Editora Zahar. 700 p. (2013)

ARAUJO, C.A.S. Possibilidade de extrair informações ecológicas e do estado de conservação de bosques; e capacidade de detectar mudanças temporais, avaliando impactos causados por desastres naturais e/ou antrópicos. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. (2010)

ATLAS BRASIL 2013. Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil. Perfil de Niterói (RJ). Dados disponíveis em [http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/perfil\\_m/niteroi\\_rj](http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/perfil_m/niteroi_rj). (2013). Acesso em dez. 2018

BARROS, R.S., CRUZ, C.B.M. SILVA, N.C.C.; REIS, R.B.; SEABRA, V.S. Avaliação da Qualidade Vertical de DEMs do SRTM. In: XXII Congresso Brasileiro de Cartografia. (2005).

BARROS, R.S; CRUZ, C.B.M. Avaliação Da Atimetria Do Modelo Digital De Elevação Do Srtm. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril (2007), INPE, p. 1243-1250.

BEAUJEU-GARNIER, J. Geografia Urbana. 2ª. Edição. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, (1995).

BERNHARDSEN, T. *Geographic information systems: an introduction*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, (1999). 372 p

BERTÉ, R. Gestão socioambiental no Brasil. São Paulo: Saraiva, (2009).

BILJECKI, F. *Level of detail in 3D city models*. PhD Thesis, TU Delft, 353 pp. (2017).

BOUSKELA, M. CASSEB, M. BASSI, S. FACCHINA, M. Caminho para as Smart Cities – Da Gestão Tradicional para a Cidade Inteligente. p. cm. – (2017)

BOVO, M.C., OLIVEIRA, M.A., Centro e Centralidade urbana: Uma análise da pequena cidade de Peabiru (PR), Brasil. Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n.36, v.2, p.104-123 (2014).

BRASIL, Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 – Normas Técnicas da Cartografia Nacional, Diário Oficial da União, Brasília, Brasil, (1984).

BROTTON, J. Uma História do Mundo em Doze Mapas. Editora Zahar. 700 p. (2013)

BURROUGH, P.A. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford, Clarendon Press, (1986)

BUYUKSALIH, G. JACOBSEN, K., 2007. *Comparison of DEM Generation by Very High Resolution Optical Satellites: EARSeL Band “New Developments and Challenges in Remote Sensing”*. Rotterdam: Millpress, Warschau, (2007).

CÂMARA, G; DAVIS, C. MONTEIRO, A.M.V. (Org). Introdução a ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, (2001). Disponível em: <Http://197.249.65.74:8080/biblioteca/bitstream/123456789/570/1/publicacao.pdf>. Acesso em jul. 2018.

CARLSON, T. *Applications of Remote Sensing to Urban Problems. Remote Sensing of Environment*, 86:273-274; (2003).

CARVALHO, M.V.A. Classificação da Cobertura e Uso do Solo com Imagens Worldview-2 Utilizando Mineração de Dados e Análise Baseada em Objetos. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE (2011).

CASTELLS, M. A Questão Urbana. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1983. 4ª Ed. (1972)

CASTRO, F.V.F. FILHO, B.S.S. Cartografia Temática. Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG. Instituto de Geociências/IGC. (2004)

CASTRO, I.E. Escala e pesquisa na geografia. Problema ou solução? Espaço Aberto, PPGG - UFRJ, V. 4, N.1, p. 87-100, 2014 ISSN 2237-3071. (2008).

CHADWICK, G. *Una Vision Sistemica del Planeamiento*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, (1973).

CHRISTOFOLETTI, A. Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos de planejamento. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (Org.). Geomorfologia: uma

atualização de bases e conceitos. 2 eds. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p. 415-440. (1996)

CHRISTOPHERSON, R. W. Geossistemas Uma Introdução á Geografia Física. Tradução: Francisco Eliseu Aquino (et al.). Porto Alegre: Bookman, 7ª edição, (2012).

CLAVAL, P.; WIEBER, J.C. *La Cartographic Thématique Comme Méthode De Recherché. Paris, Les Belles Lettres*, (1969).

CORRÊA, R.L. – O Espaço Urbano. São Paulo, Editora Ática, Série Princípios, (1989).

CORREIA, J.D. Metodologia para Mapeamento Semi-Automático de Feições Depositionais Quaternárias por Imagens Orbitais de Alta Resolução Espacial: Médio Vale do Rio Paraíba Do Sul. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências (2008)

CRUZ, C.B.M. BARROS, R.S., REIS, R.B., ROSÁRIO, L.S., BARBOSA, S.S., RABACO, L.M.L., LOURENÇO, J.S.Q. Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil. (2011)

DENT, B. D. *Principles of thematic map design. London: Addison-Wesley Inc.*, (1985).

DIAL, G.; GRODECKI, J. *RPC: replacement camera models. ASPRS 2005 ANNUAL CONFERENCE. Proceedings, Baltimore, Maryland* (2005).

DIGITALGLOBE WV. Disponível em: <https://www.digitalglobe.com/company/about-us>. Acesso em jun. 2018.

DIGITALGLOBE. Disponível em: <https://www.digitalglobe.com/products/stereo-imagery> Acesso em fev.2018

DONNAY, J.P., BARNESLEY, M.J. AND LONGLEY, P.A. *Remote Sensing and Urban Analysis. Taylor & Francis, London*, 3-18. (2001)

DOWMAN, I; TUA, V. *An update on the use of rational functions for photogrammetric restitution. ISPRS Highlights*, v. 7, n. 3, p 22-29, Sep., (2002).

