

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**USO DE DADOS LIDAR PARA O ESTUDO DA
VEGETAÇÃO EM TRECHO DE MATA ATLÂNTICA
NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, BRASIL**

ELISA ARAUJO PENNA CARIS

Rio de Janeiro

2018

**USO DE DADOS LIDAR PARA O ESTUDO DA VEGETAÇÃO EM TRECHO DE
MATA ATLÂNTICA NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, BRASIL**

ELISA ARAUJO PENNA CARIS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutora em Ciências (Geografia – Área de Concentração: Planejamento e Gestão Ambiental).

Orientação:

Prof.^a Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz
Departamento de Geografia/UFRJ

Co-Orientação

Dr. Bruno Coutinho Kurtz
Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do
Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2018

**USO DE DADOS LIDAR PARA O ESTUDO DA VEGETAÇÃO EM TRECHO DE
MATA ATLÂNTICA NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, BRASIL**

ELISA ARAUJO PENNA CARIS

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Geografia da Universidade Federal
do Rio de Janeiro como requisito
parcial à obtenção do título de
Doutora em Geografia na Área de
Concentração de Planejamento e
Gestão Ambiental

Aprovada por:

Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz
Departamento de Geografia – UFRJ - Orientadora

Dr. Bruno Coutinho Kurtz
Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro – JBRJ - Co-orientador

Dra. Marinez Ferreira de Siqueira
Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro – JBRJ

Dra. Monika Richter
Departamento de Geografia – UFF

Dr. Rafael Silva de Barros
Departamento de Geografia - UFRJ

Dr. Manoel Couto Fernandes
Departamento de Geografia - UFRJ

Ficha Catalográfica

CARIS, ELISA ARAUJO PENNA

Uso de dados LiDAR para estudo da vegetação em trecho de Mata Atlântica no município do Rio de Janeiro, Brasil [Rio de Janeiro] 2018

169 f.: il.

Tese (Doutorado em Geografia)

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, 2018.

Orientadora: Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz

Co-Orientador: Dr. Bruno Coutinho Kurtz

1. Sensoriamento Remoto a laser. 2. Modelo Digital de Terreno 3. Estrutura da vegetação. 4. Floresta de encosta

Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Geografia.

A todas as mulheres, por sermos muitas em uma só. Em especial para minha, já não tão pequena, menina Clara, minha mãe, minha irmã e minha avó, que onde quer que esteja está sempre olhando por mim.

Dedico também ao meu pai e irmãos e a você Bruno, o verdadeiro responsável por esta bela e enlouquecedora jornada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos, que de alguma forma, contribuíram para a realização desta Tese. Em especial: aos meus pais, por serem meu exemplo, à minha menina Clara, que este período de ausência não a afaste de uma possível vida acadêmica, e aos meus irmãos por todo o incentivo e paciência.

Ao Bruno, meu marido, por todo o seu apoio e incentivo, principalmente durante o trabalho de campo e revisão desta Tese. Se hoje chego nesta etapa da minha vida acadêmica devo a sua insistência. Muito obrigado por acreditar em mim!

À minha Orientadora, Prof. Dra. Carla Madureira, pela sua orientação e amizade. Se hoje entendo um pouco de Sensoriamento Remoto, devo principalmente a ela.

A toda equipe do Laboratório ESPAÇO, por me fazerem sentir parte desta linda família, em especial as Professoras Paula e Beth, aos colegas Ana Paula, Eduardo, Gabriel, Marcelo, Marcus, Gabi, Julia, Felipe, João, Vandrê, Cardão, Rômulo, por toda ajuda e apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa, o meu muito obrigado.

Ao Jorge Caruzo pela inestimável colaboração durante o trabalho de campo.

Ao ICMBio pela licença de pesquisa e ao guarda-Parque Gilson, pelo apoio necessário durante os trabalhos de campo.

Aos professores Monika Richter e Rafael Barros, pelas sugestões durante a defesa do exame de qualificação.

Ao Instituto Pereira Passos, em especial ao Sr. Aroeira. e ao Geógrafo Felipe Mandarino, pela cessão dos dados LiDAR.

A empresa HANSA – Geofísica e Aerolevanteamento e o Prof. Dr. André Avelar, pela disponibilização dos dados LiDAR.

A CAPES, pela bolsa concedida durante o Programa e que possibilitou a realização desta Tese.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pelo apoio financeiro durante o trabalho de campo e participações em congressos.

A secretaria do PPGG, por todo o apoio durante as etapas do curso.

Aos meus amigos, em especial a Danielle Cintra, Alline F. de Paula, Marcela Venturin, Fabiana Nascimento, Frederico Barcellos e Paulo Penna, e a toda a minha família, incluindo a minha enteada Julia, pelo carinho durante toda esta jornada.

Àqueles que, por um lapso de memória, não foram listados aqui. Muito obrigada!

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Revisão Conceitual.....	5
2.1. O Sistema LiDAR.....	7
2.2. Aplicações do LiDAR.....	11
2.3. Aplicações da tecnologia LiDAR no Brasil.....	16
3. Materiais e Métodos.....	21
3.1. Área de Estudo.....	21
3.2. Dados LiDAR.....	28
3.3. Geração dos Modelos Digitais de Terreno (MDT).....	32
3.4. Análise da Altimetria dos MDT.....	35
3.5. Levantamento e Análise da Vegetação.....	38
3.6. Estimativa de altura das árvores e Modelo de Densidade Relativa da Vegetação.....	42
3.7. Extração das métricas da nuvem de pontos.....	44
4. Resultados e Discussões.....	46
4.1. Avaliação dos dados LiDAR (.las)	46
4.2. Avaliação da exatidão altimétrica dos MDT.....	52
4.2.1. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 0,4 m.....	64
4.2.2. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 1 m.....	67
4.2.3. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 2 m.....	70
4.2.4. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 5 m.....	73
4.2.5. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 10 m.....	75
4.3. Levantamento e Análise da Vegetação.....	81
4.3.1. Área 1.....	81
4.3.2. Área 2.....	88
4.3.3. Área 3.....	93
4.4. Estimativa da altura das árvores e Modelo de Densidade Relativa da Vegetação.....	101
4.5. Extração das métricas da nuvem de pontos.....	119
5. Conclusões.....	122
6. Bibliografia.....	125

ANEXO 1 – Decreto N ^o 89.817, de 20 de junho de 1984.....	132
ANEXO 2 – Valores referentes ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (Boletim do Exército, 2016).....	133
ANEXO 3 – Tabelas detalhadas para avaliação dos modelos segundo metodologia proposta por Vieira e Genro (2013).....	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema a laser operado no modo perfil. Fonte: Zandoná (2006)	8
Figura 2: Componentes do sistema LiDAR tipo scanner. O DGPS e o INS (<i>Inertial Navigation System</i>) documentam a localização exata e os movimentos da aeronave nos instantes em que o pulso do laser é enviado e recebido. Em terra é necessária uma estação base de DGPS que trabalhe de forma conjunta ao DGPS instalado na plataforma. Fonte: adaptado de Giongo et al. (2010)	8
Figura 3: Espelhos de varredura e seus respectivos padrões. Em (A) o espelho oscilante e em (B) o polígono rotatório. (Fonte: adaptado de Giongo et al., 2010 e Wehr e Lohr, 1999)	9
Figura 4: Representação do sistema de ondas contínuas (A) e sistema de pulsos (B). O primeiro retorno é identificado como o objeto mais alto do terreno enquanto que o último é referente ao solo. Os retornos intermediários permitem extrair informações da vegetação ou objetos que estejam sob a floresta, por exemplo. Fonte: (GIONGO et al., 2010)	9
Figura 5: Exemplo de uma imagem elaborada a partir da intensidade dos retornos (A) e dos valores de elevação (B) de uma nuvem de pontos LiDAR. Fonte: própria autora..	10
Figura 6: (A) Ângulo de escaneamento e (B) Footprint. Fonte: adaptado de Gatzliolis e Andersen (2008)	11
Figura 7: Representação do Modelo Digital de Terreno (MDT) e do Modelo Digital de Superfície (MDS). Fonte: Santos et al. (2015)	12
Figura 8: Distribuição média da biomassa acima do solo (AGB) obtida a partir de dados do campo e de dados do LiDAR nas três áreas de estudo. Fonte: Sato et al. (2015)	18
Figura 9: Localização dos setores do PARNA Tijuca. Setor (A): Floresta da Tijuca; setor (B): Serra da Carioca; Setor (C): Pedra Bonita/Pedra da Gávea; e Setor (D): Pretos Forros/Covanca.....	22
Figura 10: Mapa de Declividade de encostas do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.....	24
Figura 11: Mapa de cobertura e uso da terra do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca segundo IPP (2016). A maior parte do Setor “A” é classificada como Floresta Ombrófila Densa em estágio avançado.....	26
Figura 12: Gráfico com a porcentagem das classes de uso e cobertura do solo do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca, segundo IPP (2016)	27
Figura 13: Visão geral das áreas cobertas pelo aerolevantamento a laser (Fonte: IPP).	28
Figura 14: Articulação dos arquivos .las do Maciço da Tijuca (esquerda) e do setor “A” do Parque Nacional da Tijuca (direita).....	30
Figura 15: Localização dos 165 pontos levantados com Estação Total sob densa cobertura vegetal.....	35
Figura 16: (1) Levantamento com receptores modelo Trimble R6 de dois pontos com coordenadas precisas utilizados para vante e ré; (2) aparelho utilizado para levantar os pontos e (3) baliza utilizada no levantamento.....	36
Figura 17: Mapa do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca com a localização das	

parcelas amostradas em campo.....	39
Figura 18: Aparelho GNSS utilizado para georreferenciar as quinas das parcelas levantadas em campo.....	40
Figura 19: Exemplo de indivíduo ramificado na segunda área amostrada.....	41
Figura 20: Representação gráfica do cálculo da densidade relativa de vegetação em cada célula do modelo. (adaptado de d'Oliveira et al., 2012)	44
Figura 21: Mapa de densidade de todos os retornos do arquivo 286-d-iii-3.las, onde está localizada a área de estudo (Área 1), gerado pelo comando <i>Catalog</i> , no Fusion, considerando o valor da célula de 5 m ² e a quantidade mínima e máxima de retornos de 4 e 10, respectivamente.....	48
Figura 22: Mapa de densidade de retornos classificados como <i>Ground</i> do arquivo 286-d-iii-3.las gerado pelo comando <i>Catalog</i> , no Fusion, considerando o valor da célula de 5 m ² e a quantidade mínima e máxima de retornos de 4 e 10, respectivamente	48
Figura 23: Mapa de densidade de pontos LiDAR classificados como <i>Ground</i> por m ² , no Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca e com detalhe na área de estudo (Área 1).	50
Figura 24: As quatro faixas do aerolevantamento com LiDAR que compreendem a área de estudo (Área 1) levantada em campo.....	51
Figura 25: Modelos Digitais do Terreno produzidos a partir de dados LiDAR do Setor A do PARNA da Tijuca utilizando diferentes valores de células, com detalhe para a área onde foi realizado o levantamento de 165 pontos com Estação Total: (a) MDTFt (0,4); (b) MDTFg (0,4); (c) MDTAb (0,4); (d) MDTAt (0,4); (e) MDTFt (1); (f) MDTFg (1); (g) MDTAb (1); (h) MDTAt (1); (i) MDTFt (2); (j) MDTFg (2); (k) MDTAb (2); (l) MDTAt (2); (m) MDTFt (5); (n) MDTFg (5); (o) MDTAt; (p) MDTAb (5); (q) MDTFt (10); (r) MDTFg (10); (s) MDTAb (10); (t) MDTAt (10).....	62
Figura 26: Gráficos de discrepância entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 0,4 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.....	66
Figura 27: Gráficos de discrepância entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 1 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.....	69
Figura 28: Gráficos de discrepância entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 2 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.....	72
Figura 29: Gráficos de discrepância entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 5 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.....	74
Figura 30: Gráficos de discrepâncias entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 10 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.....	76
Figura 31: Localização da Área 1, utilizada para levantamento da vegetação, e perfil gerado a partir da nuvem de pontos do LiDAR.	82
Figura 32: Histograma de alturas da Área 1 considerando o critério de inclusão de indivíduos com DAP ≥ 2,5 cm.....	84
Figura 33: Histograma de diâmetros da Área 1 considerando o critério de inclusão de	

indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.....	84
Figura 34: Perfil esquemático da vegetação de uma faixa de 20 por 10 m do início da parcela da Área 1.....	87
Figura 35: Localização da Área 2, utilizada para levantamento da vegetação e perfil gerado a partir da nuvem de pontos do LiDAR.....	89
Figura 36: Detalhes dos indivíduos amostrados na Área 2.....	90
Figura 37: Histograma de alturas da Área 2 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.....	91
Figura 38: Histograma de diâmetro da Área 2 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.....	92
Figura 39: Localização da Área 3, utilizada para o levantamento da vegetação e perfil gerado a partir da nuvem de pontos do LiDAR.....	94
Figura 40: Detalhe da parcela implantada na Área 3, em área destinada a recreação, sem a presença de sub-bosque.....	95
Figura 41: Histograma de alturas da Área 3 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.....	96
Figura 42: Histograma de diâmetro da Área 3 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.....	97
Figura 43: Altura do dossel a partir do Modelo Digital de Copas (MDC) com resolução de 1 m. As áreas mais escuras em tom de roxo representam clareiras enquanto que os tons de verde escuro representam as árvores mais altas.....	101
Figura 44: Distribuição dos pixels com altura maior que 26 m, na Área 2 (a) e maior que 25 m na Área 3 (b).....	103
Figura 45: Gráfico com a média de altura obtida pelo Modelo Digital de Copas (MDC) e dos dados de campo considerando os indivíduos com $DAP \geq 10$ cm.....	104
Figura 46: Distribuição de frequência de altura do Modelo Digital de Copas (MDC) com 1 m de resolução, derivado do LiDAR, para as três áreas de estudo.....	106
Figura 47: Modelo Digital de Copas do Setor “A” do PARNA da Tijuca, com detalhe para as linhas de transmissão, erroneamente classificadas como vegetação.....	108
Figura 48: Mapa de Cobertura de Copas com resolução de 1 m, desenvolvido a partir dos dados LiDAR.....	110
Figura 49: Modelo de Densidade Relativa da Vegetação das três áreas de estudo localizadas no Setor “A” do PARNA da Tijuca.....	114
Figura 50: Modelo Digital de Copas (a) da Área 3 onde são identificadas apenas as clareiras existentes na Área. O Modelo de Densidade Relativa da Vegetação (b) permite “enxergar” toda a área de recreação com ausência de sub-bosque, representado pelos pixels de valor 0 (zero), onde foi instalada a parcela.....	116
Figura 51: Modelo de Densidade Relativa da Vegetação (MDRV) elaborado a partir da nuvem de pontos LiDAR. Destaque para as estradas que cortam o Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.....	118

Figura 52: Número de retornos da nuvem de pontos LiDAR nas três áreas de estudo no Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.....	120
Figura 53: Número de retornos em cada um dos estratos analisados nas três áreas levantadas em campo.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros variáveis e resultado de largura de faixa de perfilamento e densidade de pontos supondo uma velocidade da aeronave de 230km/h. Fonte: www.lidar.com.br.....	10
Tabela 2: Parâmetros florestais que podem ser obtidos a partir de laser scanner aerotransportado (ALS). (Fonte: adaptado de Giongo et al., 2010).....	14
Tabela 3: Parâmetros do aerolevanteamento realizado pela empresa HANSA – Geofísica e Aerolevanteamento Ltda., para a Prefeitura do Rio de Janeiro, no Maciço da Tijuca.....	29
Tabela 4: Códigos e classificação dos retornos da nuvem de pontos do LiDAR num arquivo .las, segundo a orientação da ASPRS (<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>).....	31
Tabela 5: Características dos interpoladores disponíveis nos <i>softwares</i> ArcGis 10.3 e Fusion.....	33
Tabela 6: Limites estabelecidos pelo PEC. Adaptado de Barros et al (2013). OBS: O Erro Médio Quadrático (EMQ) deve ser entendido como Erro ou Desvio Padrão.....	37
Tabela 7: Propriedades dos arquivos .las do Setor “A”; em cinza o destaque para o arquivo que compõe a área do levantamento de campo e a média de cada uma das características analisadas.....	47
Tabela 8: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 0,4 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.....	64
Tabela 9: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 1 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.....	67
Tabela 10: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 2 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.....	70
Tabela 11: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 5 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.....	73
Tabela 12: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 10 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.....	75
Tabela 13: Síntese dos resultados da avaliação altimétrica de MDT gerados a partir da nuvem de pontos LiDAR.....	77

Tabela 14: Parâmetros fitossociológicos da Área 1 gerados pelo conjunto de programas FITOPAC 1.6 (SHEPHERD, 2006) considerando o critério de inclusão de $DAP \geq 2,5$ cm. A biomassa foi calculada de acordo com Burger e Deletti (2008).....	83
Tabela 15: Parâmetros fitossociológicos da Área 2 gerados pelo conjunto de programas FITOPAC 1.6 (SHEPPHERD, 2006) considerando o critério de inclusão de $DAP \geq 2,5$ cm. A biomassa foi calculada de acordo com Burger e Deletti (2008)....	90
Tabela 16: Parâmetros fitossociológicos da Área 3 gerados pelo conjunto de programas FITOPAC 1.6 (SHEPPHERD, 2006) considerando o critério de inclusão de $DAP \geq 2,5$ cm. A biomassa foi calculada de acordo com Burger e Deletti (2008)....	95
Tabela 17: Parâmetros estruturais de levantamentos fitossociológicos realizados em trechos de Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro.....	100
Tabela 18: Métricas derivadas do Modelo Digital de Copas (MDC) produzido a partir dos dados LiDAR e características do terreno nas três áreas amostradas.....	102
Tabela 19: Área ocupada (em hectares e %) por cada uma das classes de cobertura de copa determinadas a partir dos dados LiDAR.....	111
Tabela 20: Distribuição das classes de altura de copas de acordo com a orientação das encostas do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.....	111
Tabela 21: Distribuição das classes de altura de copas de acordo com a declividade do terreno do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.....	112
Tabela 22: Métricas extraídas da nuvem de pontos para as três parcelas amostradas, considerando os retornos acima de 1m.....	119

RESUMO

A Mata Atlântica (MA) é hoje, com exceção de poucas áreas contínuas, um mosaico de fragmentos isolados em uma matriz complexa de diferentes usos da terra. Muitos esforços vêm sendo feitos para mapear a extensão e distribuição geográficas dos remanescentes da MA. Entretanto, grande parte dos estudos envolve imagens de sensores óticos que, em geral, permitem uma análise espacial em duas dimensões. Por sua vez, o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) apresenta-se como uma tecnologia de Sensoriamento Remoto que permite uma análise espacial em três dimensões, permitindo estimar com alta acurácia a altura da vegetação, cobertura e estrutura do dossel. Esta Tese teve como objetivo explorar o potencial do uso de dados LiDAR nos estudos da vegetação em um trecho de MA localizado no Setor “A” do Parque nacional da Tijuca (PARNA da Tijuca). Os dados LiDAR compreenderam 25 arquivos num total de 270 milhões de pontos. O levantamento de dados da vegetação foi realizado ao longo de três parcelas de 20 x 50 m (Área 1, Área 1 e Área 3) implantadas ao longo do Setor “A”, onde foram amostrados todos os indivíduos vivos com diâmetro à altura do peito acima de 2,5 cm. A análise dos arquivos com a nuvem de pontos encontrou uma densidade média de 8,78 pontos/m². Foram gerados 20 modelos digitais do terreno (MDT) com cinco tamanhos de grid (0,4; 1; 2; 5 e 10 m), utilizando os *softwares* Fusion e ArcGis 10.3, através de métodos de interpolação que utilizam o modelo de grade regular e TIN. Os MDT foram avaliados, a partir de inferências estatísticas, considerando 165 pontos levantados com Estação Total ao longo de uma das áreas onde foi realizado o levantamento da vegetação. A acurácia variou de 0,59 m até 2,6 m, entre as especificações para as escalas 1:2.000 e 1:10.000, sendo que alguns modelos apresentaram tendência de sub e superestimação das alturas. As alturas máximas estimadas a partir de dados LiDAR ficaram próximas das encontradas em campo. Na Área 1 a altura máxima estimada pelo LiDAR foi de 30,4 m, enquanto que nas Áreas 2 e 3 estas alturas foram de 30,3 e 30,1 m. Já os valores estimados em campo foram de 32 m, 26 m e 25 m, para as Áreas 1, 2 e 3, respectivamente. De acordo com o Modelo Digital de Copas a maior parte do Setor do “A” do PARNA da Tijuca é representado por árvores com copas maiores que 20 m, em estágio sucessional avançado. O Modelo de Densidade Relativa da Vegetação permitiu identificar todas as áreas com ausência de sub-bosque, como as estradas que cortam o Setor “A” e as áreas destinadas à recreação. A avaliação das métricas da nuvem de pontos mostrou que a maior parte dos retornos fica retida no dossel, sendo importante uma alta densidade de pontos para que seja possível caracterizar a heterogeneidade espacial da floresta.