DUAN, L., LAFARGE, F. *Towards large-scale city reconstruction from satellites. European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Oct 2016, Amsterdam, Netherlands. (2016). <hal-01352466>

EHLERS, M. Sensoriamento remoto para usuários de SIG – sistemas e métodos: as Exigências e a realidade. In: BlaSCHKE, T.; KUX, H. (eds.) Sensoriamento remoto e SIG avançados. São Paulo: Oficina de Textos, (2005)

EL GAROUANI, A. ALOBEID, A. EL GAROUANI, S. *Digital Surface Model Based on Aerial Image Stereo Pairs for 3D Building*. (2014) International Journal of Sustainable Built Environment, Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2014.06.004>>

EMBRAPA. Sistemas orbitais de monitoramento e gestão territorial. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, (2009). Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em fev.2018

ET-ADGV. Norma da Especificação Técnica Para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de Defesa da Força Terrestre (ET-ADGV Defesa F Ter). (2016). EB80-N-72-003 Segunda Edição 2016 Versão 1.1. Disponível em: [http://www2.fct.unesp.br/docentes/cartogalo/INDE\\_Infraestrutura\\_Nacional\\_de\\_Dados\\_Espaciais/2016\\_ET\\_ADGV\\_2a\\_Edicao\\_Textual\\_Anexo\\_A\\_Assinado.pdf](http://www2.fct.unesp.br/docentes/cartogalo/INDE_Infraestrutura_Nacional_de_Dados_Espaciais/2016_ET_ADGV_2a_Edicao_Textual_Anexo_A_Assinado.pdf)

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica do terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). Introdução à ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, (1999).

FELICÍSIMO, A. M. *Modelos digitais del terreno: introducción aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo: Universidad de Oviedo, (1994). Disponível em: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli> acesso em nov. 2018.

FITZ, P.R., Cartografia Básica. 2.ed. rev. e ampl. Canoas: Centro Universitário La Salle, 219p. (2005).

GDTA. *Stereoscopic aspects of Spot*: versão 1.0. Toulouse, (1995).

GOMES, P.C.C. Quadros Geográficos: uma forma de ver, uma forma de pensar. (2017) 1a ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

GONÇALVES, G.A.; DA SILVA, C.R.; MITISHITA, E.A. Comparação dos Dados do SRTM com as RNs da Rede Geodésica Altimétrica do IBGE para Região Sul do Brasil. In: IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. (2005)

GSA – *European Global Navigation Satellite Systems Agency*. Disponível em: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>. Acesso em 15 dez. 2018

- GUERRA, A. J. T. (Org) Geomorfologia Urbana. Rio De Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. 280 P.
- GUERRA, A.; BATISTA, S. (orgs.) Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Editora Bertrand Brasil, (1996).
- HAACK, B. et al. *Urban Analysis and Planning Manual of Photographic Interpretation*. (1997)
- HARTLEY, R. E ZISSERMAN, A. *Multiple View Geometry in Computer Vision, second ed.* Cambridge University Press, (2004).
- HARVEY, D. *Explanation al in geography*. London: Routledge, (1969).
- HIRSCHMULLER, H. *Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information* IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, CA, USA, pp. 807-814.” (2005)
- HOBBS, K. F. *An investigation of RGB multi-band shading for relief visualisation. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Elsevier*, v. 1, n. 3, p. 181-186, (1999).
- HUMBOLDT, A. *Des lignes isothermes et de la distribution de la chaleur sur le globe. In: Mémoires de physique et chimie, de la Société d’Arcueil*. (3): 462-602, 1817.
- IBGE – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm?c=7>. Acesso em 20 dez. 2018
- IBGE – Modelo Geoidal. (2015) disponível em: [https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo\\_geoidal.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm). Acesso em dez. 2018
- IBGE. Censo 2000 e Censo 2010 – IBGE (DADOS DO CENSO 2000). Acesso em 10 set. 2018
- JACOBSEN, K. *Characteristics of Very High Resolution Optical Satellites for Topographic Mapping. Leibniz University Hannover, Institute of Photogrammetry and Geoinformation*. (2011). Disponível em <[https://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx\\_tkpublikationen/2011\\_Jacobsen\\_Hannover\\_Workshop.pdf](https://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/2011_Jacobsen_Hannover_Workshop.pdf)> Acesso em 20 dez. 2018

- JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente. Uma perspectiva em recursos terrestres. 1ª Edição. Parêntese Editora. São José dos Campos, SP, (2009).
- KURKDJIAN, M. L. N. O. VIEIRA, I. M.; Integração; Integração de dados de expansão urbana e dados geotécnicos como subsídio ao estabelecimento de critérios de ocupação em áreas urbanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7. (SBSR), 1993, Curitiba, BR. Anais... São José dos Campos: INPE, (1993).
- LEFEBVRE, H. A Produção do Espaço. Trad. Doralice Barros Pereira e Sérgio. (2000)
- LEFEBVRE, H. A Revolução Urbana. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1999. 178 p. Tradução de Sérgio Martins e revisão técnica de Margarida Maria de Andrade. (1999)
- LEITE, H. et. al Classificação da Capacidade Produtiva de Povoamentos de Eucalipto Utilizando Diâmetro Dominante. Silva Lus. vol.19 no.2 Lisboa. (2011)
- LINDER, W. *Digital Photogrammetry: Theory and Applications Berlin: Springer-Verlag*. 189 p. (2003).
- LONGLEY, P. A. GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J. RHIND.D.W., Sistemas e Ciência da Informação Geográfica. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, (2012)
- LUETHJE, F. EISANK.C., TIEDE, D. *Terrain Extraction in Built-Up Areas from Satellite Stereo-Imagery-Derived Surface Models: A Stratified Object-Based Approach. International Journal of Geo-Information*. (2017). ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2017, 6, 9; doi: 10.3390/ijgi6010009
- MacEACHERN, A.M. *How maps work: representation, visualization and design*. 1. Ed. New York: Guilford Press, (1995).
- MAPGEO (2005). Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/mapgeo/mapgeo.htm>. Acesso em dez.2018
- MARTINELLI, M. Mapas da geografia e cartografia temática – 5ª ed. São Paulo: Contexto, (2009).
- MAUNE, D. F.; MAITRA, J. B.; McKAY, E. J. Accuracy standards. In: MAUNE, D. F. (Ed.). *Digital elevation model technologies and applications: the DEM user's manual*. The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Chapter 3, (2001)

- MENEZES, P. M. L.; FERNANDES, M. C. Roteiro de Cartografia. São Paulo: Oficina de textos, (2013)
- MENEZES, P.M.L.; COELHO NETTO, A.L. Escala: estudo de conceitos e aplicações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 19, Recife, 1999. Anais... Recife: Sociedade Brasileira de Cartografia, (1999).
- MESEV, V. *Remotely Sensed Cities*. Taylor & Francis, London. (2003)
- MONICO, J. F. G. (2008) Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações, 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, (2008).
- MONTGOMERY, D. R. *Predicting Landscape-Scale Erosion Rates Using Digital Elevation Models*. *Comptes Rendus Geosciences*, v. 335, n. 16, p. 1121-1130, dec. (2003).
- NETZBAND, M.; JÜRGENS, C. Urban and Suburban Areas as a Research Topic for Remote Sensing. (2007) In: RASHED, T., JÜRGENS, C. Remote Sensing of Urban and Suburban Areas. Berlin: Springer. Cap.1, p 01-09.
- NOVA AGENDA URBANA – ONU (2016). Disponível em <<http://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-Portuguese-Angola.pdf>> Acesso em 18 set. 2018
- NOVAES, A. G. Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes. São Paulo: Editora Edgard Blücher, (1981).
- NOVO, E.M. L. M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. 4ª Ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- O GLOBO – Jornal online – Disponível em <https://oglobo.globo.com/rio/morro-do-bumba-abrigou-ate-1986-segundo-lixao-de-niteroi-3026928>. Acesso em dez. 2018
- ONU- HABITAT - Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/agencia/onuhabitat/>, acesso em jan. 2018
- ONU-HABITAT *Urbanization and Development Emerging Futures*. Disponível em <http://wcr.unhabitat.org/wp-content/uploads/sites/16/2016/05/WCR-%20Full-Report-2016.pdf>. Acesso em dez. 2018
- PACIFICI, F. NAVULUR, K. *Very High Spatial Resolution Imagery for Urban Applications* (2011).

PCI GEOMATICS – *Geomatica OrthoEngine Training Guide* (2018). Disponível em <http://www.pcigeomatics.com/pdf/TrainingGuide-Geomatica-OrthoEngine.pdf>. Acesso em fev. 2018

PETERSON, M.P. *Interactive and animated cartography*. New York: Prentice-Hall, (1995); 464 p.

PMN-Plano Municipal de Niterói Secretaria De Urbanismo De Niterói - Plano Local De Habitação De Interesse Social (PLHIS) (1994). Disponível em: [http://urbanismo.niteroi.rj.gov.br/wp-content/uploads/download-manager-files/PLHIS\\_NITEROI.pdf](http://urbanismo.niteroi.rj.gov.br/wp-content/uploads/download-manager-files/PLHIS_NITEROI.pdf). Acesso em: 24 de janeiro de 2018

POLI, D.; REMONDINO, F.; DOLCI, C. *Use of satellite imagery for DEM extraction, landscape modeling and GIS applications. International Workshop on Processing and Visualization Using High-Resolution Imagery*. Proceedings, 18-20 November 2004. Pitsanulok, Thailand

QIN, RONGJUN *Change Detection on LOD 2 Building Models with Very High Resolution Spaceborne Stereo Imagery*. Corresponding author at: Singapore-ETH Center, Future Cities Laboratory, 1 CREATE Way. (2011).

R. S.; FELGUEIRAS, C.A.; NAMIKAWA, L.M. Uma metodologia para geração de MNT por grades triangulares. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7. Curitiba, Brasil, Anais. v.2, p. 420-427. (1993)

REUTEBUCH, R. *Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data*. Remote Sens. Environ 94(4):441-449, (2005)

REZENDE, O.R. Morro do Bumba 6 anos: revisitando a tragédia. XVII Encontro Nacional de Geógrafos (2016). ISBN. 978-85-99907-07-8

ROSA, R. Introdução ao Sensoriamento Remoto. Uberlândia: Ed. da Universidade Federal de Uberlândia, (2005).

SABINS, F. F. *Remote Sensing, Principles and Interpretation*. New York: W.H. Freeman and Company, (1999). 494 p.