Palavras-chave: Escaneamento a laser, Modelo Digital de Terreno, estrutura da vegetação

ABSTRACT

The Atlantic Forest (AF) is nowadays, with the exception of few continuous areas, a mosaic of isolated fragments in a complex matrix of different land uses. Many efforts have been made to map the geographic extent and distribution of the remnants of AF. However, most of the studies involve images of optical sensors that, in general, allow a two-dimensional spatial analysis. On the other hand, the LiDAR (Light Detection and Ranging) is a Remote Sensing technology that allows a three dimensional spatial analysis, allowing to estimate with high accuracy the height of the vegetation, cover and structure of the canopy. The aim of this Thesis was to explore the potential of LiDAR data in vegetation studies in an AF stretch located in the Sector "A" of the Tijuca National Park. LiDAR data comprised 25 files totalling 270 million points. The vegetation data collection was carried out in three 20 x 50 m plots (Area 1, Area 2 and Area 3) implanted in the Sector "A", where all individuals with diameter at breast height greater than 2.5 cm were sampled. The analysis of the files with the point clouds found an average density of 8.78 points/m². Twenty digital terrain models (DTM) with five grid sizes (0.4; 1; 2; 5 and 10 m) were generated using Fusion and ArcGis 10.3 software's, and interpolation methods that use the regular grid model and TIN. The DTM were evaluated, based on statistical inferences, considering 165 points collected with Total Station along one of the areas where the vegetation survey was carried out. The accuracy varied between 0,59 m and 2,6 m between the specifications for 1:2000 and 1:10,000 scales, with some models showing a tendency for sub and overestimation of heights. The maximum heights estimated from LiDAR data were close to those found in the field. In Area 1 the maximum height estimated from LiDAR was 30,4 m, in Areas 2 and 3 those heights were 30,3 and 30,1 m. The estimated values in the fields were 32 m, 26 m and 25 m, for Areas 1, 2 e 3, respectively. According to the digital canopy model, most of the Sector "A" of the Tijuca National Park is represented by areas with canopies greater than 20 m, in advanced successional stages. The relative density model of the vegetation allowed to identify all areas with no understory, such as roads that cross Sector "A" and areas for recreation. The evaluation of the lidar metrics showed that most of the returns are retained in the canopy, being important a high density of points so that it is possible to characterize the spatial heterogeneity of the forest.

Key-Words: Laser Scanning, Digital Terrain Model, vegetation structure

1.Introdução

A pressão humana sobre as áreas florestais tem se tornado, a cada dia, mais intensa. Dentre as consequências desta pressão, está a fragmentação de áreas antes contínuas, alterando a estrutura da paisagem e resultando em mudanças na composição de diversidade das comunidades (METZGER, 1999). Um exemplo é o que vem acontecendo com a Mata Atlântica (MA)¹. Ocupando originalmente uma área de aproximadamente 1.110.182 km², hoje restam desta formação apenas cerca de 20%, na forma de remanescentes florestais (MMA, 2006).

A MA é hoje, com exceção de poucas áreas contínuas, um mosaico de fragmentos isolados em uma matriz complexa de diferentes coberturas e usos da terra. Estes fragmentos florestais diferem, em muitos aspectos, da floresta contínua da qual fizeram parte um dia. Além de serem menores e estarem isolados em diferentes graus, tendem a possuir características específicas. Por exemplo, alterações no microclima (temperatura, umidade e exposição ao vento) nas bordas do fragmento influenciam na composição e estrutura da vegetação. Porém, mesmo em pequenos fragmentos, a MA, assim como outros sistemas naturais, provê inúmeros serviços ecológicos como: (1) manutenção da qualidade do ar e controle da poluição através da regulação da composição dos gases atmosféricos; (2) controle da temperatura e regime de chuvas através do ciclo biogeoquímico do carbono e da vegetação; e (3) regulação do fluxo de águas superficiais e controle das enchentes, entre outros (TONHASCA JR., 2004).

Muitos esforços vêm sendo feitos ao longo das últimas décadas para mapear a extensão e distribuição geográfica dos remanescentes da MA (e.g. SOS MATA ATLÂNTICA, 2016; MMA, 2006). O uso de geotecnologias, ao permitirem uma visão integrada dos diferentes elementos envolvidos com a cobertura e o uso da terra, se tornam ferramentas importantes para questões ligadas à conservação e preservação das áreas fragmentadas. Entre estas tecnologias se destaca o Sensoriamento Remoto (SR) com o fornecimento periódico de imagens em diferentes resoluções, permitindo graus variados de detalhamento da área observada. O SR facilitou enormemente os avanços na modelagem, mapeamento e conhecimento dos ecossistemas.

Entretanto, grande parte dos estudos envolve imagens de sensores óticos passivos multiespectrais, como os da série Landsat (LEFSKY et al., 2002; BERGEN et al., 2009), que, em geral, permitem uma análise espacial em duas dimensões. Ao não considerarem a rugosidade do terreno, os mapas de cobertura e uso da terra, por exemplo, acabam por gerar

¹ A Mata Atlântica é considerada atualmente um dos mais ricos conjuntos de ecossistemas em termos de diversidade biológica do planeta. Abrangendo estados das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, esse bioma é composto de uma série de fitofisionomias, que propiciaram uma significativa diversidade ambiental e, como consequência, a evolução de um complexo biótico de natureza vegetal e animal altamente rico (MMA, 1998).

uma interpretação equivocada tanto da estrutura quanto da funcionalidade dos elementos da paisagem e da sua dinâmica, vindo a mascarar os resultados obtidos, principalmente em áreas de relevo acidentado (SOUZA et al., 2009). Laeta et al. (2016), ao analisarem o impacto do uso da área de superfície planimétrica e real no cálculo do índice de Reserva Legal, concluíram que o uso da área planimétrica pode implicar em análises imprecisas em estudos geoecológicos.

Por outro lado, acessar a estrutura vertical da floresta é particularmente difícil, principalmente em áreas remotas e em locais de maior complexidade topográfica (ZIMBLE et al., 2003). A floresta tropical é descrita como tendo uma estrutura fisionômica complexa que envolve organização vertical com diferenciação em estratos. O dossel, entendido como a camada mais ou menos contínua constituída pelas copas das árvores de maior altura, influencia as condições microclimáticas no interior da floresta, determinando diferenciações na quantidade e dinâmica diária de luz, temperatura e umidade relativa, constituindo um clima mais uniforme do que na exposição direta ao sol (RICHARDS, 1952). A heterogeneidade ambiental, determinada por elementos da própria comunidade vegetal, acaba criando habitats, e abre possibilidades para novos nichos. Se estabelecem, então, outras espécies vegetais que, junto com indivíduos jovens do dossel, constituem o sub-bosque. Vários pesquisadores apontam ou admitem a existência, nas florestas tropicais, de um (ou mais de um) estrato abaixo do dossel, de dimensão e composição diferenciadas das do dossel (RICHARDS, 1952; GENTRY e EMMONS, 1987; RHEINHARDT, 1992; PEIXOTO et al., 1995; LASKA, 1997).

Os métodos tradicionais para acessar a estrutura da floresta são inventários de campo ou interpretação de fotos aéreas. Uma das limitações dos inventários é não poder prover uma informação espacialmente contínua, ao longo de grandes áreas (LANG et al., 2006). Por sua vez, o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) apresenta-se como uma tecnologia de SR que permite uma análise espacial em três dimensões. Os sensores LiDAR têm a capacidade de penetrar em pequenas aberturas do dossel e alcançar o solo medindo diretamente a distribuição tridimensional das copas das árvores assim como a topografia abaixo destas, gerando mapas topográficos de alta resolução e uma estimativa de alta acurácia da altura da vegetação, cobertura e estrutura do dossel (LEFSKY et al., 2002).

Na última década, houve um aumento no número de pesquisas envolvendo topografia de alta resolução, mas somente com o advento do LiDAR foi possível se obter dados topográficos de alta resolução em amplas áreas (TAROLLI, 2014). Os Modelos Digitais de Elevação, estão subdivididos em Modelo Digital de Superfície (MDS – contém todas as feições da paisagem) e Modelos Digitais de Terreno (MDT – contém informações da superfície desnuda da Terra), e são um dos produtos mais comuns derivados do LiDAR. A capacidade de penetração dos pulsos

de laser pela cobertura florestal torna esta tecnologia melhor que a fotogrametria, em termos de acurácia, na geração de MDT em áreas florestadas (LIU, 2008).

A partir da subtração entre o MDS e o MDT, é possível estimar a altura das árvores. Entretanto, é preciso enfatizar que a extração de características da vegetação a partir de dados LiDAR é largamente influenciada por variáveis como a densidade de pontos, por exemplo, exigindo que os modelos produzidos sejam calibrados e validados através de dados de campo, para que as estimativas produzidas sejam acuradas. Isto se torna ainda mais desafiador em se tratando de ambientes tropicais em função da complexidade da estrutura florestal e da alta variabilidade espacial e temporal com relação à densidade da vegetação (LEITOLD et al., 2015a).

No Brasil, parte dos trabalhos que fazem uso desta tecnologia está relacionada ao manejo florestal (e.g. ZANDONÁ et al., 2008) e, principalmente, estimativas de biomassa acima do solo (e.g. d'OLIVEIRA et al., 2012) em ambientes amazônicos. São também encontrados trabalhos relativos a avaliação da qualidade dos modelos digitais gerados a partir da nuvem de pontos (e.g. BARROS et al., 2013), além dos métodos de filtragem da nuvem (e.g. BECKER e CENTENO, 2013), entre outros.

Poucos trabalhos foram desenvolvidos na MA, que tem, como uma de suas características, a ocorrência em ambientes com topografia acidentada num variado gradiente altitudinal. O trabalho de Leitold et al. (2015a) buscou estudar de que maneira diferentes densidades de pontos LiDAR afetam o resultado do MDT em área de floresta densa com topografia acidentada, e como estes resultados refletem na estimativa de biomassa. Este trabalho foi desenvolvido no Parque Estadual da Serra do Mar a partir de dados fornecidos pelo programa Paisagens Sustentáveis, uma parceria entre a EMBRAPA e a NASA. Estes mesmos dados foram utilizados por Conto et al. (2015) para determinar o perfil vertical de um trecho de MA no estado de São Paulo. Cruz et al. (2011) e Barros et al. (2013) avaliaram a qualidade dos MDT e MDS gerados a partir de dados LiDAR em trecho do município de São Sebastião, também no estado de São Paulo. Com estes mesmos dados, Santos et al. (2015) procuraram determinar os estágios sucessionais da vegetação, usando o parâmetro de altura, proposto pela Resolução N° 6 de 04 de Maio de 1994 (CONAMA, 1994), através da diferença entre o MDT e o MDS.

A Prefeitura do município do Rio de Janeiro, em 2012, realizou a compra de um aerolevante com LiDAR para toda a área do Maciço da Tijuca com uma densidade média de 10 pts/m². O objetivo deste levantamento era, além da restituição cadastral do município, possibilitar a utilização destes dados para análise de risco de deslizamentos nas encostas do Maciço. A partir destes dados, Barbosa (2015) desenvolveu trabalho em parte da Bacia do rio

Cachoeira, localizado no Maciço da Tijuca, avaliando os MDT gerados a partir deste escaneamento. Os resultados foram melhores na área urbana quando comparados à área com cobertura florestal, indicando que uma densa cobertura vegetal diminuía a quantidade de pontos que chegam no terreno, diminuindo a acurácia do modelo.

Neste sentido, esta Tese se propôs a explorar o potencial do uso dos dados LiDAR nos estudos da vegetação encontrada no Maciço da Tijuca, mais especificamente no Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca (PARNA da Tijuca). Apesar do Maciço ter sofrido remoção quase total de suas florestas, em função dos ciclos econômicos pretéritos (principalmente o plantio de café entre os séculos XVIII e XIX), a vegetação encontra-se, atualmente, em um estágio de regeneração avançado. Por outro lado, mesmo tendo sido alvo de estudos acerca da estrutura florestal, ainda carece de trabalhos que permitam explorar a estrutura vertical da floresta e sua relação com dados de SR.

Os objetivos específicos desta Tese são:

- [1] Analisar a acurácia de Modelos Digitais de Terreno (MDT) gerados a partir de diferentes interpoladores, em diferentes escalas, usando a nuvem de pontos do LiDAR, comparando-os com pontos levantados a partir de Estação Total², permitindo assim, investigar estatisticamente os erros encontrados;
- [2] Estimar a altura das árvores a partir da nuvem de pontos do LiDAR e comparar os resultados obtidos com o levantamento da vegetação realizado em três parcelas ao longo da área de estudo, em diferentes condições de topografia e orientação;
- [3] Investigar a relação entre métricas derivadas do LiDAR e a estrutura da vegetação, principalmente no que diz respeito ao estrato inferior da floresta, o sub-bosque.

A Tese está estruturada em: 1 – Introdução, que apresenta o tema a ser investigado e os objetivos específicos da pesquisa. 2- Revisão Bibliográfica, com a apresentação do estado da arte do tema abordado; 3- Materiais e Métodos, com a caracterização da área de estudo e a descrição da metodologia utilizada em cada fase da pesquisa; 4- Resultados e Discussões, com a apresentação dos resultados encontrados em cada uma das fases da pesquisa e respectivas discussões; 5 – Conclusões, onde também são apresentados os possíveis desdobramentos desta pesquisa; 6 – Referências Bibliográficas e, por fim, Anexos.

² Segundo Santos et al. (2016), a Estação Total é um equipamento eletrônico formado por um teodolito eletrônico, um distanciômetro eletrônico e um processador matemático associados em um só conjunto. A partir de informações medidas em campo, como ângulos e distâncias, é possível calcular as coordenadas (X,Y e Z) dos pontos examinados.

2. Revisão conceitual

Pode-se definir Sensoriamento Remoto (SR), de uma maneira ampla, como uma tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, sem que haja contato físico entre ele. A obtenção desta informação é feita através da captação de energia refletida ou emitida pelo alvo, por um sensor³ (FLORENZANO, 2000; NOVO, 2002).

Atualmente o uso de dados provenientes do SR tem se popularizado com a ampla utilização de imagens diversas, como no caso dos dados do *Google Earth*. Além da popularização da tecnologia o usuário tem também a sua disposição, uma variedade de sensores com distintas resoluções espaciais e temporais⁴, permitindo assim, inúmeras aplicações em diversas áreas do conhecimento, inclusive no estudo e caracterização da vegetação. Técnicas de SR podem atender desde a um profissional especializado em fisiologia vegetal, preocupado em quantificar taxas de absorção de radiação pela ação de pigmentos fotossintetizantes, a engenheiros agrônomos, que têm como interesse a previsão da produção de determinada cultura ou a estimativa de deflorestamento (PONZNI e SHIMABUKURO, 2007)

Se hoje em dia existem disponíveis inúmeros sensores com diferentes resoluções, como então selecionar qual sensor e imagens a serem utilizadas para os estudos da vegetação? Xie et al. (2008) num artigo de revisão sobre o tema argumentam que a escolha do melhor sensor a ser utilizados deve levar em consideração: (1) o objetivo do mapeamento; (2) o custo das imagens; (3) as condições climáticas e (4) questões técnicas relacionadas à interpretação das imagens. Se o objetivo do mapeamento inclui a identificação de espécies vegetais, há necessidade de utilização de imagens de alta resolução (e.g. DLUGOSZ et al., 2005). Por outro lado, imagens de alta resolução espacial, em geral, tem um custo muito elevado que pode limitar o tamanho da área a ser mapeada. Se o objetivo do mapeamento é o monitoramento regional da cobertura vegetal imagens de satélite gratuitas e de média resolução podem cumprir esse

3 Sensores são equipamentos que coletam energia proveniente do objeto, convertem-na em um sinal passível de ser registrado e apresentam-no em uma forma adequada para extração de informações. Dependendo das suas características, eles podem ser instalados em plataformas terrestres, aéreas ou orbitais (FLORENZANO, 2000). Os sensores podem ser classificados em função da fonte de energia, em sensores passivos – não possuem fonte própria de radiação – ou sensores ativos – possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética - como radares ou laser.

4 As imagens produzidas pelos sensores são caracterizadas quanto à: (1) **resolução espacial**, que está associada à capacidade do sensor em enxergar os objetos na superfície – corresponde à menor área do terreno que um sistema sensor é capaz de individualizar o alvo: quanto menor o objeto possível de ser visto, maior a resolução espacial; (2) **resolução temporal**, que é o intervalo de tempo que um satélite leva para voltar e recobrir a área de interesse; (3) **resolução espectral**, que está associada ao número de bandas espectrais de um sensor: quanto maior o número de bandas espectrais e menor a largura do intervalo, maior é a resolução espectral de um sensor; e (4) **resolução radiométrica**, que está associada à capacidade que um sensor tem em poder discriminar, numa área imageada, alvos com pequenas diferenças de radiação refletida e/ou emitida. Isto significa dizer que a resolução radiométrica está relacionada ao número de níveis digitais representando níveis de cinza. Quanto maior o número de níveis, maior e mais fina será a resolução radiométrica (CRÓSTA, 1992).

objetivo (e.g. KERR e OSTROVSKY, 2003).

As condições climáticas, como por exemplo a cobertura de nuvens, podem ser um problema quando o mapeamento exige mais de uma cena para compor a área de estudo, por sua abrangência ou necessidade de se compor séries temporais. Xie et al. (2008) argumentam inclusive, que a falta de dados consistentes e iguais (como o uso de diferentes sensores para mapeamento de uma determinada região) limita a produção de mapas de boa qualidade. Neste ponto cabe considerar que muitas vezes, em função da área mapeada que compreende regiões com características climáticas muito distintas, é muito difícil compor um mosaico de cenas da mesma data e, eventualmente, do mesmo sensor. Mas isso por si só, não inviabiliza a qualidade do mapeamento. Um exemplo é o mapeamento realizado na escala 1:250.000 dos remanescentes da cobertura vegetal nos biomas brasileiros pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2006) no âmbito do projeto PROBIO (Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Biodiversidade Brasileira), que só para o bioma Mata Atlântica precisou considerar imagens de 3 sensores diferentes em um intervalo superior a 5 anos. Por último, questões como a qualidade da imagem e necessidade de pré-processamento como correção atmosférica, também devem ser consideradas na escolha do sensor a ser utilizado.

Ferreira et al. (2008) ao apresentarem um artigo de revisão sobre a evolução e o estado da arte do SR da vegetação destaca duas importantes transformações espectrais: os índices de vegetação⁵ e os modelos de mistura espectral¹⁶. Os índices de vegetação podem ser aplicados na caracterização e quantificação de determinado parâmetro biofísico de culturas agrícolas (MOREIRA, 2001), como indicadores do crescimento e vigor da vegetação verde, e também no diagnóstico de vários parâmetros biofísicos como o índice de área foliar (IAF), biomassa, porcentagem de cobertura da terra, atividade fotossintética e produtividade (PONZONI, 2001). Também permitem análises multitemporais, correlação com parâmetros estruturais da vegetação, detecção de mudanças, suporte na prevenção e combate a incêndios florestais (ABREU e COUTINHO, 2014). Por sua vez, os modelos de mistura espectral são usados em trabalhos de mapeamento de remanescentes vegetais, monitoramento da vegetação,

5 Os índices de vegetação são resultados de transformações lineares da reflectância obtidas em duas ou mais bandas do espectro eletromagnético, através da soma, razão, diferença, ou de qualquer outra combinação entre bandas (WIEGAND et al., 1991). Entre os índices de vegetação existentes o mais utilizado é NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* ou Índice de Vegetação Normalizada) definido como a diferença entre a reflectância do canal infravermelho próximo e do vermelho, dividido pela sua soma.

6 Os pixels de uma imagem de satélite tendem a apresentar uma mistura espectral, resultado de uma combinação da reflectância dos alvos naturais ou artificiais contidos neste (dois ou mais alvos). Normalmente, um pixel apresenta uma mistura de coberturas naturais, em menor ou maior proporção, de componentes de cobertura vegetal, solo e água (ou sombra, para alguns casos). O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) visa isolar a contribuição espectral de cada alvo presente no pixel, permitindo que uma imagem de satélite seja analisada numa escala sub-pixel. (FERREIRA et al., 2008)

acompanhamento de mudanças climáticas globais, monitoramento de queimadas e desmatamento na Amazônia e auxílio na produção de culturas agrícolas (FERREIRA et al., 2008).

A utilização de dados de SR relacionados à classificação da vegetação é ampla e uma das áreas que mais tem se beneficiado desta técnica é a Ecologia da Paisagem (YOUNG et al., 1993; GROOM et al., 2006). A avaliação dos arranjos e da estrutura dos ecossistemas que compõem a paisagem é realizada baseando-se em informações ambientais espacialmente distribuídas, que são necessariamente adquiridas em variadas escalas espaciais e ambientais (SILVA, 2004). Sensores como os do Landsat e MODIS são capazes de determinar a estrutura horizontal da paisagem, mas não conseguem prover informações da estrutura vertical da vegetação que compõem essa paisagem. Por outro lado, sensores ativos como o LiDAR conseguem quantificar as dimensões verticais e volumétricas da vegetação permitindo estimar a sua estrutura 3D em larga escala com implicações diretas para estudos relacionados à biodiversidade e habitat (LEFSKY et al., 2002; BERGEN et al., 2009).

2.1. O Sistema LiDAR

O LiDAR é uma tecnologia óptica de SR cujo princípio se baseia na emissão e recepção de um feixe de laser de uma plataforma (aérea, terrestre ou orbital) até a superfície terrestre. Ao encontrarem a superfície, esses feixes são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e são captados pelo sensor, sendo possível calcular a distância entre o sensor e o alvo situado na superfície terrestre.

O laser óptico começou a ser utilizado no SR na década de 60. Inicialmente era utilizado em plataformas espaciais para monitoramento atmosférico e oceanográfico (GIONGO et al., 2010). O mapeamento da superfície terrestre com o LiDAR (em plataformas aéreas) começou a ser realizado na década de 70, mas os primeiros sistemas operavam no modo *profile*, ou de perfil (Figura 1). Neste modo, as medidas são coletadas abaixo da aeronave e é possível obter apenas um perfil do terreno e das estruturas verticais existentes. A partir dos anos 90, os sensores tipo *profile* foram substituídos pelos *scanners* (ZANDONÁ, 2006).

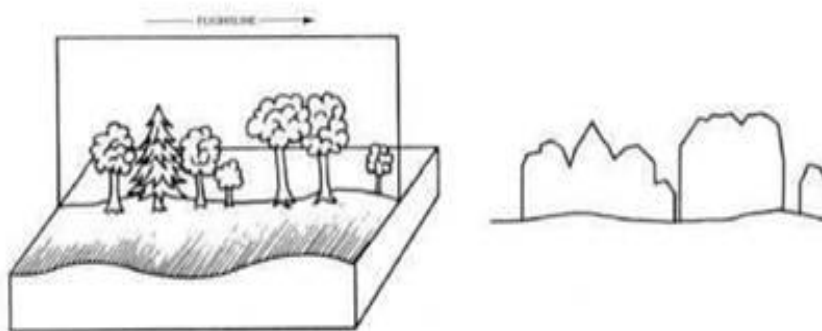


Figura 1: Sistema a laser operado no modo perfil. Fonte: Zandoná (2006).

Os instrumentos LiDAR do tipo *scanner* consistem de um sistema de controle e um transmissor e receptor (Figura 2). Em se tratando de um instrumento localizado numa plataforma em uma aeronave, conforme ela se move ao longo da linha de voo, pulsos de laser são direcionados ao terreno por um espelho com varredura perpendicular à trajetória (JENSEN, 2009).

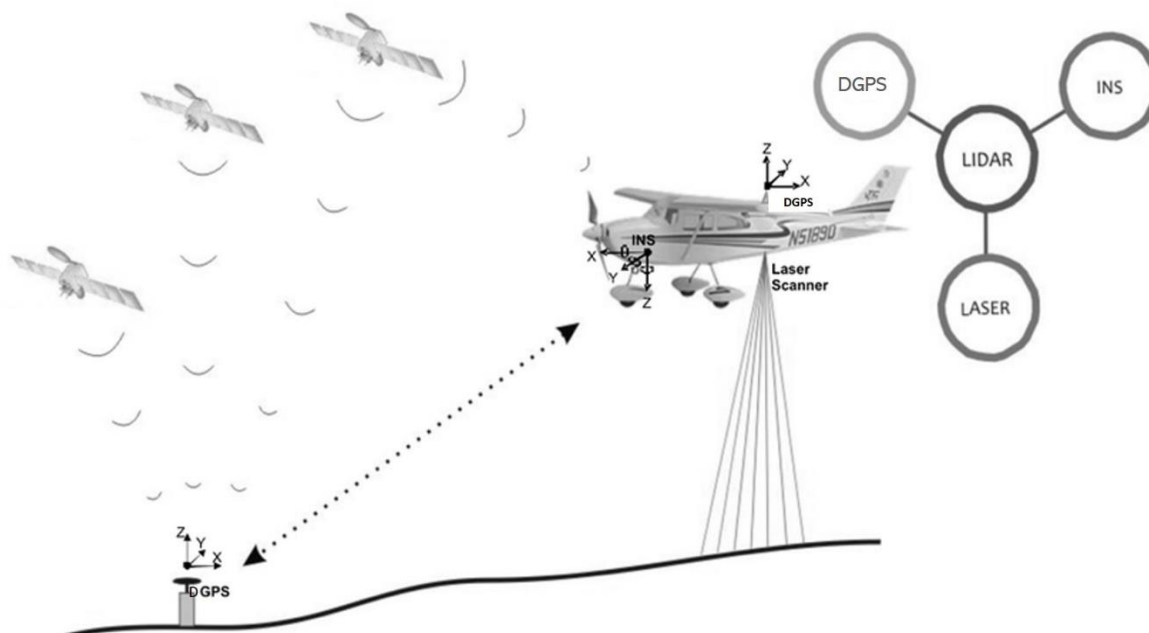


Figura 2: Componentes do sistema LiDAR tipo scanner. O DGPS e o INS (*Inertial Navigation System*) documentam a localização exata e os movimentos da aeronave nos instantes em que o pulso do laser é enviado e recebido. Em terra é necessária uma estação base de DGPS que trabalhe de forma conjunta ao DGPS instalado na plataforma. Fonte: adaptado de Giongo et al. (2010).

A determinação dos diferentes tipos de varredura é dada pela configuração do espelho de varredura (Figura 3). Por exemplo, espelhos oscilantes produzem varredura em forma de “zigue-zague” já espelhos de polígono de rotação produzem uma varredura em forma de linhas paralelas (GIONGO et al., 2010).

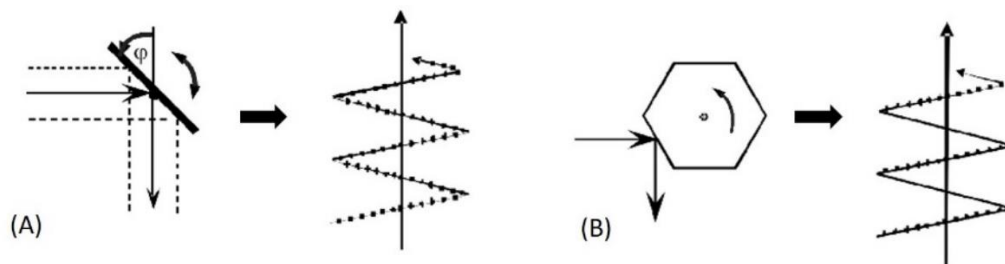


Figura 3: Espelhos de varredura e seus respectivos padrões. Em (A) o espelho oscilante e em (B) o polígono rotatório. (Fonte: adaptado de Giongo et al., 2010 e Wehr e Lohr, 1999).

Existem dois grandes grupos de sensores tipo *scanner* (Figura 4): (1) sistemas de pulsos, que emitem um feixe de diâmetro (*footprint*) centimétrico e armazenam a posição de casa pulso laser retornado – os primeiros sistemas registravam apenas o primeiro e último retornos, sendo que atualmente já é possível determinar o retorno de pulsos intermediários; e (2) sistemas de ondas contínuas, que emitem um feixe de grande diâmetro e é possível registrar integralmente todo o sinal do pulso (LIM et al., 2003).

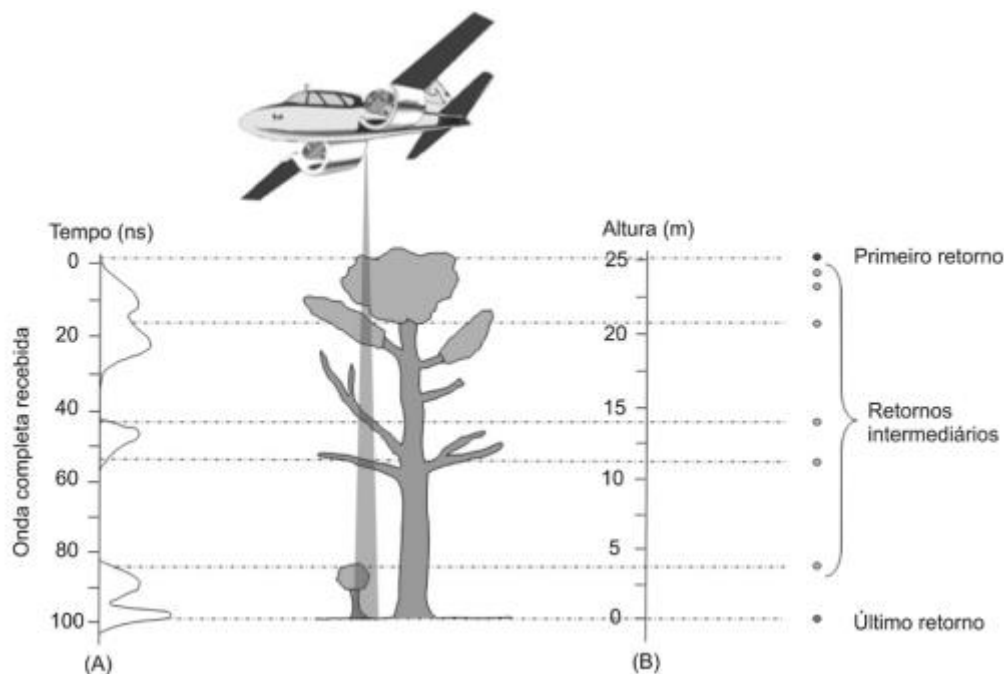


Figura 4: Representação do sistema de ondas contínuas (A) e sistema de pulsos (B). O primeiro retorno é identificado como o objeto mais alto do terreno enquanto que o último é referente ao solo. Os retornos intermediários permitem extrair informações da vegetação ou objetos que estejam sob a floresta, por exemplo. Fonte: (GIONGO et al., 2010).

No caso do sistema de pulsos, como resultado do processo de medição das distâncias é gerado um conjunto de pontos com dados de elevação (nuvem de pontos), distribuídos sistematicamente no tempo, ao longo da linha de voo. Além das coordenadas planialtimétricas,

o sistema também armazena o valor de reflectância dos materiais. A partir dessas informações, é possível gerar ortomagens de intensidade e hipsometria (GATZIOLIS e ANDERSEN, 2008) como apresentado na Figura 5

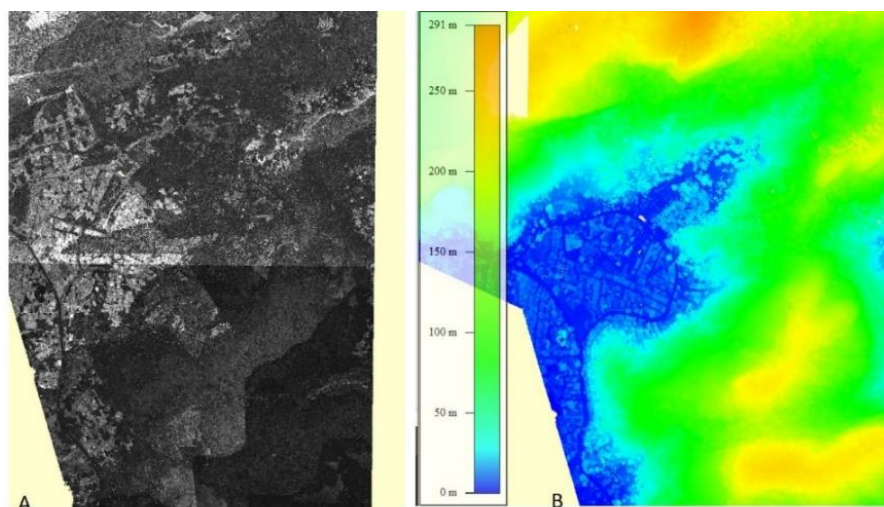


Figura 5: Exemplo de uma imagem elaborada a partir da intensidade dos retornos (A) e dos valores de elevação (B) de uma nuvem de pontos LiDAR. Fonte: própria autora.

Para a obtenção de um produto de qualidade, deve-se levar em conta: o ângulo e a frequência de perfilamento, combinados com a altura de voo e a velocidade da aeronave. Estes dados estão diretamente relacionados com a resolução espacial do produto gerado. De acordo com a Tabela 1 as diferentes altitudes de voo geram frequências e larguras do feixe de perfilamento distintas que terão consequência no espaçamento e na densidade de pontos por m^2 .

Tabela 1: Parâmetros variáveis e resultado de largura de faixa de perfilamento e densidade de pontos supondo uma velocidade da aeronave de 230km/h. Fonte: www.lidar.com.br

Altura	500 m	1.000 m	2.000 m
Frequência perfilamento	29 Hz	27 Hz	19 Hz
Largura de feixe de perfilamento	360 m	720 m	1440 m
Espaçamento de pontos – Eixo X	1,11 m	1,19 m	1,69 m
Espaçamento dos pontos – Eixo Y	0,63 m	1,18 m	1,66 m
Ponto / m^2	1,14 pts	0,7 pts	0,4 pts

Quando um feixe de laser se propaga no espaço, apresenta uma divergência que resulta no diâmetro do ponto projetado na superfície (*footprint*) (Figura 6). Essa área de cobertura equivale à resolução espacial da imagem LiDAR (OLIVEIRA, 2011). Quanto menor o *footprint*, maior a densidade de pontos do levantamento.

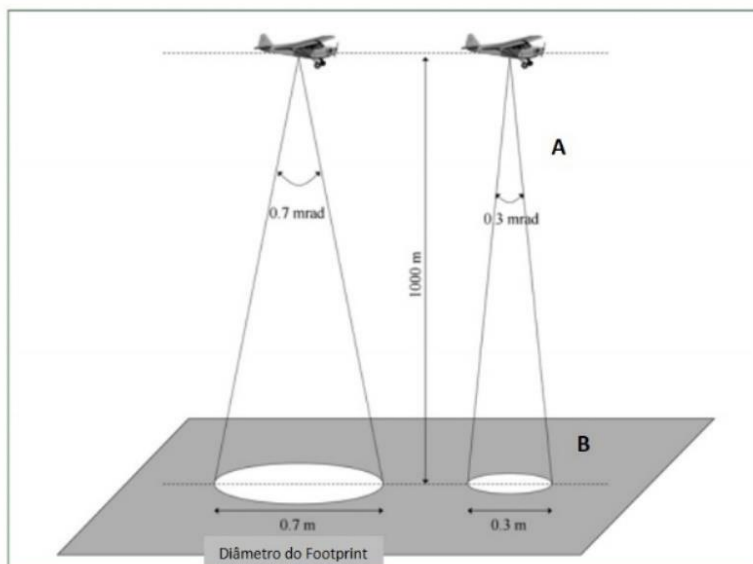


Figura 6: (A) Ângulo de escaneamento e (B) Footprint. Fonte: adaptado de Gatzolis e Andersen (2008).

Se por um lado uma alta resolução permite melhor obtenção de dados da superfície terrestre, isto é feito à custa de um grande conjunto de dados e a um tempo de processamento mais lento. Atualmente existem sistemas capazes de gerar 20 pulsos/m². Em termos de planimetria, para alturas de voo de 700 a 1000 metros, é possível uma precisão de 50 cm e na ordem de 10 a 15 cm em altimetria, dependendo do *software* e do *hardware* do equipamento (CHOMA et al. 2005; CENTENO e MITSHITA, 2007).

2.2. Aplicações do LiDAR

São inúmeras as áreas de aplicação utilizando dados provenientes do LiDAR. Dentre estas aplicações podem ser citados a utilização no planejamento costeiro, avaliação de risco de inundações, telecomunicações e redes de transmissão de energia, florestas, agricultura, petróleo, transporte, planejamento urbano, arqueologia e mineração, entre outros. A utilização deste sistema em diferentes áreas se deve principalmente às vantagens da utilização desse sistema na captura de informações tridimensionais da superfície terrestre (GIONGO et al., 2010).

Entre os produtos mais comuns derivados do LiDAR estão aqueles que representam a superfície física do terreno e as elevações presentes nesta superfície em forma digital (BECKER e CENTENO, 2013) denominados Modelos Digitais de Elevação (MDE), subdivididos em MDS, quando contém informações de todas as feições da paisagem, e MDT quando contém informações de elevação da superfície desnuda da Terra (Figura 7).

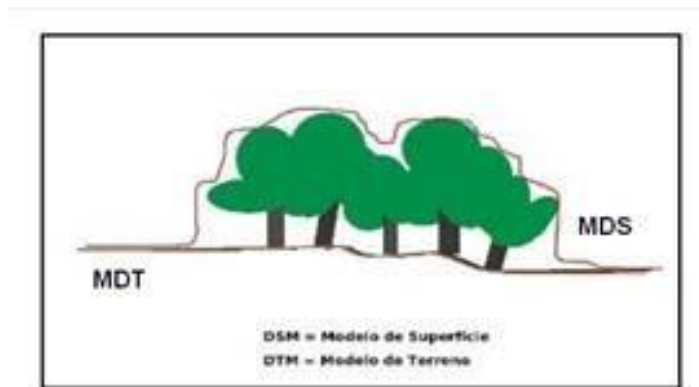


Figura 7: Representação do Modelo Digital de Terreno (MDT) e do Modelo Digital de Superfície (MDS). Fonte: Santos et al. (2015).