SANTOS, M. A Natureza do Espaço: Espaço e Tempo, Razão e Emoção. 3a ed. São

SANTOS, M.C. Revisão de Conceitos em Projeção, Homografia, Calibração de Câmera, Geometria Epipolar, Mapas de Profundidade e Varredura de Planos. Disponível em:

<https://www.ic.unicamp.br/~rocha/teaching/2012s1/mc949/aulas/additional-material-revision-of-concepts-homography-and-related-topics.pdf>. Acesso em dez. 2019.

Secretaria De Urbanismo De Niterói. (2018). Disponível em <http://urbanismo.niteroi.rj.gov.br/oucareacentral/>. Acesso em 29 dez. 2018

SECRETARIA de URBANISMO E MOBILIDADE, 2017. Estudo de Impacto de Vizinhança. Disponível em [http://urbanismo.niteroi.rj.gov.br/wp-content/uploads/download-manager-files/EIV\\_MarizeBarros204\\_R01.pdf](http://urbanismo.niteroi.rj.gov.br/wp-content/uploads/download-manager-files/EIV_MarizeBarros204_R01.pdf). Acesso em 29 dez. 2018

SINGH, S.P. JAIN, K. MANDLA, V.R. *Virtual 3D City Modelling: Techniques and Applications*. (2013) International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-2/W2, ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop3, Istanbul, Turkey

SINGH, S.P. JAIN, K. MANDLA, V.R. *Virtual 3D City Modelling: Techniques and Applications. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-2/W2, ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop3, Istanbul, Turkey. (2013)

T.S. BARBOSA; FURRIER, M. A Geomorfologia Antropogênica e a Relação Uso da Terra Com O Risco Geológico No Município De João Pessoa – PB. *Revista Brasileira de Geomorfologia* v.18, n°1 (2017). DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v18i1.1064>

TAO, C.; MERCER, J.; SCHNICK, S.; ZHANG, Y. *Image rectification using a generic sensor model - Rational Function Model. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 33, Part B3. Amsterdam 2000.

THORN, C.E. *An introduction to theoretical geomorphology*. Boston: Unwin Hyman. 247 pp. (1988).

TIMBÓ, M.A Levantamento Através do Sistema GPS. Disponível em: [http://www.csr.ufmg.br/cart01/levantamentogps\\_timbo.pdf](http://www.csr.ufmg.br/cart01/levantamentogps_timbo.pdf). (2000). Acesso em 20 dez. 2018

TOUTIN, T. & CHENG, P. *Comparasion of Automated Digital Elevation Model Extraction Results Using Along-Track ASTER and Across-Track SPOT Stereo Images. SPIE Journal, Optical Engineering*, 41 (9), p. 2102-2106. (2002)

TOUTIN, T. *Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: Spot-5, Eros-A, Ikonos-II, and QuickBird. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 42, n. 10, p. 2121-2129, (2004).

TOUTIN, T. *Multisource data integration: comparison of geometric and radiometric methods. International Journal of Remote Sensing*, v. 16, n. 15, p. 2795-2811, (1995).

VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-16702-RPQ/854). 79p. (2010).

WANG, R. PEETHAMBARAN, J., CHEN, D. *LIDAR Point Clouds to 3D Urban Models: A Review. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* (2017)

XAVIER DA SILVA J.; MARINO, T.B.; GOES, M.H.B. *Geoprocessing and spatial planning: some concepts and applications*, p. 335-347. In: SILVA, E.A.; HEALEY, P.; HARRIS, N.; VAN DEN BROECK, P. (editors) *The Routledge Handbook of Planning Research Methods*. New York: Routledge, (2015).

ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. *Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes and Landforms*, v. 12, p. 47-56, 1987.

ZLATANOVA, S. *Advances in 3D GIS*. DDD – *Rivista trimestrale Digitale e Design*. (2002). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/229053801>. Acesso em: 12 de janeiro de 2018

# LISTA DE ANEXOS

## ANEXO I



### Relatório de Estação Geodésica

Estação :	2994X	Nome da Estação :	2994X	Tipo :	Referência de Nível - RN
Município :	NITERÓI			UF :	RJ
Última Visita:	28/06/2017	Situação Marco Principal :	Bom		
Conexões :	GPS : 96099				

DADOS PLANIALTIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22 ° 55 ' 20,49289 " S	Altitude Normal(m)	4,5066	Gravidade(mGal)	
Longitude	43 ° 05 ' 41,10087 " W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Datum	
Altitude Geométrica(m)	-1,641	Sigma Altitude(m)	0,073	Data Medição	
Fonte	GPS Geodésico	Datum	Imbituba	Data Cálculo	
Origem	Ajustada	Data Medição	19/05/2003		
Datum	SIRGAS2000	Data Cálculo	30/07/2018		
Data Medição	15/08/2012	Número Geopotencial (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	44,111		
Data Cálculo	03/09/2012				
Sigma Latitude(m)	0,003				
Sigma Longitude(m)	0,003				
Sigma Altitude Geométrica(m)	0,019				
UTM(N)	7.463.809,408				
UTM(E)	695.389,655				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 30/07/2018 - Relatório em : [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_altimetrica/relatorio/relatorio\\_REALT\\_2018.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorio_REALT_2018.pdf)
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em : [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_planialtimetrica/relatorio/re\\_sirgas2000.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_planialtimetrica/relatorio/re_sirgas2000.pdf)
- Para obtenção de Altitude Ortométrica referente a levantamento SAT utilizar o MAPGEO2015 disponível em : <https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/10855-modelo-de-ondulacao-geoidal.html>
- As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015 disponível em : [ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/rpr\\_01\\_2015\\_sirgas2000.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf)

#### Localização

Na cerca medindo 20 m de comprimento, no sentido Norte na direção do posto de combustíveis, e confrontando com outra cerca de 5 m de comprimento no sentido Leste de acesso à Avenida Quintino Bocaiúva, no início da praia de Charitas / Niterói-RJ.