Para Liu (2008), o LiDAR é uma das tecnologias mais eficazes e confiáveis de coleta de dados do terreno. Métodos tradicionais como levantamentos de campo e fotogrametria podem prover dados de alta acurácia em termos de dados de terreno, mas consomem muito tempo no campo e no laboratório, tornando os custos destes levantamentos muito altos além da dificuldade de utilização desses métodos em áreas de floresta densa e de difícil acesso. Comparado com a fotogrametria (um dos maiores competidores em termos de acurácia da tecnologia LiDAR), em função da capacidade de penetração no dossel do laser, a geração de MDT pelo LiDAR supera as limitações da fotogrametria na geração de MDT em áreas florestadas, mesmo com a necessidade da edição da classificação ou filtragem da nuvem de pontos. No entanto, segundo a autora mencionada, o processamento eficaz dos dados LiDAR brutos e a geração de um MDT de alta qualidade ainda é um grande desafio, sendo a classificação da nuvem de pontos uma das etapas mais difíceis e críticas do processo. A autora finaliza sua discussão chamando atenção, em função das características específicas dos dados LiDAR, dos desafios para geração de um MDT de qualidade. Entre esses desafios estão a escolha dos algoritmos de interpolação, tamanho do grid e redução dos dados para um processamento mais rápido.

Nesta linha de pesquisa, Becker e Centeno (2013) avaliam e discutem os resultados obtidos por três métodos de filtragem para geração de modelo digital de elevação e em que situações se recomenda a utilização desses métodos. Os métodos de filtragem são aplicados para eliminar os pontos que atingem outros objetos e não o terreno e, segundo os autores, apesar de serem amplamente aceitos, esses métodos podem modificar a superfície do terreno modelado, sendo importante a escolha do método mais adequado para garantir uma melhor qualidade do modelo.

Ao avaliar a qualidade da informação altimétrica derivada do LiDAR em uma área coberta

por vegetação, Schimallesky e Centeno (2008) detectaram que a presença de árvores formando um sub-bosque reduziu fortemente a taxa de penetração do pulso laser em nível do terreno. Ou seja, a densidade da camada de vegetação interfere na taxa de penetração do laser em áreas de floresta, pois a presença do sub-bosque, em função da baixa densidade de pontos incidentes no terreno e da distribuição irregular desses pontos, introduziu erros no processo de interpolação do MDT.

Ao prover informação horizontal e vertical com alta resolução espacial e acurácia vertical, o LiDAR tem também demonstrado, enorme potencial para pesquisas ecológicas que incluem a identificação de habitats ao medir a organização da vegetação no espaço, assim como pesquisas de manejo florestal (LIM et al., 2003; BERGEN et al., 2009). O acesso à natureza vertical dos ecossistemas florestais oferece oportunidade para melhorar o gerenciamento e planejamento florestal, além da geração direta da altura do dossel permitir estimar a biomassa acima do solo (LIM et al., 2003).

Para Drake et al. (2002), a estimativa de atributos florestais, como biomassa acima do solo (AGB – *aboveground biomass*), é um passo importante para identificar a quantidade de carbono estocado nas florestas e é central para estudos do ciclo global do carbono. Em trabalho desenvolvido numa floresta tropical úmida na Costa Rica, os autores concluíram que o laser LVIS (*Laser Vegetation Imaging Sensor*), um laser scanner com um *footprint* de grande diâmetro, permitiu reconhecer características estruturais da floresta dentro de um espectro variado de cobertura da terra, que incluía desde pasto até florestas secundária e primária. Brodeau et al. (2008) utilizaram, além dos dados LiDAR, dados do sensor passivo Landsat ETM+ e de outro sensor ativo, o do SRTM, para calcular a biomassa acima do solo em Québec, Canadá. A fusão de dois ou mais sensores tem mostrado bons resultados nos estudos ambientais e parece ser uma opção interessante, permitindo que o usuário complemente diferentes contribuições, explorando os melhores produtos de cada um dos sensores.

Richardson e Moskal (2011) desenvolveram um método para estimar a densidade e configuração de árvores para quatro classes de altura, através de dados LiDAR aerotransportado, em florestas do semiárido americano. Para desenvolver esse método, foi feita uma avaliação rigorosa através da coleta de dados de campo. Em três áreas, foram instaladas parcelas georreferenciadas e todos os indivíduos com mais de 5 m de altura foram identificados e tiveram o DAP (diâmetro a altura do peito) e altura medidos. Também foram utilizados dois sobrevoos com LiDAR diferentes cuja densidade de pulsos variou de pelo menos 4 a 8 pulsos/m². O método criado produziu resultados satisfatórios para árvores maiores que 20 m, mas subestimou as árvores menores que 20 m. Segundo os autores, tal fato representa uma limitação da

tecnologia, pois o laser não conseguiu penetrar no sub-bosque. Os múltiplos retornos poderiam minimizar esse fato, mas em muitos casos as aberturas no dossel ainda são muito pequenas para permitir que o segundo ou terceiro retorno chegue a ser refletido. Quando as clareiras ocorrem elas não são regulares, impedindo que os pontos que chegam no sub-bosque sejam bem distribuídos. Isso se reflete na impossibilidade de reconstruir a estrutura do sub-bosque. Uma alternativa seria coletar dados com um *footprint* menor aumentando a densidade de pontos, mas em termos de custo isso é um complicador, além do desafio de gerar um aumento de dados a serem processados e manipulados.

Giongo et al. (2010) apresentam uma tabela, reproduzida abaixo, com contribuições potenciais da tecnologia LiDAR na área florestal (Tabela 2). Nesta tabela, é possível perceber a variedade de parâmetros florestais que podem ser estimados direta ou indiretamente através da utilização desta tecnologia.

Tabela 2: Parâmetros florestais que podem ser obtidos a partir de laser scanner aerotransportado (ALS). (Fonte: adaptado de Giongo et al., 2010).

Parâmetros florestais	Forma de obtenção de dados ALS
Altura do Dossel	Medida direta
Diâmetro da copa	Medida direta
Número de indivíduos	Medida direta
Volume	Modelagem
Biomassa	Modelagem
Carbono	Modelagem
Área Basal	Modelagem
Diâmetro à altura do peito (DAP)	Modelagem
Material combustível aéreo	Modelagem
Cobertura de copa	Fusão com outros sensores
Identificação de espécies	Fusão com outros sensores

É importante destacar que a qualidade das estimativas das alturas obtidas por dados de varredura a laser está diretamente relacionada à qualidade dos modelos utilizados (MDT e MDS). Neste sentido, em áreas florestais é necessária uma cobertura adequada dos pulsos de laser, para que os mesmos possam penetrar na vegetação, através de espaços existentes entre as folhas e os galhos, chegando justamente à superfície do terreno para garantir um MDT de qualidade. A extração das alturas das árvores é obtida a partir de um processo matemático matricial simples, consistindo na subtração do MDS pelo MDT e denominado de modelo digital de vegetação normalizado (MDVn) (GIONGO et al., 2010). Segundo apresentado na revisão

de Giongo et al. (op. cit.) alguns estudos mostram que as alturas obtidas podem ser subestimadas (e.g. ANDERSEN et al., 2006) em função de fatores como densidade e cobertura dos pulsos de laser e densidade e altura da vegetação do sub-bosque. Clark et al. (2004) ao analisarem a acurácia do MDT gerado por LiDAR em uma floresta densa na Costa Rica encontraram um erro 0,67 m maior em áreas de florestas mais antigas quando comparados com áreas de declives planos, indicando a influência do sub-bosque na qualidade do MDT.

A acurácia na obtenção da altura do dossel é fundamental para estimativas de parâmetros como biomassa e carbono. Leitold et al. (2015a) ao compararem os MDTs gerados com diferentes densidades de pontos/m² de um aerolevante a laser na região da Serra do Mar concluíram que a altura do dossel calculada com dados de menor densidade diminuiu em função da acurácia do MDT, implicando em erros de 80-125 Mgha⁻¹ em prever a biomassa acima do solo.

Através de dados LiDAR também é possível identificar e medir individualmente parâmetros das árvores que compõem o dossel (e.g. VEGÁ e DURRIEU, 2011; VAUHKONEN et al., 2012;) e mapear e quantificar o material combustível florestal (e.g. ANDERSEN et al., 2005; SKOWRONSKI et al., 2011). No que diz respeito ao mapeamento de material florestal combustível, a tecnologia LiDAR permite, através do MDT indicar com precisão a localização dos cursos d'água, auxiliando no planejamento para a redução de incêndio assim como as próprias atividades relacionadas ao combate (GIONGO et al., 2010).

Outra metodologia utilizada por usuários do laser aerotransportado, é a utilização de dados provenientes de sensores passivos e de dados LiDAR permitindo a identificação de espécies vegetais e caracterização da estrutura floresta (e.g. LANG et al., 2006). Alguns sistemas ALS (*Airbone Laser Scanning*) operam de forma integrada sendo possível coletar dados do sensor laser e gerar ortofotos (GIONGO et al., 2010).

Castillo-Nunez et al. (2011) examinaram a capacidade de um LiDAR com sistema de ondas em detectar a localização de fragmentos formados por árvores cujas sementes são dispersas pelo vento e árvores cujas sementes são dispersas por animais, numa floresta tropical secundária na Costa Rica. Em função dos resultados obtidos foi possível demonstrar que os processos que controlam os processos de regeneração naquela floresta podem ser identificados com sucesso através de dados LiDAR.

2.3. Aplicações da tecnologia LiDAR no Brasil

No Brasil a tecnologia LiDAR só começou a ser utilizada nos anos 2000 (ZANDONÁ, 2006) e um pequeno panorama das principais utilizações desta tecnologia no país é apresentado por Giongo et al. (2010). Cabe lembrar que os trabalhos citados pelos autores dizem respeito ao *laser scanner*. Entre os trabalhos citados aparecem aplicações em áreas urbanas, classificação de linhas de transmissão, mapeamento de dutos e aplicações na área florestal. Outra aplicação bastante comum é a geração de MDT através de dados LiDAR usando diferentes métodos de filtragem da nuvem de pontos (e.g. PACHECO et al., 2011) assim como a avaliação de diferentes interpoladores (e.g. SANTOS et al., 2017).

Um exemplo de aplicação do LiDAR na área florestal é o trabalho de Zandoná et al. (2005) realizado num fragmento de floresta ombrófila mista, no estado do Paraná. Como em áreas de cobertura vegetal densa há uma redução do número de retornos provenientes da superfície do terreno, o objetivo dos autores era justamente, avaliar a precisão altimétrica do mapeamento digital a laser. A área de estudo possui uma elevação que varia de 883 a 922 m e o levantamento a laser gerou uma densidade, em média, de 5 pontos/m². Esses dados foram classificados e divididos em MDT e MDS. Para fins de comparação foi gerado um modelo de terreno topográfico, realizado a partir de 16 pontos de apoio, sendo os dois primeiros e dois últimos correspondentes a pontos de apoio GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), e para o transporte de coordenadas para o interior da floresta foi utilizada a metodologia da poligonal enquadrada⁷.

Após a comparação estatística dos modelos, os autores concluíram que os resultados obtidos foram satisfatórios no que diz respeito à facilidade e precisão em se gerar informações a respeito da topografia do terreno em áreas de cobertura vegetal densa. Entretanto, uma das dificuldades encontradas foi a determinação em campo do que seriam pontos de terreno, em função da quantidade de serapilheira e vegetação rasteira encontrada na área. Outro ponto abordado pelos autores, de grande importância, é o processo de classificação da nuvem de pontos. Nesta etapa os pontos são classificados através de determinados algoritmos e a acurácia do MDT vai ser fortemente influenciada por esse processo e pelo percentual de pontos que atingem o terreno.

⁷ Uma das técnicas de levantamento topográfico é a poligonal. Uma poligonal consiste numa série de linhas consecutivas onde se conhece os comprimentos e direções obtidos em medições de campo. Para o levantamento de uma poligonal utiliza-se o método de caminhamento onde se percorre o contorno de um itinerário definido por uma série de pontos e mede-se todos os ângulos, lados e orientação inicial permitindo assim, calcular as coordenadas de todos os pontos que formam esta poligonal. Na poligonal enquadrada parte-se de dois pontos de coordenadas conhecidas e o levantamento termina também em dois pontos de coordenadas conhecidas (VEIGA et al., 20077).

Isso também significa dizer que quanto maior a densidade de pontos por m^2 , maior a chance de alguns pontos atingirem o terreno, mesmo em área de cobertura vegetal mais densa. Por outro lado, um maior número de pontos por m^2 implica num custo maior e numa maior quantidade de dados a ser processada e isso deve ser levado em consideração em função dos objetivos propostos.

Pinagé et al. (2015) utilizaram tecnologia LiDAR para avaliar temporalmente os efeitos da exploração de madeira na estrutura da floresta. Foram analisadas as diferenças na estrutura do dossel (através da identificação de clareiras) e na densidade do sub-bosque em áreas exploradas entre os anos de 2007 e 2010, e em áreas de floresta intacta no estado do Pará. Segundo os autores, apesar do alto custo, a metodologia testada permite um acompanhamento da execução de um plano de manejo florestal, podendo ser aplicada de forma amostral para o monitoramento da exploração madeireira, bem como para avaliar as taxas de regeneração da floresta após os ciclos de exploração.

Outro exemplo de trabalho desenvolvido com tecnologia LiDAR foi o de Sato et al. (2005). O objetivo do trabalho foi analisar a relação dos dados de altura extraídos do LiDAR e os dados de biomassa florestal acima do solo (*Above ground biomass* – AGB) em três áreas no sudoeste da Amazônia Brasileira. Para extrair a altura do dossel, os dados foram processados no software *Fusion* que subtrai o MDT do MDS para obter a altura. Para os dados de campos foram estabelecidas parcelas nas áreas de estudos que tiveram suas coordenadas geográficas levantadas através de GNSS. Em cada uma das parcelas de 50x50 m foram alocadas subparcelas de 10x50 m. Nas subparcelas foram medidos os DAP (Diâmetro Altura do Peito) e altura total de indivíduos com $DAP \geq 10$ cm e no restante da parcela foram medidas a altura e DAP dos indivíduos com $DAP \geq 35$ cm. Para o cálculo da AGB foi utilizada a equação proposta por Brown (1998) que considera o DAP e a altura.

Os resultados mostraram que a relação entre o AGB da parcela e a altura média do LIDAR apresentou correlação significativa, demonstrando que as medidas de altura obtidas a partir dos dados LiDAR apresentam uma relação linear com a AGB florestal (Figura 8).

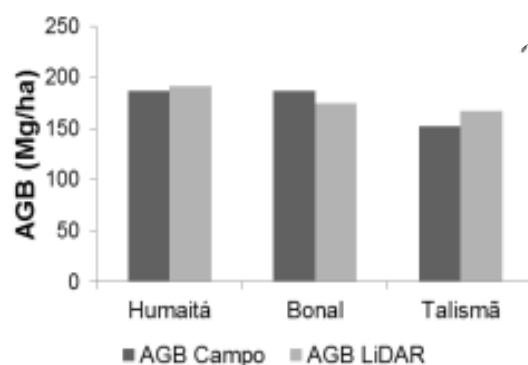


Figura 8: Distribuição média da biomassa acima do solo (AGB) obtida a partir de dados do campo e de dados do LiDAR nas três áreas de estudo. Fonte: Sato et al. (2015).

Estudos que buscam estimar a biomassa florestal através de dados LiDAR tem se mostrado bastante frequentes, principalmente na Amazônia (e.g. d'OLIVEIRA et al., 2012). Mais recentemente Feng et al. (2017) realizaram uma análise comparativa utilizando dados do RapidEye e LiDAR para estimar a biomassa em uma floresta na Amazônia. Os autores concluíram que, de maneira geral, dados do RapidEye não são bons preditores de biomassa e que os dados do LiDAR provem estimativas mais estáveis e melhores. Quando se testou a combinação dos dados provenientes dos dois sensores, não houve uma melhora nos resultados encontrados, se comparados àqueles encontrados com os dados LiDAR.

Leitold et al. (2018) utilizaram dados multitemporais de LiDAR associados a medidas de campo para estimar padrões de mudanças na cobertura do dossel relacionados a perda de carbono em florestas intactas e fragmentadas na Amazônia central brasileira. Os resultados apontaram para um aumento de 65% nas taxas médias anuais referentes as mudanças na cobertura do dossel, durante o período de seca, em decorrência do El Niño, nas florestas intactas e também nas fragmentadas. Os autores também destacaram a capacidade dos dados LiDAR em captar as dinâmicas nas mudanças na cobertura do dossel, quando considerada a escala da paisagem. Mas enfatizam a importância da combinação dos dados de campo com estes dados, para garantir melhores resultados.

Além da Amazônia, dados LiDAR também foram utilizados em área de Mata Atlântica no sudeste brasileiro também para estudos relacionados à estimativa de biomassa. Como exemplo podemos citar o trabalho de Leitold et al. (2015b) desenvolvido no Parque Estadual da Serra do Mar, no estado de São Paulo, numa área de aproximadamente 1.000 ha, com um gradiente de elevação que variava de 0-1.200 m. O objetivo dos autores era descrever a variação da estrutura do dossel e das clareiras na escala da paisagem usando dados LiDAR e dados de AGB

provenientes de inventário florestal. Os dados LiDAR foram associados a cada uma das parcelas permanentes e para garantir a precisão necessária foram utilizados receptores GNSS. Foi possível concluir que: (1) as nove parcelas do inventário florestal não representaram fielmente a variabilidade de altura do dossel, fração de clareiras e AGB na escala da paisagem, falhando principalmente na captura dos extremos dessa distribuição; (2) é importante realizar o sobrevoo do LiDAR primeiro para depois escolher as amostras de campo pode melhorar a integração dos dados LiDAR com as observações de campo; (3) a média de altura do dossel foi um bom dado para estimar a AGB nas parcelas permanentes; (4) os dados LiDAR refletem a memória de perturbações florestais recentes e (5) estudos futuros com dados LiDAR multi-temporais permitirão examinar a dinâmica das clareiras e mudanças nas alturas do dossel, permitindo elucidar os processos de ganho de biomassa através de crescimento e recrutamento. Este trabalho nos apresenta grandes possibilidades de pesquisa nesta área do conhecimento. Se for levado em consideração o esforço de campo, em termos de custo e tempo, neste trabalho é possível perceber como o uso de técnicas de SR pode otimizar esse esforço. Da mesma maneira, é enfatizada a necessidade de dados de campo para validar o trabalho.

Becknell et al. (2018) utilizaram dados LiDAR para medir a altura das copas e estimar a biomassa acima do solo em 4.529 ha de floresta Atlântica secundária no sul da Bahia. Para gerar as equações alométricas foram utilizados dados de 30 parcelas georreferenciadas, de 0,25 ha cada. Foi desenvolvido um modelo estatístico que relacionou o percentil 95 da distribuição dos retornos de altura do LiDAR com a densidade de biomassa para que esta pudesse ser estimada para toda área do levantamento.

Outros estudos também demonstraram excelentes resultados da utilização da tecnologia LiDAR na estimativa de variáveis dendométricas (ZANDONÁ et al., 2008), em atividades de inventário florestal (RODRIGUEZ et al., 2010), na elaboração de cartas necessárias ao planejamento florestal (MACEDO et al., 2003) e para caracterização do estado de conservação de florestas tropicais (e.g. SANTOS et al., 2015).

Como apresentado ao longo do texto, a tecnologia LiDAR tem aparecido como uma excelente ferramenta para estudar a vegetação através de SR. Com possibilidades que incluem desde a identificação de espécies vegetais até o monitoramento da estrutura horizontal e vertical da floresta, o LiDAR tem atraído pesquisadores na área de manejo florestal e na área ambiental como um todo, com destaque para os estudos ecológicos. O aumento no número de trabalhos que utilizam tecnologia LiDAR se dá principalmente, em função das vantagens que esse sistema possui de capturar informações tridimensionais da superfície da terra, e, especial, em áreas complexas (GIONGO et al., 2010). A fusão de dados espectrais de sensores passivos com dados

LiDAR permite extrair os melhores produtos de cada um dos sensores aumentando ainda mais a acurácia na identificação de espécies, na determinação do estado de conservação de fragmentos florestais, conforme apresentado ao longo do texto. Rappaport et al. (2018) combinaram séries anuais do Landsat e dados LiDAR com alta densidade de pontos para caracterizar a variabilidade, magnitude e persistência dos impactos da degradação florestal na densidade de carbono acima do solo e na estrutura do dossel.