#### Descrição

Chapa metálica estampada RN 2994X.

Foto(s)



## ANEXO II

Dados do arquivo do projeto	Sistema de coordenadas
Nome:	Nome: UTM
Tamanho:	Datum: WGS 1984
Modificado: 30/08/2013 13:12:17 (UTC:-6)	Zona: 23 South (45W)
Fuso Horário: Hora Padrão das Montanhas	Geóide:
horário:	Datum vertical:
Número de Referência:	
Descrição:	

ID	UTM (Este)	UTM (Norte)	Elevação (metros)
1	693428,0884	7467372,529	3,980058
2	692012,3661	7466692,484	3,551899
3	695363,7461	7463798,128	2,947527
4	693916,1876	7469153,258	6,058288
5	693171,3765	7467008,467	5,130187
6	692216,9917	7465580,255	22,20254
7	694862,7025	7462628,041	2,568916
8	693531,7224	7467014,518	45,91952
9	695870,3474	7460315,434	6,253164
10	691589,7664	7462076,471	24,00038
11	692596,3999	7462300,028	206,0533
12	692140,7198	7466738,202	3,386437
13	695296,8533	7464607,482	2,596651
14	691500,686	7465571,011	20,99482
15	694580,7512	7466419,038	5,173277
16	694564,7049	7469552,768	2,618502
17	693845,6819	7468774,084	2,766099
18	693606,7495	7468711,192	2,816867
19	695872,0514	7468242,807	12,98878
20	695164,7264	7465956,419	4,264144
21	694460,9572	7465218,125	2,30985
22	694009,4519	7464744,014	57,39017
23	693612,0822	7466289,819	5,326303
24	693031,3959	7466828,596	34,16539
25	692065,3109	7467586,218	4,911807
26	694992,0923	7468408,593	8,728276
27	693313,4442	7465812,911	3,464445
28	693319,1974	7468238,935	3,463425

**OBS:** Dados dos pontos de controle após o procedimento de elevação geoidal no

MapGeo

## ANEXO III

### Cálculos PEC

#### PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA – MÉTODO NCC (*fill holes*)

ID	NCC	ELEV_GNSS	MDE-GNSS	ABS
24	35,93	34,17	1,76	1,76
17	0,55	2,77	-2,22	2,22
19	15,95	12,99	2,96	2,96
22	60,37	57,39	2,98	2,98
11	209,26	206,05	3,20	3,20
26	12,04	8,73	3,32	3,32
28	6,78	3,46	3,32	3,32
23	8,81	5,33	3,49	3,49
13	6,11	2,60	3,51	3,51
2	7,09	3,55	3,54	3,54
3	6,49	2,95	3,54	3,54
21	5,92	2,31	3,61	3,61
18	6,47	2,82	3,65	3,65
5	8,79	5,13	3,66	3,66
12	7,07	3,39	3,68	3,68
25	8,64	4,91	3,73	3,73
14	24,82	20,99	3,83	3,83
1	7,81	3,98	3,83	3,83
4	9,90	6,06	3,84	3,84
16	6,46	2,62	3,85	3,85
20	8,14	4,26	3,88	3,88
27	7,39	3,46	3,92	3,92
10	27,95	24,00	3,95	3,95
7	6,57	2,57	4,00	4,00
9	10,30	6,25	4,05	4,05
15	10,62	5,17	5,45	5,45
8	54,82	45,92	8,90	8,90
6	32,71	22,20	10,51	10,51
			<b>DESVIO</b>	<b>1,74</b>

**Legenda** – **ID**: Identificação do Ponto; **NCC**: Normalized Cross-Correlation; **ELEV\_GNSS**: Elevação obtida com o GNSS; **MDE-GNSS**: Subtração entre as coordenadas do modelo e campo; **ABS**: Valor absoluto

*PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA – MÉTODO NCC (filter low)*

<b>ID</b>	<b>NCC</b>	<b>ELEV_GNSS</b>	<b>MDE-GNSS</b>	<b>ABS</b>
24	35,93	34,17	1,76	1,76
17	0,55	2,77	-2,22	2,22
19	15,95	12,99	2,96	2,96
22	60,37	57,39	2,98	2,98
11	209,26	206,05	3,20	3,20
26	12,04	8,73	3,32	3,32
28	6,78	3,46	3,32	3,32
23	8,81	5,33	3,49	3,49
13	6,11	2,60	3,51	3,51
2	7,09	3,55	3,54	3,54
3	6,49	2,95	3,54	3,54
21	5,92	2,31	3,61	3,61
18	6,47	2,82	3,65	3,65
5	8,79	5,13	3,66	3,66
12	7,07	3,39	3,68	3,68
25	8,64	4,91	3,73	3,73
14	24,82	20,99	3,83	3,83
1	7,81	3,98	3,83	3,83
4	9,90	6,06	3,84	3,84
16	6,46	2,62	3,85	3,85
20	8,14	4,26	3,88	3,88
27	7,39	3,46	3,92	3,92
10	27,95	24,00	3,95	3,95
7	6,57	2,57	4,00	4,00
9	10,30	6,25	4,05	4,05
15	10,62	5,17	5,45	5,45
8	54,82	45,92	8,90	8,90
6	32,71	22,20	10,51	10,51
			<b>DESVIO</b>	<b>1,74</b>