Entretanto, em função do aumento no número de pulsos, a tecnologia LiDAR ainda impõe desafios com respeito ao armazenamento dos dados, processamento e manipulação (SANGSTER, 2002). E, se por um lado existem desafios ligados ao processamento e armazenamento dos dados, por outro, principalmente no Brasil, o custo desta tecnologia é ainda um desafio para sua maior popularização. Parcerias entre instituições de pesquisa no Brasil e governos estrangeiros se mostram como um caminho possível. O projeto Paisagens Sustentáveis da EMBRAPA em parceria com o governo americano, fornece gratuitamente dados LiDAR para uso em pesquisas. No entanto, a disponibilidade destes dados está restrita a algumas áreas em apenas nove estados brasileiros como Acre e São Paulo.

3. Materiais e Métodos

3.1. Área de Estudo

Inicialmente denominado de Parque Nacional do Rio de Janeiro quando da data da sua criação, em 06 de julho de 1961, o Parque Nacional da Tijuca (PARNA Tijuca - 22°55'S e 23°00'S, 43°11'W e 43°19'W), localizado sobre o Maciço da Tijuca, recebeu o nome atual em 1967. Atualmente com uma área de 3.953 ha, o PARNA está subdividido em quatro setores (Floresta da Tijuca, Serra da Carioca, Pedra Bonita/Pedra da Gávea e Pretos Forros/Covanca - Figura 9), que se diferenciam pelo uso e ocupação, pelas características ambientais e pelo estado de conservação (ICMBio 2008).

O PARNA Tijuca é cercado pela matriz urbana da cidade do Rio de Janeiro e teve sua vegetação natural quase totalmente excluída pelo desmatamento, para o plantio de café e outros usos do solo (ABREU, 1992; DRUMOND, 1997)⁸. Em decorrência da retirada da vegetação e do aumento da população da cidade com a chegada de D. João e a família real, em 1808, há um aumento das demandas sobre o ambiente que teve, como uma das suas consequências, a diminuição do volume de água potável que abastecia a cidade, motivando um processo de desapropriação das terras localizadas próximas às nascentes dos rios (ICMBio, 2008) e as primeiras ações de revegetação (DRUMOND, 1997). A origem do PARNA Tijuca está ligada, portanto, a uma política de recuperação de uma área degradada pela ação humana e a vegetação que hoje recobre o PARNA é resultado, em grande parte, de ações conservacionistas que se iniciaram há quase 200 anos (ZAÚ, 2010) e culminaram com o que pode ser considerado o primeiro projeto de restauração florestal nos trópicos (DRUMOND 1997, Rodrigues et al., 2009). Entretanto, é importante enfatizar que são três os fatores que levaram à formação da cobertura vegetal que encontramos hoje no PARNA: regeneração natural, pequenas áreas de formações naturais nas partes mais íngremes e menos acessíveis e, numa parcela menor, os reflorestamentos iniciados pelo Major Archer, confrontando a noção de que a Floresta da Tijuca seria, em sua maior parte, uma “floresta plantada” (R.R. Oliveira, dados inéditos). A Mata do Pai Ricardo é, por exemplo, uma das regiões em que ainda se vê sinais de vegetação primitiva, apesar de terem sido construídas casas cujos vestígios ainda permanecem no meio da floresta (ICMBio, 2008)

⁸ Segundo Drumond (1997) as florestas da Serra da Carioca foram as primeiras florestas brasileiras a sofrerem uma devastação em larga escala para a criação, principalmente, das fazendas de café.

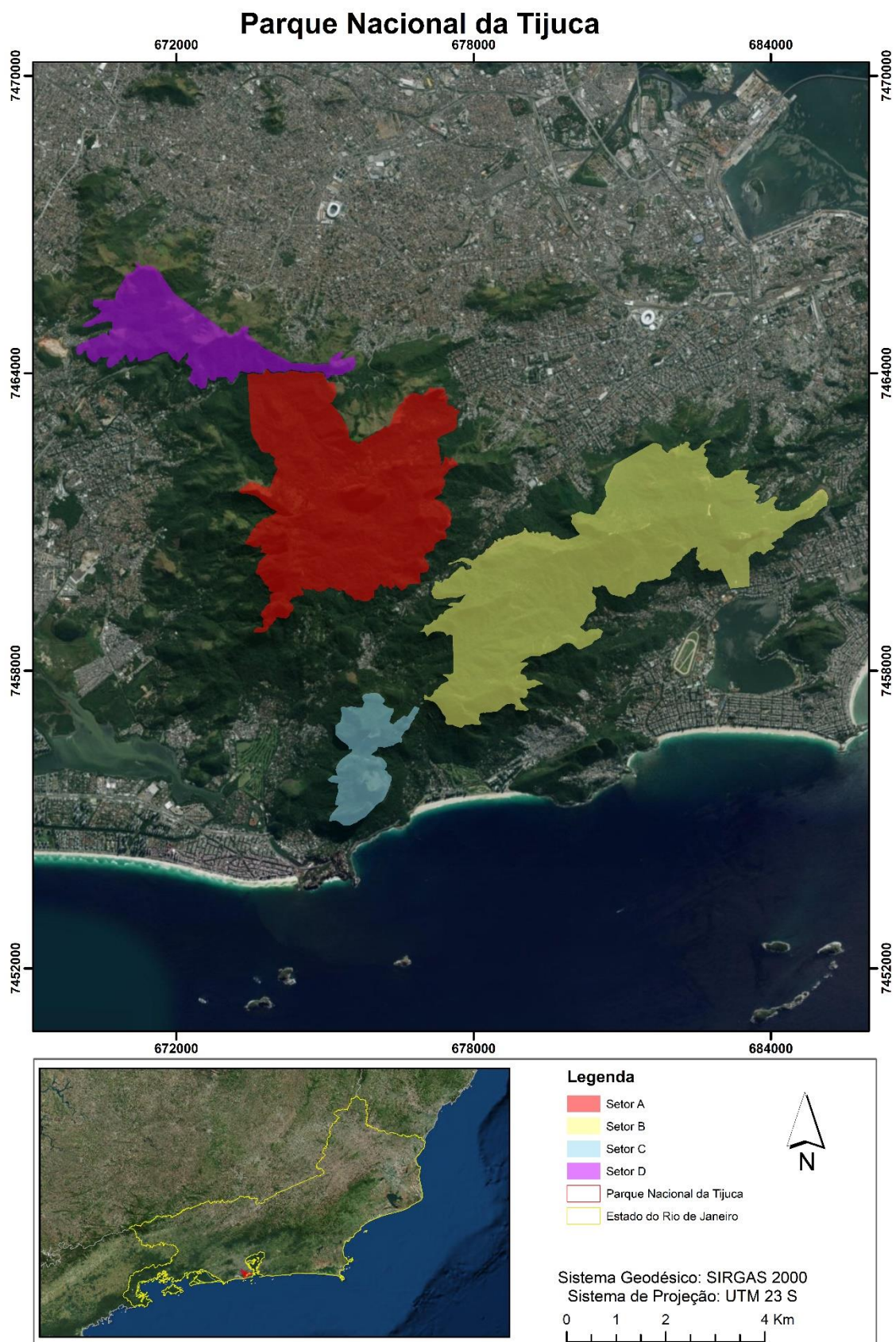


Figura 9: Localização dos setores do PARNA Tijuca. Setor (A): Floresta da Tijuca; setor (B): Serra da Carioca; Setor (C): Pedra Bonita/Pedra da Gávea; e Setor (D): Pretos Forros/Covanca.

A cobertura vegetal que recobre o PARNA é classificada como Floresta Ombrófila Densa Montana e Submontana⁹ (ICMBio, 2008, IBGE, 2012) e, segundo Coelho Netto et al. (2007), cerca de 35% da área do Maciço da Tijuca encontra-se recobertos por uma floresta em estágio secundário tardio ou clímax local. Podem ser encontrados na floresta atual elementos arbóreos que atingem de 25 a 30 metros, além de epífitas, cipós, arbustos e ervas, e também, espécies exóticas como frutíferas, remanescentes de tratos culturais, ou ainda em consequência de ações paisagísticas (ZAÚ, 2010). A presença dessas áreas em estágio sucessional avançado contribui para a estabilização de encostas, uma vez que apresentam uma estrutura funcional plena na regulação dos processos hidrológicos e mecânicos (COELHO NETTO, 2005).

Com relação à geomorfologia, o PARNA Tijuca está localizado no Maciço da Tijuca, que se caracteriza por um relevo acidentado com altitudes variando entre 80 e 1.023 m, onde se destacam o Pico da Tijuca, com 1.023 m, o Corcovado e a Pedra da Gávea. Em sua maior parte, é constituído por gnaisse, ocorrendo algumas intrusões graníticas (ICMBio, 2008) sendo frequente declividades superiores a 35° (Figura 10) e afloramentos rochosos (COELHO NETTO et al., 2007). Os solos chegam a apresentar vários metros nos fundos de vale, mas são lixiviados e rasos nos trechos mais altos da encosta com um predomínio de Latossolos, sendo frequente também os Neossolos e Cambissolos (ROSAS et al., 1992).

A orientação geral do Maciço da Tijuca é no sentido nordeste-sudoeste e, segundo trabalho de Oliveira et al. (1995), essa orientação irá refletir nas características das encostas. Enquanto as encostas voltadas para o quadrante norte apresentam variações climáticas mais extremas, nas encostas voltadas para o quadrante sul as copas mais fechadas das árvores ajudam na retenção do calor e umidade e evitam os extremos de temperatura. Como consequência, encontramos uma mata mais exuberante nas encostas voltadas para o sul e, por outro lado, um risco maior de incêndios nas encostas voltadas para o norte. À orientação das encostas também é atribuído o padrão de distribuição espacial das manchas de gramíneas e vegetação arbórea-arbustivas, que se concentram nas encostas voltadas para o norte (DIAS e COELHO NETTO, 2011).

O clima do Maciço é classificado como tropical de altitude (COELHO NETTO, 1985). De acordo com trabalho realizado por Mattos (2006), a partir de dados coletados no Posto termopluiométrico do Alto da Boa Vista, bairro em que se localiza o setor “A” do PARNA, até 500 metros de altitude encontramos o clima úmido de florestas tropicais (Af, de Koppen) e, para altitudes acima de 500 metros, o clima é do tipo temperado mesotérmico, superúmido (Cfa, de

⁹ As formações Ombrófila Densa Montana e Sub-montana se diferenciam entre si pela faixa altitudinal onde são encontradas. Enquanto a Sub-montana está situada a partir de 100 m até em torno dos 500 m, entre os 16° e 24° de latitude, a Montana localiza-se a partir dos 500 m até em torno dos 1.500 m (IBGE, 2012).

Koppen). A precipitação média encontrada foi de 2.227 mm e a temperatura média de 21,5 °C, com a média das máximas de 26,2 °C e a média das mínimas de 17,9 °C.

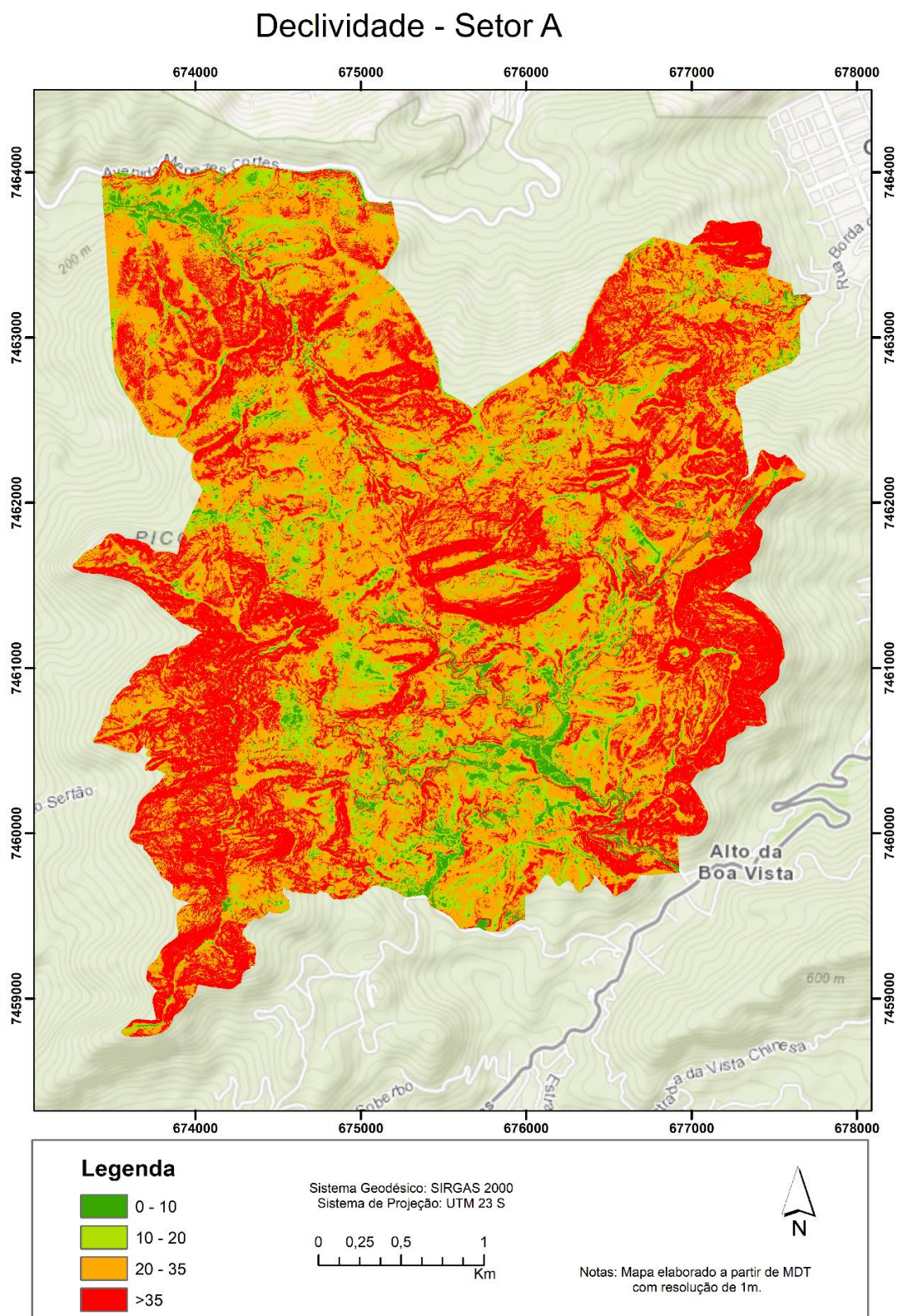


Figura 10: Mapa de Declividade de encostas do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.

Em termos da hidrografia, o Maciço da Tijuca possui um sistema fluvial bastante extenso e variado (ICMBio, 2008) e é considerado um importante regulador hidrológico e reservatório de água para a cidade (COELHO NETTO, 1985). O seu sistema fluvial possui 43 rios e córregos, cachoeiras, dois lagos e um açude (ICMBio, 2008). A drenagem é constituída por cinco setores hidrográficos: dois drenam em direção à Baía de Guanabara, um em direção à zona sul da cidade e dois em direção à baixada de Jacarepaguá (COELHO NETTO op. cit.).

É encontrado no PARNA da Tijuca um rico patrimônio cultural evidenciado nas edificações oriundas do seu passado histórico. Destacam-se as ruínas de antigas fazendas de café, heranças do século XVIII, a Capela Mayrink (1850) e a antiga casa de coudelaria do Conde Gestas (1860), onde se encontra a sede de administração do PARNA, entre outras edificações/ruínas, apesar de já terem passado por reformas que descaracterizaram, em algumas a arquitetura original. Na Serra da Carioca, ganham destaque a Estrada de Ferro do Corcovado (1884) e as ruínas da Fazenda Nassau (1818), a maior do Império. São também encontradas 128 vias de circulação distribuídas entre trilhas, caminhos históricos e estradas que se originaram, em sua maioria, nos séculos XVIII e XIX (ICMBio, 2008).

Se por um lado, os caminhos históricos representam um rico patrimônio cultural, os impactos causados pelas estradas devem ser levados em consideração. Coelho Netto et al. (2007) discutem a influência das mesmas nos movimentos de massa e Zaú (2010) avaliou indicadores microclimáticos, florísticos e fitossociológicos, entre outros, do componente arbustivo -arbóreo associados a estradas que recortam o Setor “A” do PARNA.

A área de estudo da presente Tese compreende o Setor “A” do PARNA conhecido como Floresta da Tijuca, com uma área total de 1.484 ha. A vegetação encontrada é classificada, de acordo com o mapa de cobertura e uso da terra do Instituto Pereira Passos (IPP, 2016), como Floresta Ombrófila Densa em estágio avançado, médio e inicial (Figura 11), que juntas representam 94,67% da cobertura desse setor do PARNA, sendo que a vegetação em estágio avançado corresponde a 72,53% da área (Figura 12). Estes percentuais são corroborados pelo trabalho desenvolvido por Zaú (2010), cujos resultados do levantamento florístico e fitossociológico apontam para uma floresta em bom estado de conservação.

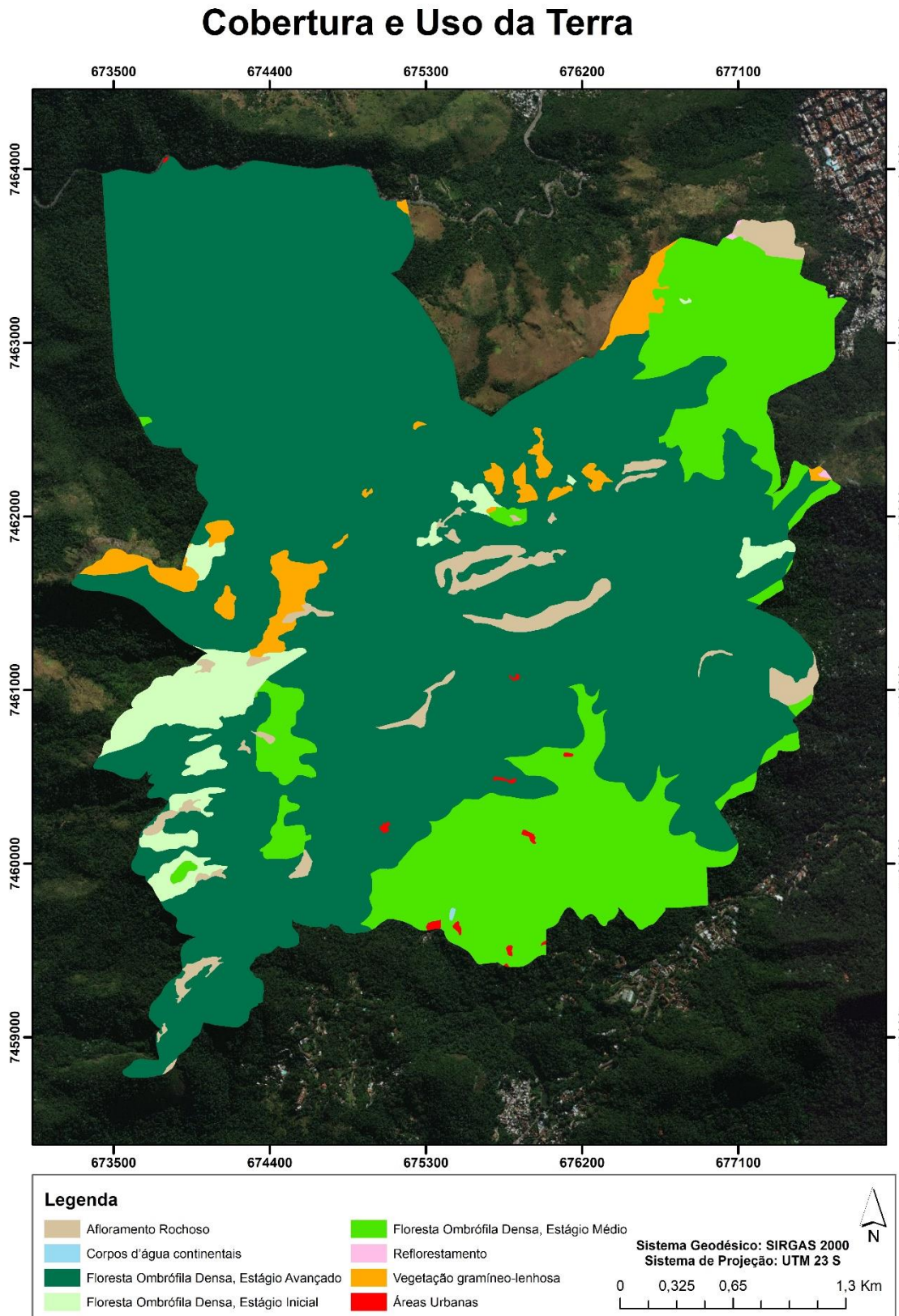


Figura 11: Mapa de cobertura e uso da terra do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca segundo IPP (2016). A maior parte do Setor “A” é classificada como Floresta Ombrófila Densa em estágio avançado.