**Legenda** – **ID**: Identificação do Ponto; **NCC**: Normalized Cross-Correlation; **ELEV\_GNSS**: Elevação obtida com o GNSS; **MDE-GNSS**: Subtração entre as coordenadas do modelo e campo; **ABS**: Valor absoluto

*PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA – MÉTODO SGM (filter low)*

<b>ID</b>	<b>SGM</b>	<b>ELEV_GNSS</b>	<b>MDE-GNSS</b>	<b>ABS</b>
15	3,79	5,17	1,39	1,39
20	2,78	4,26	1,49	1,49
2	1,83	3,55	1,72	1,72
5	3,36	5,13	1,77	1,77
13	0,74	2,60	1,86	1,86
21	0,42	2,31	1,89	1,89
14	19,05	20,99	1,95	1,95
3	1,00	2,95	1,95	1,95
7	0,61	2,57	1,96	1,96
16	0,63	2,62	1,99	1,99
10	21,99	24,00	2,01	2,01
17	0,74	2,77	2,03	2,03
19	10,87	12,99	2,12	2,12
1	1,85	3,98	2,13	2,13
18	0,67	2,82	2,15	2,15
26	6,52	8,73	2,21	2,21
12	1,15	3,39	2,24	2,24
27	1,18	3,46	2,29	2,29
9	3,87	6,25	2,38	2,38
25	2,52	4,91	2,39	2,39
4	3,57	6,06	2,49	2,49
11	203,53	206,05	2,52	2,52
23	2,72	5,33	2,60	2,60
6	24,81	22,20	-2,61	2,61
22	54,75	57,39	2,64	2,64
24	31,26	34,17	2,90	2,90
28	0,36	3,46	3,11	3,11
8	49,08	45,92	-3,16	3,16
			<b>DESVIO</b>	0,44

**Legenda** – **ID**: Identificação do Ponto; **SGM**: Semi-Global Matching; **ELEV\_GNSS**: Elevação obtida com o GNSS; **MDE-GNSS**: Subtração entre as coordenadas do modelo e campo; **ABS**: Valor absoluto

*PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA – MÉTODO SGM (LOW FILTER)*

<b>ID</b>	<b>SGM</b>	<b>ELEV_GNSS</b>	<b>MDE-GNSS</b>	<b>ABS</b>
15	3,79	5,17	1,39	1,39
20	2,78	4,26	1,49	1,49
2	1,83	3,55	1,72	1,72
5	3,36	5,13	1,77	1,77
13	0,74	2,60	1,86	1,86
21	0,42	2,31	1,89	1,89
14	19,05	20,99	1,95	1,95
3	1,00	2,95	1,95	1,95
7	0,61	2,57	1,96	1,96
16	0,63	2,62	1,99	1,99
10	21,99	24,00	2,01	2,01
17	0,74	2,77	2,03	2,03
19	10,87	12,99	2,12	2,12
1	1,85	3,98	2,13	2,13
18	0,67	2,82	2,15	2,15
26	6,52	8,73	2,21	2,21
12	1,15	3,39	2,24	2,24
27	1,18	3,46	2,29	2,29
9	3,87	6,25	2,38	2,38
25	2,52	4,91	2,39	2,39
4	3,57	6,06	2,49	2,49
11	203,53	206,05	2,52	2,52
23	2,72	5,33	2,60	2,60
6	24,81	22,20	-2,61	2,61
22	54,75	57,39	2,64	2,64
24	31,26	34,17	2,90	2,90
28	0,36	3,46	3,11	3,11
8	49,08	45,92	-3,16	3,16
			<b>DESVIO</b>	0,44

**Legenda** – **ID**: Identificação do Ponto; **SGM**: Semi-Global Matching; **ELEV\_GNSS**: Elevação obtida com o GNSS; **MDE-GNSS**: Subtração entre as coordenadas do modelo e campo; **ABS**: Valor absoluto

*PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA – SEM GCP – MÉTODO NCC (Fill Holes)*

ID	NCC_SEM_GCP	ELEV_GNSS	MDE-GNSS	ABS
27	3,00	3,46	0,47	0,47
6	21,60	22,20	0,61	0,61
9	7,05	6,25	-0,80	0,80
15	4,02	5,17	1,16	1,16
7	1,17	2,57	1,40	1,40
13	0,85	2,60	1,74	1,74
17	0,95	2,77	1,81	1,81
19	11,17	12,99	1,82	1,82
14	19,15	20,99	1,85	1,85
20	2,28	4,26	1,98	1,98
5	3,08	5,13	2,05	2,05
16	0,55	2,62	2,07	2,07
10	21,91	24,00	2,09	2,09
11	203,91	206,05	2,14	2,14
21	0,10	2,31	2,21	2,21
18	0,61	2,82	2,21	2,21
2	1,32	3,55	2,23	2,23
1	1,73	3,98	2,25	2,25
26	6,39	8,73	2,34	2,34
4	3,60	6,06	2,46	2,46
28	1,00	3,46	2,46	2,46
23	2,84	5,33	2,48	2,48
3	0,37	2,95	2,58	2,58
25	2,33	4,91	2,59	2,59
12	0,35	3,39	3,04	3,04
22	54,21	57,39	3,18	3,18
8	49,44	45,92	-3,52	3,52
24	30,36	34,17	3,80	3,80
			<b>DESVIO</b>	<b>0,78</b>

**Legenda** – **ID**: Identificação do Ponto; **NCC**: Normalized Cross-Correlation; **ELEV\_GNSS**: Elevação obtida com o GNSS; **MDE-GNSS**: Subtração entre as coordenadas do modelo e campo; **ABS**: Valor absoluto

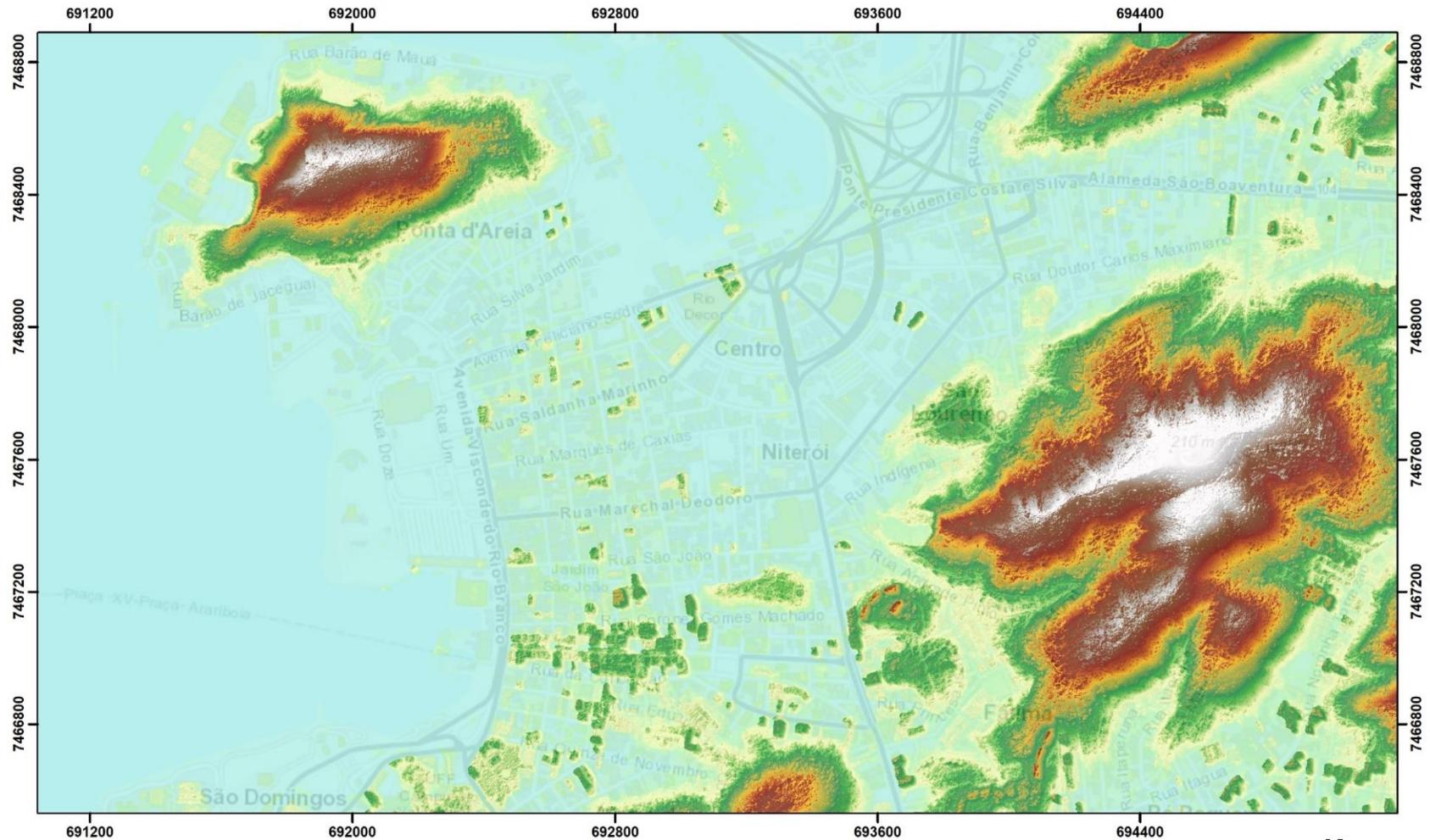
*PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA – SEM GCP – MÉTODO SGM (Fill Holes)*