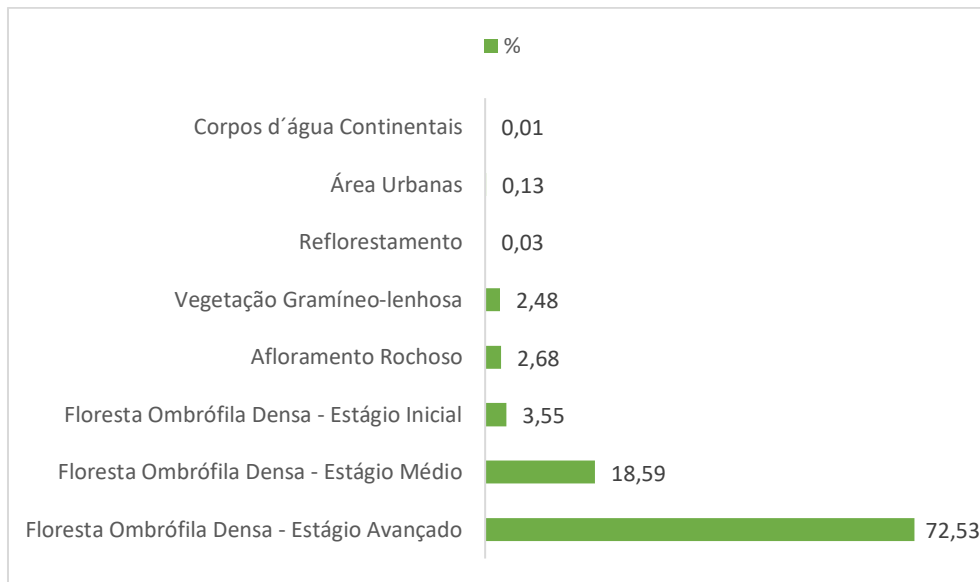


Figura 12: Gráfico com a porcentagem das classes de uso e cobertura do solo do Setor "A" do Parque Nacional da Tijuca, segundo IPP (2016).

3.2. Dados LiDAR

Os dados LiDAR utilizados¹⁰ na Tese foram obtidos a partir de um aerolevanteamento realizado no dia 06 em novembro de 2012, contratado pela Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GEORIO), com o sensor transportado em helicóptero, abrangendo 155 km² do Maciço da Tijuca (Figura 13).



Figura 13: Visão geral das áreas cobertas pelo aerolevanteamento a laser (Fonte: IPP)

Os parâmetros referentes ao aerolevanteamento realizado pela empresa HANSA – Geofísica Aerolevanteamento Ltda são apresentados na Tabela 3.

10 O dados LiDAR foram cedidos pelo IPP (Instituto Pereira Passos) e pela HANSA – Geofísica e Aerolevanteamento Ltda., através do Prof. Dr. André de Souza Avelar (IGEO/CCMN-UFRJ).

Tabela 3: Parâmetros do aerolevanteamento realizado pela empresa HANSA – Geofísica e Aerolevanteamento Ltda., para a Prefeitura do Rio de Janeiro, no Maciço da Tijuca.

Parâmetros	Especificações
Equipamento	Sensor RIEGEL LMS-Q560 – HB50 Np para 4 a 5 pt/m ²
Classe de segurança no emprego de laser	Classe 1 (segura para os olhos)
Diâmetro da projeção do feixe luminoso	<30 cm
Ângulo de varredura – FOV / 2-Nadir	±15°
IMU - Aerocontrol-IID da empresa IGI – Ingenieur-Gesell Schaft-Fur Interfaces MBH com tecnologia de fibra ótica de giroscópios (FOG)	Position com 0,1m; velocity com 0,005m/s; roll-pitch com 0,004°; heading com 0,01° – 256 HZ
Sistema GPS	12 Canais, L1/L2 com correção de fases
Taxa de repetição do pulso laser	150 khz prr
Densidade de pulsos/m ²	4 a 5
Altura de voo	1.200 feet AGL
Velocidade do avião C182	90 KTN
Overlap Swath – aquisição laser	53,4%
Resolução original de tomada das fotos RGB	10,8 CM
Resolução final das ortofotos	20 CM
Overlap e sidelap das imagens	60 % E 32
Sistema de controle do voo	Software de planejamento e orientação CCNS
Sistema de posicionamento	Software de pós processamento + aerocontrol IID
Sistema de controle de sensor	Software de pós processamento Terrasolid+LMControl

A nuvem de pontos foi classificada no software *TerraScan* pela empresa que realizou o levantamento e consta de 179 arquivos *Lidar Data Exchange Format File (.las)*, UTM23S/SAD69 (Figura 14). Em função da dificuldade de manipulação dos dados LiDAR, optou-se por um recorte da área de estudo que constou do Setor “A” do PARNA Tijuca. Este setor, que corresponde a Floresta da Tijuca é coberto por 25 arquivos, totalizando 270 milhões de pontos.

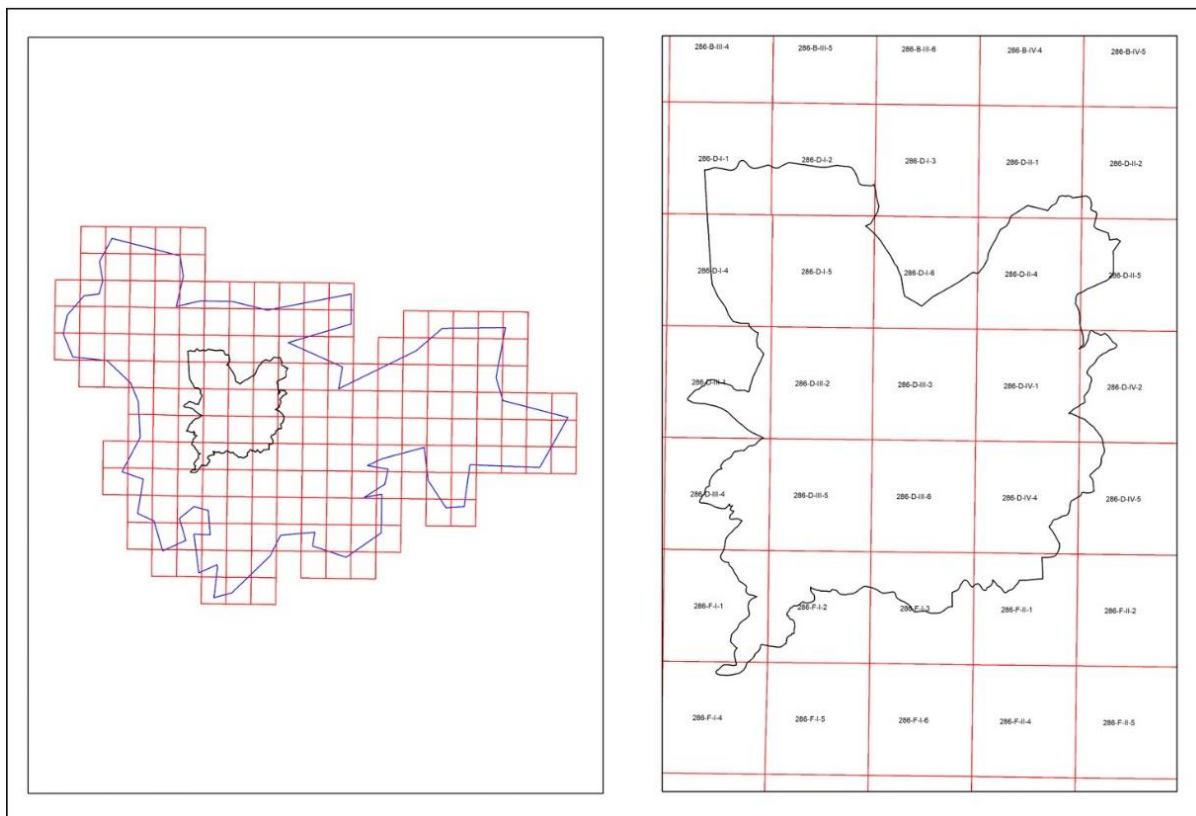


Figura 14: Articulação dos arquivos .las do Maciço da Tijuca (esquerda) e do setor “A” do Parque Nacional da Tijuca (direita).

Os dados LiDAR podem ser armazenados em duas categorias de arquivos, binários e não binários¹¹. Os arquivos binários possuem algumas vantagens sobre os não binários: (1) são mais compactos em tamanho; (2) podem carregar maior quantidade de informação para cada retorno de laser gravado; (3) contemplam informações genéricas da nuvem de pontos e do sobrevoo na forma de um cabeçalho que está embutido no arquivo e, (4) consomem menos tempo para processamento, pois os arquivos podem ser lidos e processados de forma sequencial (GORGENS et al., 2014). O arquivo binário .las foi criado pela ASPRS e desenvolvido para padronizar e facilitar a troca de arquivos entre provedores de serviço, desenvolvedores de *softwares* e usuários (GORGENS et al, op. cit.) e possui uma classificação nos metadados que é associada ao dado LiDAR. A tabela 4 descreve os códigos de classificação segundo a orientação da ASPRS.

¹¹ –Arquivos do tipo XYZ pertencem à categoria dos não binários e são conhecidos como arquivos ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Cada linha do arquivo representa uma observação com as coordenadas geográficas de um retorno laser (x,y e z) e essas informações são separadas por caracteres de tabulação, ‘espaço’ ou ‘vírgula’. Já os arquivos binários são compostos por uma sequência de *bytes* que armazenam várias informações de cada retorno como número do retorno, coordenadas e intensidade por exemplo.

Tabela 4: Códigos e classificação dos retornos da nuvem de pontos do LiDAR num arquivo .las, segundo a orientação da ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*).

Valor	Descrição
0	Nunca classificados
1	Sem classificação
2	Solo / Ground
3	Vegetação baixa / Low Vegetation
4	Vegetação média / Medium Vegetation
5	Vegetação alta / High Vegetation
6	Edifícios
7	Ruído
8	Model Key
9	Água

Com o objetivo de avaliar a qualidade dos dados foram realizadas duas análises. A primeira no *software* Fusion¹² através da ferramenta *Catalog* que investiga as características descritivas contidas nos arquivos, como densidade média dos retornos, coordenadas máxima e mínima de x, y e z, entre outras. Esta análise foi feita para o arquivo 286-d-iii-3.las, onde se encontra a área do levantamento de campo, contendo todos os retornos e considerando apenas os retornos classificados como *Ground*. Esta ferramenta também gera mapas de densidade. Para este estudo foi estipulado o tamanho de célula de 5 m e considerando 4 e 10 os valores mínimos e máximos (respectivamente) da densidade de retornos (m²).

A segunda análise foi realizada para todos os 25 arquivos que compõem o Setor “A” através da ferramenta *Las Point Statistics* no *software* *ArcGis* 10.3. Para gerar um mapa de densidade para toda a área do Setor “A”, foi utilizada a ferramenta denominada *Las Point Statistics as Raster* considerando células de 100 m².

12 O Fusion (McGAUGHEY, 2016) é um *software* gratuito disponibilizado pelo Serviço Florestal Norte Americano para análise e visualização de dados LiDAR que permite executar as principais etapas do processamento, análise e avaliação de dados geralmente implementados em levantamentos florestais (GORGENS et al., 2014).

3.3 Geração dos Modelos Digitais de Terreno (MDT)

Os MDT criados a partir do LiDAR foram elaborados para toda área do Setor “A” (25 arquivos). Em função do tamanho dos arquivos foi necessário processar alguns deles separadamente e depois realizar um mosaico para toda área. Este mosaico foi realizado no *software* ArcGis 10.3, através da ferramenta *mosaic to new raster*.

Foram utilizados cinco valores de tamanho de pixel (0,4; 1; 2; 5 e 10 m) com o objetivo de avaliar a qualidade dos produtos gerados a fim de atender diferentes escalas cartográficas (1:2.000, 1:5.000, 1:10.000, 1:25.000 e 1:50.000), respeitando a acuidade visual de 0,2 mm na representação. Para os MDT foram interpolados apenas os pontos classificados como *Ground*. Os MDT em formato *raster*, foram gerados em dois softwares, Fusion e ArcGis 10.3, usando metodologias distintas.

Para Fernandes e Menezes (2005), os métodos para geração de MDE podem ser construídos através de grades regulares retangulares (GRID), ou redes irregulares triangulares (TIN), utilizando diferentes métodos de interpolação. Felgueiras(1999) define a grade regular como “um modelo digital que aproxima a superfície através de um poliedro de faces retangulares” enquanto que “em um modelo de grade irregular triangular os pontos amostrados são conectados por linhas para formar triângulos”. No ArcGis o método que utiliza grades regulares é denominado *Binning* e o que utiliza o TIN é denominado *Triangulation* (Tabela 5). Devido à alta densidade de pontos é comum dentro de uma mesma célula conter dois ou mais pontos e o valor estipulado é o critério de *Cell Assignment Type*. No Fusion existem dois comandos para criação do MDT, o *Gridsurfacecreate* e o *TINsurfacecreate* (Tabela 5). Para cada um destes comando pode ser utilizados parâmetros adicionais como, por exemplo, suavização da superfície (MCGAUGHEY, 2016)

No ArcGis, o critério de *Cell Assignment Type* utilizado foi o parâmetro sugerido por Barbosa (2015), *Average*. Para o MDT baseado no TIN a interpolação foi feita somente pelo vizinho mais próximo (*Natural Neighbor*). No Fusion, a criação do MDT utilizou os comandos *GridsurfaceCreate* e *TINSurfaceCreate*. Neste trabalho, não foi utilizado nenhum parâmetro opcional como suavização da superfície. Os MDT foram gerados a partir de linha de comando, mudando-se apenas o tamanho dos pixels.

Tabela 5: Características dos interpoladores disponíveis nos *softwares* ArcGis 10.3 e Fusion.

Softwares	Interpoladores			
ArcGis 10.3	<i>Binning</i>	<i>Cell Assignment Type</i>	<i>Average</i>	Atribui o valor médio de todos os pontos da célula
			IDW	Usa o interpolador do inverso do quadrado da distância para determinar o valor da célula
			<i>Maximum</i>	Atribui o valor máximo encontrado na célula
			<i>Minimum</i>	Atribui o valor mínimo encontrado na célula
			<i>Nearest</i>	Usa a interpolação por vizinho mais próximo para determinar o valor da célula
	<i>Void Fill Method</i>	<i>None</i>	Nenhum valor é atribuído à célula	
		<i>Simple</i>	Atribui para uma célula sem dado a média dos valores das células em seu entorno	
		<i>Linear</i>	Usa uma interpolação linear para determinar o valor da célula	
		<i>Natural Neighbor</i>	Usa uma interpolação por vizinho mais próximo para determinar o valor da célula	
	<i>Triangulation</i>	<i>Linear</i>	Usa uma interpolação linear para determinar o valor da célula	
<i>Natural Neighbor</i>		Usa uma interpolação por vizinho mais próximo para determinar o valor da célula		
Fusion	<i>Gridsurfacecreate</i>	A área é dividida num grid regular a partir de dimensões definidas pelo usuário. A elevação das células é determinada pela média da elevação dos pontos. O valor das células sem pontos é determinado pelo método de interpolação <i>Natural Neighbor</i> (vizinho mais próximo)		
	<i>TINsurfacecreate</i>	Inicialmente é gerado uma malha irregular triangular (TIN), com base nos pontos da nuvem, e em seguida a superfície em formato de grid é interpolada com base nesta malha irregular (os algoritmos de triangulação utilizados são os desenvolvidos por Shewchuk, J.R. da Universidade da Califórnia (MCGAUGHEY, 2016))		

No fim, foram produzidos 20 MDT, sendo 4 para cada um dos tamanhos de pixel estipulados. Como o levantamento foi realizado em SAD69, houve a necessidade de alterar as coordenadas para o *datum* oficial brasileiro, SIRGAS 2000, com base nos parâmetros de transformações entre sistemas geodésicos do IBGE. Esse processamento também foi realizado no ArcGis 10.3.

3.4 Análise da Altimetria dos MDT

Segundo Doubek (1989), “A topografia tem por objetivo o estudo dos instrumentos e métodos utilizados para obter a representação gráfica de uma porção do terreno sobre uma superfície plana”. O objetivo principal é efetuar o levantamento (executar medições de ângulos,

distâncias e desníveis) que permita representar uma porção da superfície terrestre em uma escala adequada. As operações efetuadas em campo, com o objetivo de coletar dados para a posterior representação, denominam-se de levantamento topográfico (VEIGA et al., 2007). Ainda segundo Veiga et al. (op. cit.), o levantamento topográfico pode ser dividido em duas partes: o levantamento planimétrico, onde se procura determinar a posição planimétrica dos pontos (coordenadas x e y) e o levantamento altimétrico, onde o objetivo é determinar a cota ou a altitude de um ponto (coordenada z). A realização simultânea dos dois levantamentos dá origem ao chamado levantamento planialtimétrico.

A avaliação da exatidão altimétrica foi efetuada sobre os MDT gerados através da comparação com 165 pontos levantados por Estação Total. A área deste levantamento compreende uma parcela de 20x50 m localizada numa encosta próxima ao estacionamento para quem vai fazer as trilhas para o Pico da Tijuca e do Papagaio (Figura 15). A área está voltada para o quadrante sul e apresenta declividade média de 25,45°, se inicia na cota 656 m e termina na cota 678 m.

Para o levantamento com Estação Total (ET), foi necessário levantar inicialmente dois pontos com aparelho GNSS (Figura 16) pós-processados no site do IBGE. Em seguida foram coletados 165 pontos com a Estação Geodetic G2 (Figura 16) ao longo da parcela através de uma poligonal fechada. As altitudes foram convertidas de elipsoidal para ortométrica no *software* MapGeo, e os dados foram processados no *Geooffice*. Este levantamento foi realizado pela Empresa Junior Mensurar e além dos pontos foi entregue um MDT com precisão de 20cm e o perfil topográfico da área. O levantamento dos dados de campo foi realizado entre 2016 e 2017.

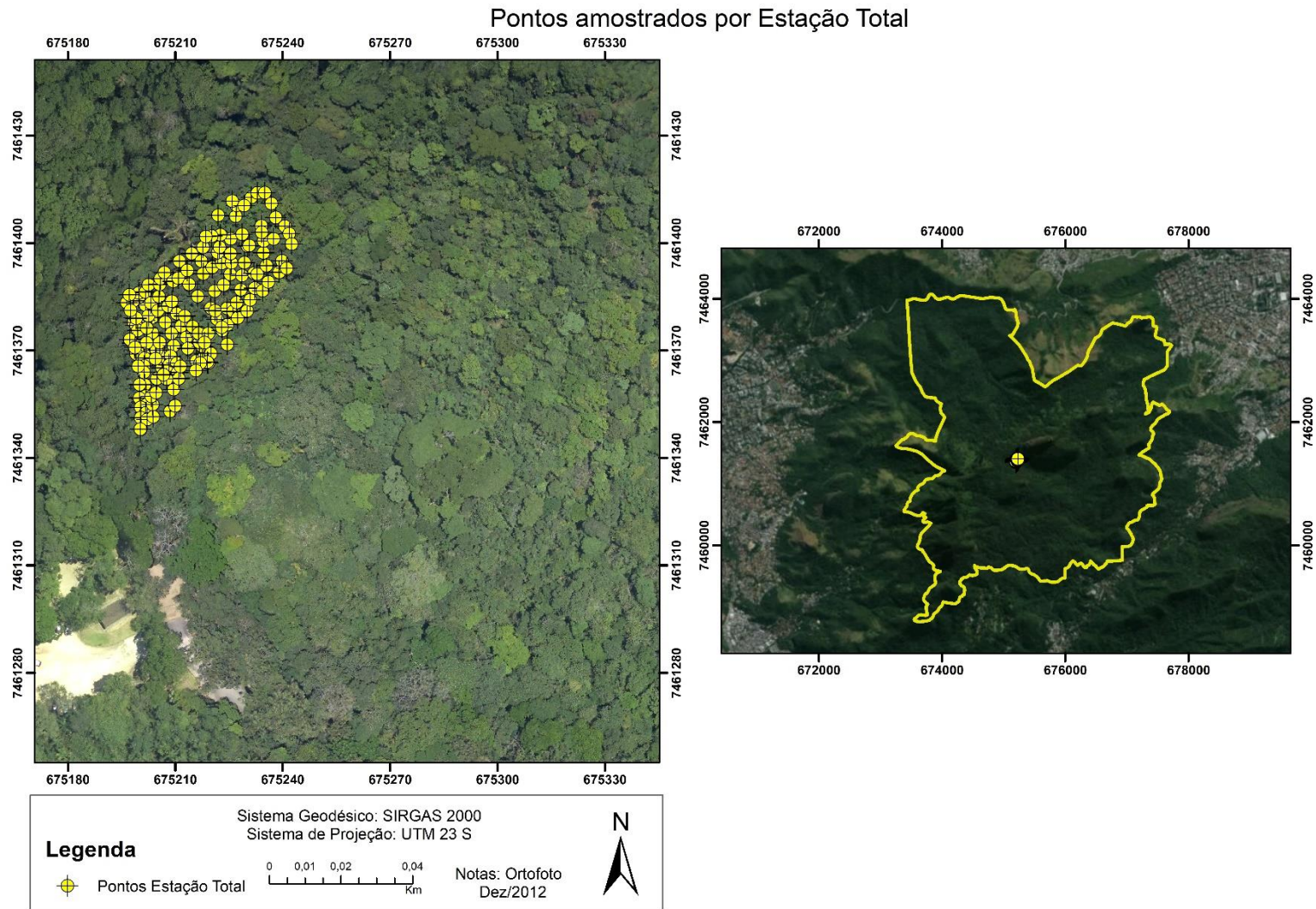


Figura 15: Localização dos 165 pontos levantados com Estação Total sob densa cobertura vegetal.

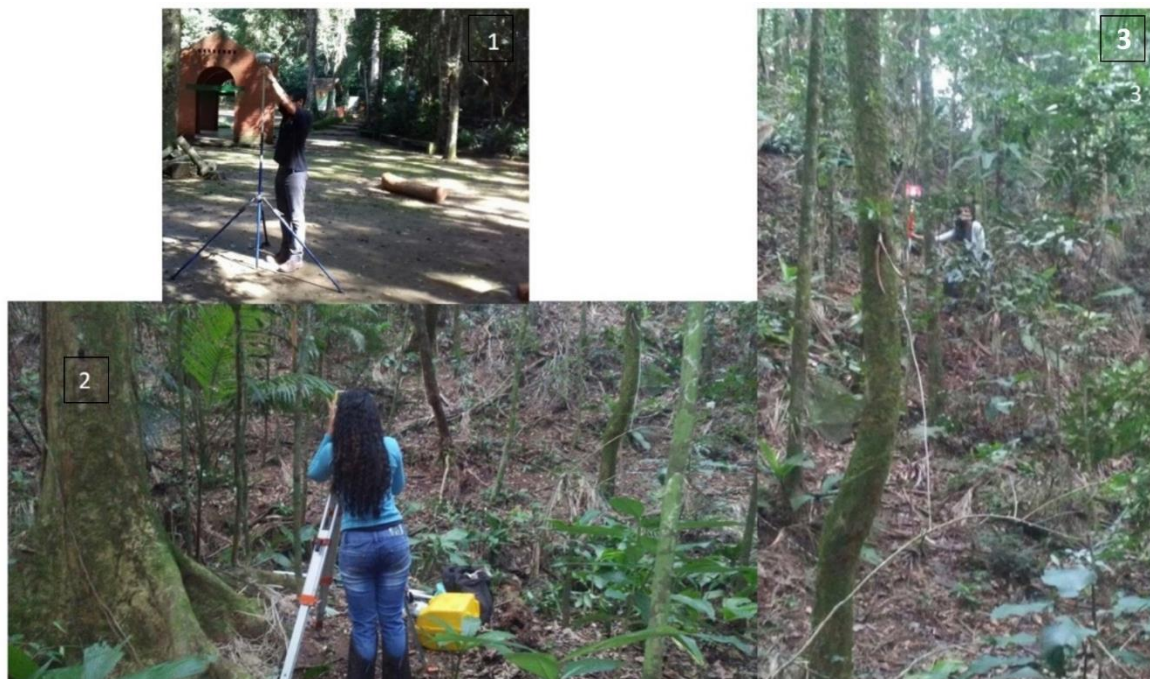


Figura 16: (1) Levantamento com receptores modelo Trimble R6 de dois pontos com coordenadas precisas utilizados para vante e ré; (2) aparelho utilizado para levantar os pontos e (3) baliza utilizada no levantamento.

A extração de valores altimétricos a partir do MDT foi feita através da função *Extract Value to Multi Points* do ArcGis 10.3. Calculou-se a diferença entre as cotas obtidas no MDT com os valores determinados em campo. A avaliação final dos resultados foi baseada em três abordagens. A primeira consistiu na avaliação a partir dos limites estabelecidos pelo PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico), no Decreto -Lei nº 89.817 (BRASIL, 1984), segundo o qual pelo menos 90% dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, devem apresentar diferenças até a tolerância definida para cada escala, e o desvio padrão do total de pontos analisados deve ser inferior ao limite estabelecido para garantir que os pontos que ultrapassem a tolerância definida não estejam muito afastados da mesma (Anexo 1). Como o PEC faz referência apenas a tolerâncias em função da equidistância, optou-se por usar como referência os valores de equidistâncias mais típicos para cada escala, conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Limites estabelecidos pelo PEC. Adaptado de Barros et al (2013). OBS: O Erro Médio Quadrático (EMQ) deve ser entendido como Erro ou Desvio Padrão.

PEC		1:2.000 Eq. 1m		1:5.000 Eq. 2m		1:10.000 Eq. 5m		1:25.000 Eq. 10m		1:50.000 Eq. 20m		
	Tol. (Eq.)	EMQ (Eq.)	Tol. (Eq.)	EMQ (Eq.)	Tol. (Eq.)	EMQ (Eq.)	Tol. (Eq.)	EMQ (Eq.)	Tol. (Eq.)	EMQ (Eq.)	Tol. (Eq.)	EMQ (Eq.)
Classe A	1/2	1/3	0,5	0,33	1,0	0,66	2,5	1,67	5,0	3,3	10	6,7
Classe B	3/5	2/5	0,6	0,4	1,2	0,8	3,3	2,0	6,0	4,0	12	8,0
Classe C	3/4	1/2	0,75	0,5	1,5	1,0	3,75	2,5	7,5	5,0	15	10

Os dados também foram avaliados segundo metodologia proposta por Santos et al. (2016), utilizando o software GEOPEC, que utiliza estatística espacial inclusive para análise de tendência. A avaliação do produto cartográfico é feita a partir das Especificações Técnicas de Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), documento ligado à Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), que pode ser aliado ao Decreto-lei nº 89.817, permitindo uma avaliação mais rigorosa de produtos cartográficos digitais (Anexo 2).

A avaliação da acurácia também foi realizada utilizando Inferências Estatísticas, de acordo com Vieira e Genro (2013). Segundo os autores, a partir de uma adaptação de Congalton e Green (2009), é proposta uma metodologia para estimar a acurácia independentemente da existência de tendência relevante. Esta metodologia resume-se no enquadramento de padrões de acurácia predefinidos a partir do erro máximo provável, em relação a intervalos de confiança. Os fundamentos estatísticos aplicados são baseados no PEC, considerando 90% de probabilidade para diferentes classes e, como inferência estatística a distribuição *t-Student*, enfatizando-se que os valores de acurácia dependem, preponderantemente, do método de amostragem.

3.5. Levantamento e Análise da Vegetação

O estudo da arquitetura da vegetação (organização ao nível da comunidade vegetal, sem levar em conta as diferentes populações) foi realizado em três áreas do Setor “A” do PARNA Tijuca, denominadas Área 1, Área 2 e Área 3 (Figura 17). Como um dos objetivos do trabalho é avaliar a possibilidade de identificar a estratificação florestal, a escolha das áreas levantadas levou em consideração a presença ou não do sub-bosque.

Em cada uma das três áreas foi estabelecida uma parcela de 20 x 50m. Nas áreas 1 e 2, seguiu-se a declividade ascendente do terreno e buscou-se evitar o efeito de borda. A localização da área 3 levou em consideração a ausência de sub-bosque sem que houvesse preocupação com declividade e/ou efeito de borda.

O início de cada parcela foi marcado com uma estaca feita de tubo PVC, e a partir deste ponto, foi esticada uma trena de 50m (linha mestra) e outra trena de 20 m no sentido perpendicular a esta. Ao final da linha mestra foi fincada outra estaca, assim como em cada quina da parcela para que fosse possível georreferencia-lá (Figura 18).

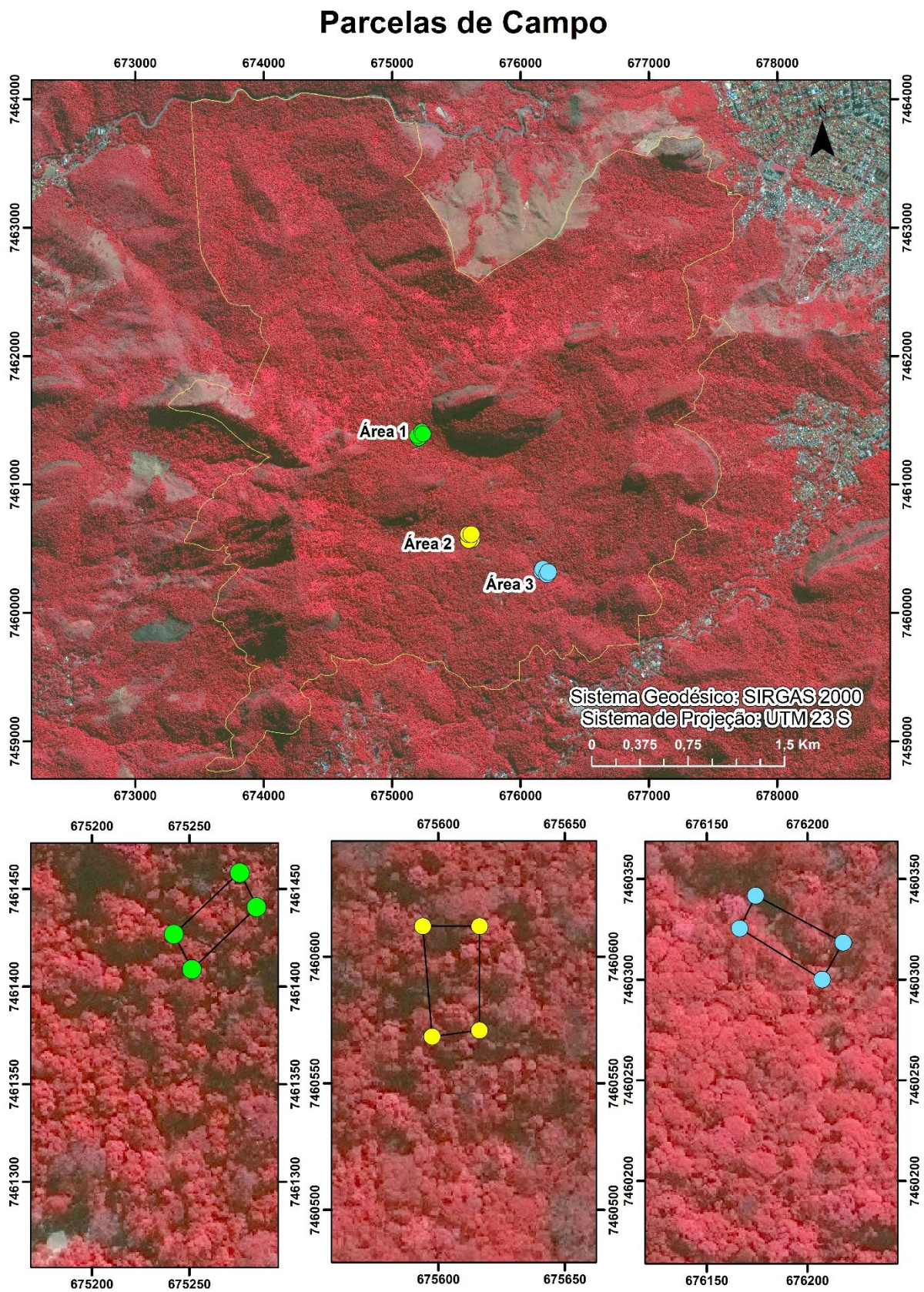


Figura 17: Mapa do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca com a localização das parcelas amostradas em campo.



Figura 18: Aparelho GNSS utilizado para georeferenciar as quinas das parcelas levantadas em campo.

A amostragem total foi de 0,3 ha. Foram incluídas apenas as árvores vivas com DAP (diâmetro à altura do peito; 1,30 m do solo) $\geq 2,5$ cm. Indivíduos com troncos múltiplos foram amostrados apenas quando pelo menos uma das ramificações possuía DAP $\geq 2,5$ cm (Figura 19). Foram considerados arbustos os indivíduos cujo caule ramificava a partir do solo ou a até 10 cm dele. Os indivíduos mortos só tiveram mensurados o DAP. O trabalho de campo foi realizado no período de 08/2016 a 10/2017.

Além do DAP, também foi estimada a altura de cada indivíduo, através de comparação com a tesoura de poda alta, por um técnico de campo experiente. Para a Área 1, desenhou-se um diagrama de perfil com o objetivo de retratar a vegetação lenhosa. Utilizou-se a linha mestra da parcela para desenhar todos os indivíduos amostrados em uma sub-parcela de 20x10 m. A declividade do terreno foi determinada a partir do MDT gerado pelos dados LiDAR.



Figura 19: Exemplo de indivíduo ramificado na segunda área amostrada.

Foram calculados, para cada parcela, os seguintes parâmetros: (a) número total de indivíduos amostrados; (b) número de indivíduos com troncos múltiplos; (c) densidade total (ind./ha); (d) área basal total (m^2/ha); (e) diâmetros máximo e mínimo; (f) média e desvio padrão dos diâmetros; (g) alturas máxima e mínima; (h) média e desvio padrão das alturas; e (i) biomassa acima do solo ($Mgha^{-1}$).

Para gerar os parâmetros fitossociológicos de cada área, foi utilizado o conjunto de programas FITOPAC 1.6 (SHEPPHERD 2006). Para avaliação de alguns aspectos da dinâmica dos trechos de mata estudados foram elaborados histogramas de frequência das classes de diâmetro de todos os indivíduos vivos amostrados. O intervalo de classe ideal (IC) foi calculado conforme as fórmulas de Spiegel (1970 apud FELFILI e RESENDE 2003). O limite inferior de cada classe de diâmetro foi incluído na respectiva classe.

$$a) \quad IC = A/NC$$

$$b) \quad NC = 1 + 3,3 \cdot \log N$$

onde:

A é a amplitude de diâmetros;

NC é o número de classes; e

N é o número de indivíduos.

Para os histogramas de altura, considerou-se um intervalo de classe de 1 m, sendo o limite inferior de cada classe incluído nesta. Para a quantificação da biomassa de cada parcela foi usada a equação alométrica proposta por Burger e Deletti (2008). Para elaboração desta equação, os autores usaram dados de duas parcelas de 100 m² em uma porção de floresta atlântica no Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo. Foram cortadas 82 árvores ao nível do solo e anotada as medidas de altura e diâmetro e as folhas foram separadas dos ramos para permitir a determinação da massa fresca da porção foliar e lenhosa. Após a determinação da massa seca, as árvores foram distribuídas em duas amostras aleatórias, sendo uma utilizada para o desenvolvimento das equações de regressão, e a outra para validá-las. Como resultado, foram definidas duas equações (Equação 1 e 2) para estimativa de fitomassa. A primeira que considera apenas o diâmetro e a segunda que considera além do diâmetro a altura de cada indivíduo.

$$\ln DW = -3,068 + 2,522 \ln d \text{ (Equação 1)}$$

$$\ln DW = -3,676 + 0,95 \ln d^2 h \text{ (Equação 2)}$$

onde:

DW=Dry Weight

d=diâmetro de cada indivíduo

h= altura de cada indivíduo

Como sugerido por Otaviano (2018), em trabalho desenvolvido na Reserva Estadual Ecológica da Juatinga, Paraty, RJ, quando foram investigados métodos de estimação da biomassa arbórea, nesta Tese foi utilizada a equação 2 para estimar a biomassa das três áreas de estudo. O cálculo da estimativa de biomassa para cada parcela foi feito pela soma dos valores das árvores individuais. Os valores finais foram convertidos em massa por unidade de área expressa em Mgha⁻¹.

3.6. Estimativa de altura das árvores e Modelo de Densidade Relativa da Vegetação

A estimativa de altura das árvores do dossel é um dos parâmetros obtidos através de dados LiDAR e usado em vários estudos florestais como, por exemplo, na estimativa de biomassa acima do solo (e.g. D'OLIVEIRA et al. 2012). A partir da diferença entre o MDT e o MDS, é gerado um modelo denominado Modelo Digital de Copa (MDC).

No Fusion, a partir do comando *Canopymodel* é gerado o MDS com a interpolação dos primeiros retornos da nuvem de pontos. Quando o parâmetro opcional *ground* é inserido, as

elevações da superfície são normalizadas a partir da incorporação do MDT, e o MDC é gerado.

O MDC, com pixel de 1 m, foi exportado para o ArcGis onde foram definidos modelos de cobertura vegetal a diferentes alturas acima da superfície¹³. A metodologia para criação do MDC e dos diferentes modelos de cobertura da vegetação seguiu metodologia proposta por d'Oliveira et al. (2014). Foram definidas cinco classes de cobertura vegetal que variaram de 1 a 5 m; de 5 a 10 m; de 10 a 20 m; de 20 a 30 m; e > 30 m. A escolha do intervalo de classes levou em consideração a Resolução N° 6, de 04 de maio de 1994 (CONAMA, 1994), que define os estágios sucessionais¹⁴ da Mata Atlântica (MA). Apesar de receber muitas críticas, a classificação da vegetação em estágios sucessionais é a principal forma encontrada para definir o uso da MA. A diferenciação dos estágios é realizada utilizando-se de parâmetros como a fisionomia, estratos predominantes, distribuição diamétricas e alturas, entre outros (CONAMA, 1994).

Foi produzido um modelo de densidade relativa da vegetação (RDM – *Relative Densities Models*) em arquivo *raster*, com pixel de 1 m, segundo metodologia proposta por d'Oliveira et al. (2014), no Fusion. Segundo os autores, a partir da definição de um limite inferior e superior de altura, que irão definir uma camada do estrato florestal, o modelo calcula a densidade relativa da vegetação nesta camada previamente selecionada (Figura 20).