<b>ID</b>	<b>SGM_SEM_GCP</b>	<b>ELEV_GNSS</b>	<b>MDE-GNSS</b>	<b>ABS</b>
23	5,52	5,33	-0,19	0,19
27	3,08	3,46	0,38	0,38
8	45,09	45,92	0,83	0,83
15	4,30	5,17	0,87	0,87
6	20,95	22,20	1,26	1,26
11	204,57	206,05	1,49	1,49
20	2,73	4,26	1,53	1,53
17	1,05	2,77	1,71	1,71
13	0,66	2,60	1,94	1,94
12	1,43	3,39	1,96	1,96
10	22,04	24,00	1,96	1,96
7	0,59	2,57	1,97	1,97
14	19,02	20,99	1,98	1,98
5	3,11	5,13	2,02	2,02
16	0,55	2,62	2,07	2,07
21	0,18	2,31	2,13	2,13
1	1,85	3,98	2,13	2,13
9	4,08	6,25	2,18	2,18
2	1,33	3,55	2,23	2,23
18	0,49	2,82	2,33	2,33
28	1,04	3,46	2,42	2,42
26	6,27	8,73	2,46	2,46
25	2,42	4,91	2,49	2,49
4	3,56	6,06	2,50	2,50
3	0,35	2,95	2,59	2,59
22	54,71	57,39	2,68	2,68
19	10,19	12,99	2,79	2,79
24	30,29	34,17	3,88	3,88
			<b>DESVIO</b>	<b>0,76</b>

**Legenda** – **ID**: Identificação do Ponto; **SGM**: Semi-Global Matching; **ELEV\_GNSS**: Elevação obtida com o GNSS; **MDE-GNSS**: Subtração entre as coordenadas do modelo e campo; **ABS**: Valor absoluto

### ANEXO IV

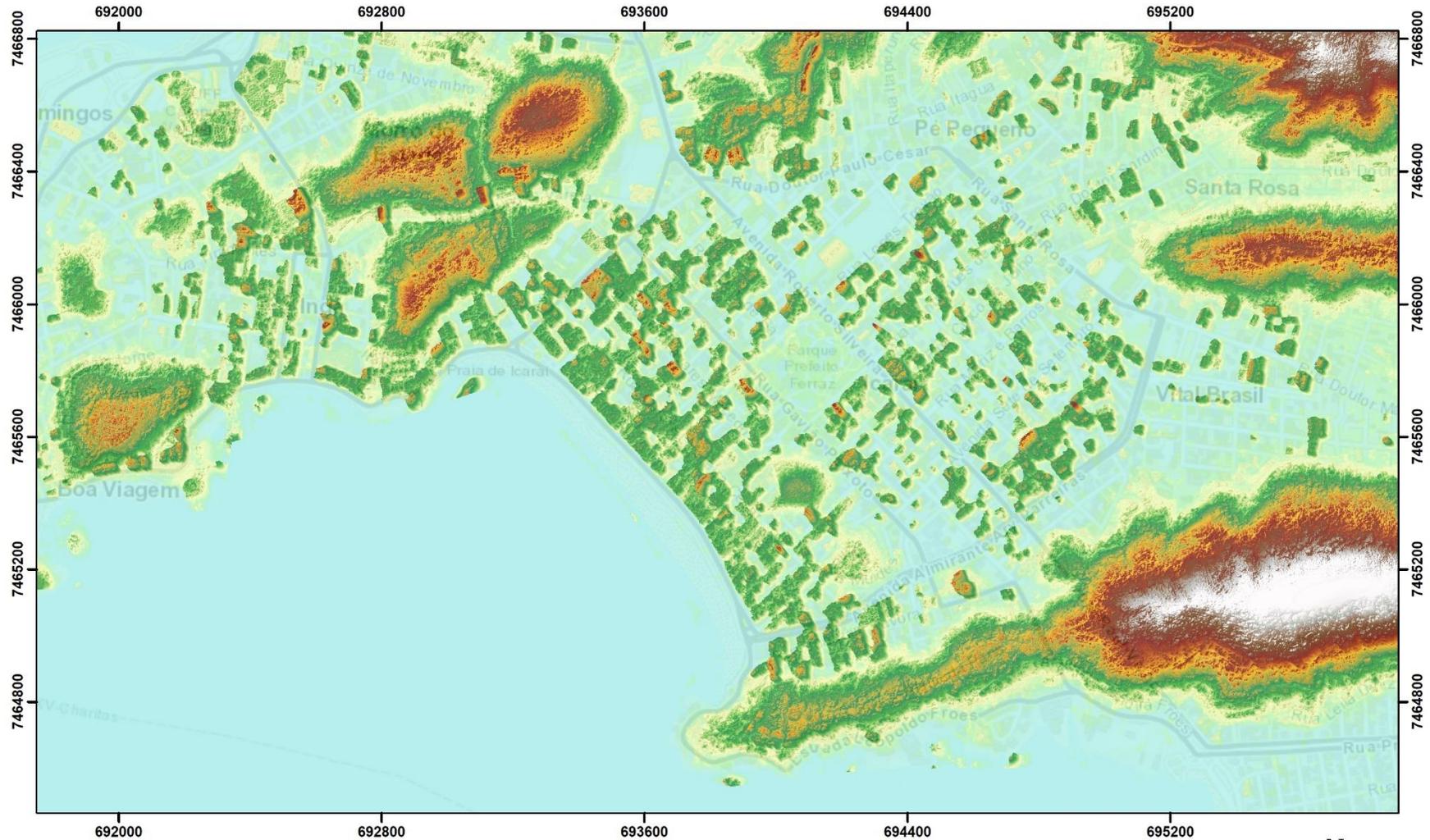
## Mapa do Modelo Digital de Elevação - Recorte Centro



Projeção: Universal Transversa de Mercator  
Sistema Geodésico: SIRGAS 2000  
Elaboração: Vandré Viegas



# Mapa do Modelo Digital de Elevação - Recorte de Icaraí



Projeção: Universal Transversa de Mercator  
Sistema Geodésico: SIRGAS 2000  
Elaboração: Vandrê Viegas