13 Como a nuvem de pontos estava em SAD69 foi necessário reprojeter o MDC para SIRGAS2000, a partir dos parâmetros do IBGE no ArcGis. Esse procedimento foi realizado para todos os mapas e arquivos shape e raster produzidos nesta Tese.

14 Segundo Budowiski (1965) nas florestas tropicais a sucessão secundária é formada por um conjunto de estágios sucessionais distintos sendo as espécies agrupadas em função da ocorrência preferencial em cada um destes estágios. Segundo este modelo os estágios serais são denominados de pioneiro, secundário inicial, secundário tardio e clímax.

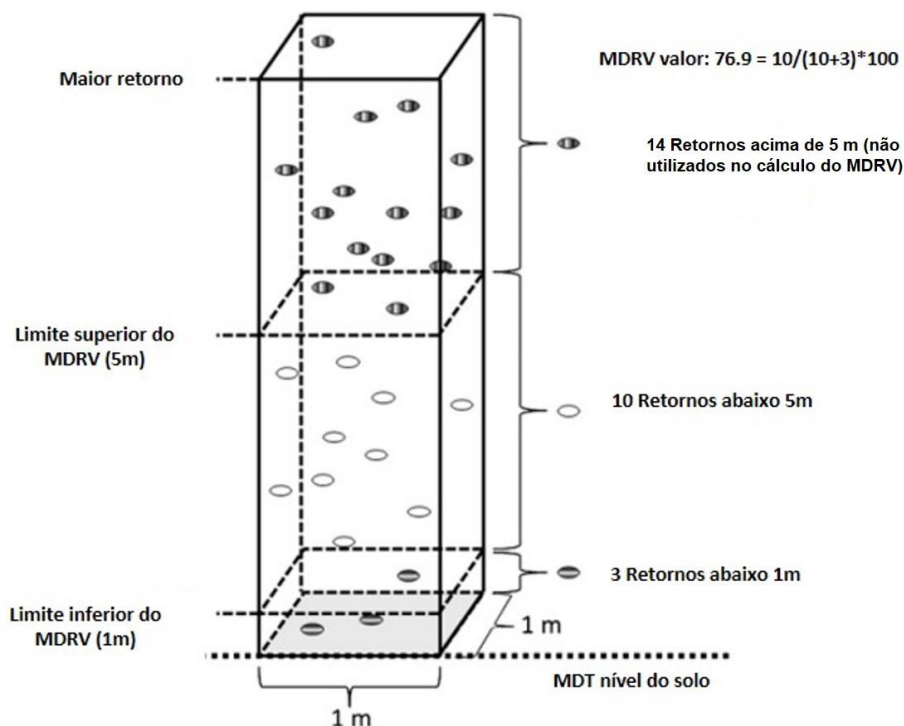


Figura 20: Representação gráfica do cálculo da densidade relativa de vegetação em cada célula do modelo. (adaptado de d'Oliveira et al., 2012).

O valor de 76,9 do pixel, indica um sub-bosque intacto com pouco ou nenhum distúrbio na vegetação no estrato entre 1 e 5 m. Se não há retornos no estrato entre 1-5 m e 3 retornos no estrato entre 1 e 0 m, o valor do RDM será zero, indicando ausência de sub-bosque. Na imagem essas áreas são representadas por pixels com valor semelhante a zero. Se não há retornos no estrato de 0-1 m e no estrato de 1-5m o valor do RDM seria indefinido (“no data”), indicando que a cobertura vegetal acima do limite de altura do estrato é muito densa e bloqueia a passagem dos feixes de laser (d'OLIVEIRA et al., 2012).

3.7. Extração das métricas da nuvem de pontos

Antes de extrair as métricas da nuvem de pontos, é necessário recortar os dados contidos nas parcelas amostradas em campo e normalizar as alturas nestes arquivos para remover a variação topográfica. Após esta etapa, são geradas as estatísticas descritivas da nuvem de pontos usando os retornos acima de 1 m. A altura mínima de 1 m foi usada para reduzir o ruído causado pela vegetação rasteira ou imperfeições causadas pela filtragem da nuvem de pontos (d'OLIVEIRA et al., 2014). Estas etapas foram executadas no *Fusion* através dos comandos *Polyclipdata*, *Subtractground* e *CloudMetrics*.

É possível, através de um comando opcional (*strata:[#,#,...]*), contar os retornos e gerar

métricas para vários estratos com alturas diferentes. Os retornos são contados se sua altura é maior ou igual ao limite mais baixo definido e menor que o limite mais alto. O primeiro estrato contém pontos menores que o primeiro limite e o último estrato contém pontos maiores ou iguais ao último limite (McGAUGHEY, 2016). Foram definidos os seguintes estratos: 1-2 m; 2-4 m; 4-6 m; 6-8 m; 8-10 m; 10-12 m; 12-14 m; 14-16 m; 16-18 m; 18-20 m; 20-22 m; 22-24 m; 24-26 m; 26-28 m; 28-30 m e maior que 30 m.

4.Resultados e Discussões

4.1. Avaliação dos dados LiDAR (.las)

Na tabela 7 estão apresentados os resultados referentes à qualidade dos dados levantados. A densidade média de pontos, analisando-se tanto os pontos classificados como *Ground* como os classificados como vegetação, é de 8,78 pts/m². Entretanto, a média das porcentagens dos pontos classificados como *Ground* é de apenas 11,6%, indicando que a maior parte dos pontos é interceptada por outras superfícies antes de chegar ao solo. Nas Figuras 21 e 22 são apresentados os mapas de densidade gerados com a ferramenta *Catalog* no Fusion, para o arquivo que compreende a Área 1 de estudo.

Considerando a densidade de todos os retornos (ver Tabela 7), o aerolevanteamento para o Setor “A” possui uma boa quantidade de pts/m² (8,78). Segundo trabalho de Leitold et al. (2015b), para garantir produtos de qualidade, como os MDT, é sugerido um levantamento com uma densidade mínima de 4 pts/m², o que foi alcançado no levantamento realizado no Setor “A” do PARNA da Tijuca. Cerca de 60% da área que compreende o arquivo 286-d-iii-3.las (arquivo que cobre a área levantada em campo) tem uma densidade de pontos menor que 4 pts/m² (Figura 21). Entretanto, quando analisamos a Figura 22, apenas com pontos *Ground*, percebe-se uma menor porcentagem destes pontos. Ou seja, a densa cobertura vegetal encontrada na área dificulta a penetração dos pulsos de laser refletindo na menor densidade de pontos que chega ao solo e serão classificados como *Ground*.

Tabela 7: Propriedades dos arquivos .las do Setor “A”; em cinza o destaque para o arquivo que compõe a área do levantamento de campo e a média de cada uma das características analisadas.

	Elevação Máxima (m)	Elevação Mínima (m)	Total de Retornos	Densidade de retornos (pt/m²)	Total de pontos Ground	Total de pontos Low Vegetation	Total de pontos Medium Vegetation	Porcentagem de pontos Ground
286-d-i-1	468,44	88,54	10.227.007	8,26	935.186	208.522	9.083.299	9,14
286-d-i-2	472,85	124,90	10.065.599	8,21	2.417.961	602.562	7.045.076	24,02
286-d-i-3	471,70	89,64	8.330.210	6,75	2.869.038	671.589	4.789.582	34,44
286-d-i-4	511,77	127,78	8.726.700	7	419.339	143.744	8.163.617	4,81
286-d-i-5	542,72	162,11	7.189.414	5,92	182.781	78.635	6.927.998	2,54
286-d-i-6	738,36	318	9.456.515	7,67	2.903.815	501,124	6.051.576	30,71
286-d-ii-1	496,22	83,42	8.432.744	6,82	2.073.939	764.250	5.594.555	24,59
286-d-ii-2	384,70	25,48	7.553.076	6,44	1.823.279	328.789	5.401.008	24,14
286-d-ii-4	694,01	172,33	12.263.633	9,95	1.181.558	327.939	10.754.136	9,63
286-d-ii-5	472,79	29,71	9.458.825	7,67	1.630.271	648.856	7.179.698	17,24
286-d-iii-1	771,84	270,44	9.743.583	7,80	1.213.383	675.209	7.854.991	12,45
286-d-iii-2	93,61	360,49	9.231.121	7,59	252.164	97.368	8.881.589	2,73
286-d-iii-3	1026,15	496,01	11.403.195	9,24	905.585	494.044	10.003.566	7,94
286-d-iii-4	922,58	330,04	11.091.599	8,86	1.013.703	615.779	9.462.117	9,14
286-d-iii-5	991,09	504,30	12.758.039	10,47	318.791	146.962	12.292.286	2,50
286-d-iii-6	827,45	408,62	12.953.709	10,47	290.417	85.629	12.577.663	2,24
286-d-iv-1	862,88	389,01	14.272.593	11,57	657.935	253.456	13.361.202	4,61
286-d-iv-2	688,31	117,61	12.773.861	10,34	1.305.024	1.305.024	1.305.024	10,22
286-d-iv-4	826,98	319,73	14.215.711	11,49	391.401	141.977	13.682.333	2,75
286-d-iv-5	731,41	113,55	10.540.734	8,55	974.284	305.659	9.260.791	9,24
286-f-1	930,27	242,65	16.366.054	13,13	753.141	796.166	14.816.747	4,60
286-f-i-2	983,22	418,44	14.181.394	11,65	797.095	379.851	13.004.448	5,62
286-f-i-3	553,63	266,18	9.935.625	8,07	406.486	141.722	9.387.417	4,09,
286-f-i-4	648,63	88,02	9.757.183	7,89	470.164	416.441	8.870.578	4,82
286-f-ii-1	606	270,85	9.419.630	7,63	1.160.095	243.939	8.015.596	12,32
Média	702,3	232,71	10.813.91	8,78	1.093.87	415.01	8.950.08	11,6

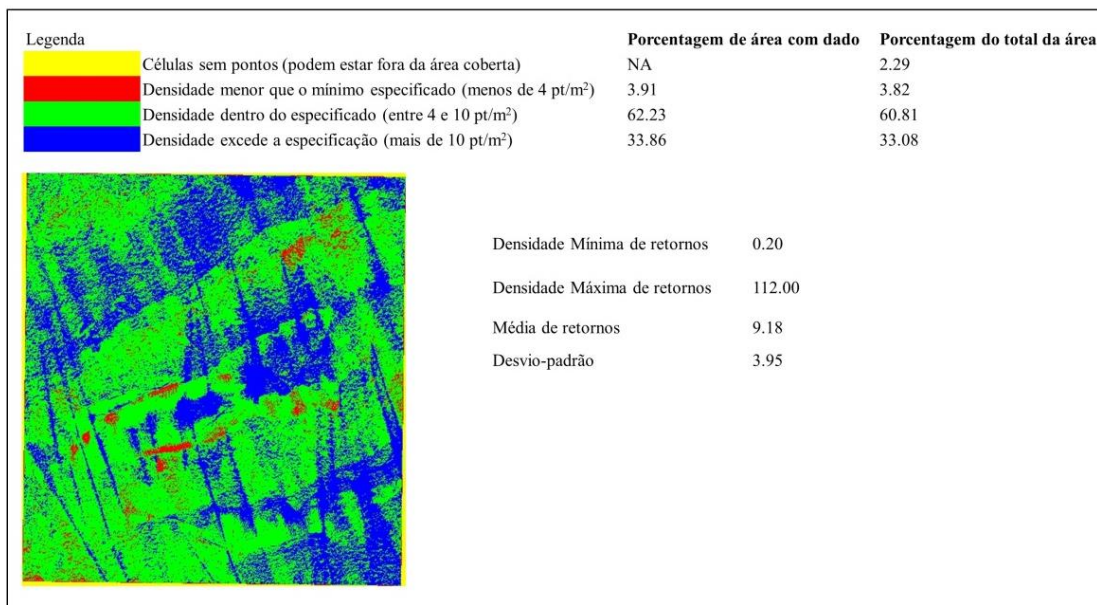


Figura 21: Mapa de densidade de todos os retornos do arquivo 286-d-iii-3.las, onde está localizada a área de estudo (Área 1), gerado pelo comando *Catalog*, no Fusion, considerando o valor da célula de 5 m² e a quantidade mínima e máxima de retornos de 4 e 10, respectivamente.

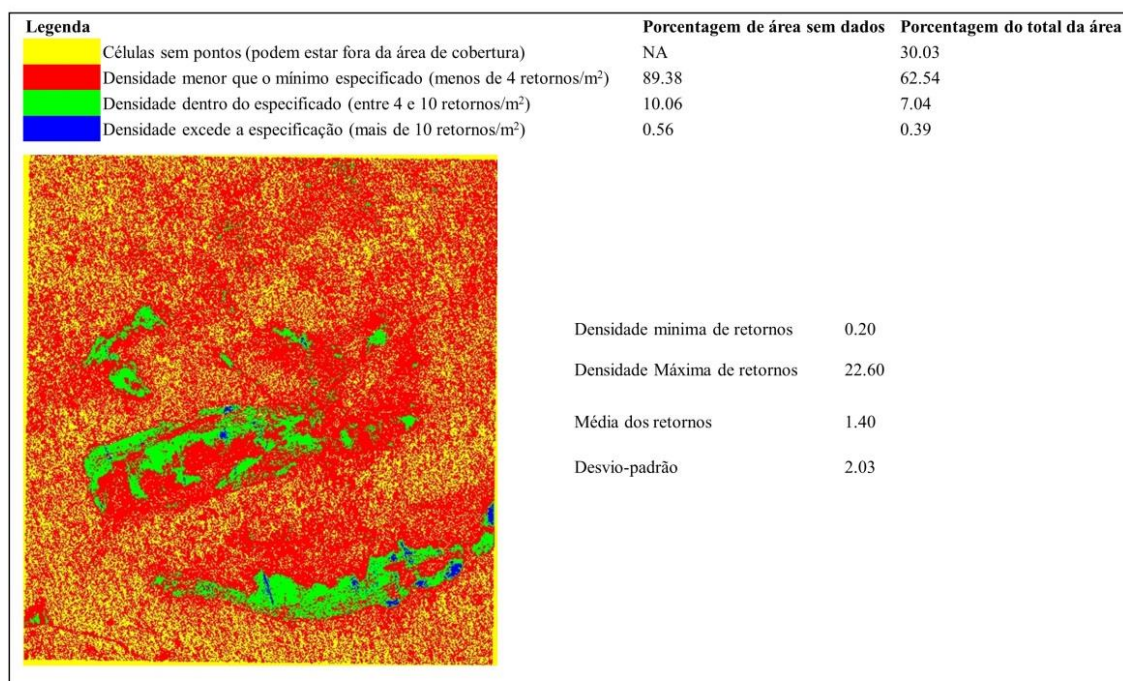


Figura 22: Mapa de densidade de retornos classificados como *Ground* do arquivo 286-d-iii-3.las gerado pelo comando *Catalog*, no Fusion, considerando o valor da célula de 5 m² e a quantidade mínima e máxima de retornos de 4 e 10, respectivamente

Analisando ainda os resultados do mapa de densidade gerado para toda área do Setor “A” elaborado a partir de células de 100 m² (Figura 23), percebe-se a presença de inúmeras áreas sem nenhum ponto classificado como *Ground*. Estas áreas são encontradas em locais de

cobertura vegetal densa. Por outro lado, as áreas de maior densidade de pontos classificados como *Ground* compreendem as áreas de solo exposto e afloramentos rochosos. Este resultado é o mesmo encontrado por Barbosa (2015), que desenvolveu trabalho em parte da Bacia do Rio Cachoeira inserida no Maciço da Tijuca, utilizando os mesmos dados desta Tese. Ao cruzar a densidade de pontos com o uso e cobertura da terra, o autor encontrou a presença de mais de 90% de cobertura florestal nas classes mais baixas de densidade de pontos (até 0,5 pts/m²), enquanto que as classes de densidade de pontos mais elevadas correspondiam a áreas de afloramento, solo exposto e edificações urbanas, onde os pulsos de laser não tiveram tanta interferência para chegar ao solo, propiciando uma melhor representação topográfica do terreno. Ainda segundo o autor, o retorno dos pulsos de laser classificados como *Ground* aumenta inversamente à presença da cobertura florestal, indicando que áreas florestadas dificultam o levantamento e interferem diretamente na qualidade do MDT, já que impedem o registro dos pontos relacionados ao terreno.

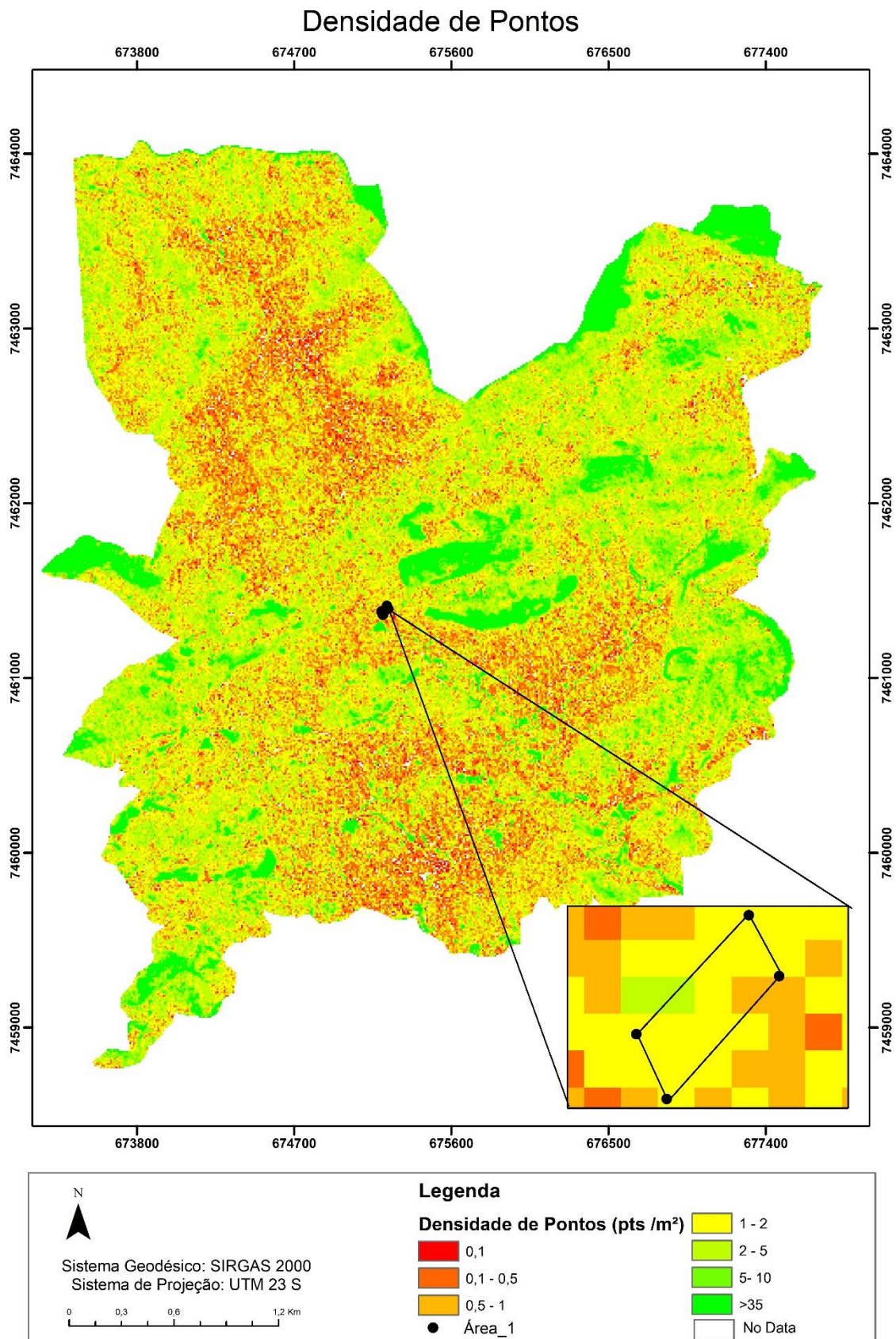


Figura 23: Mapa de densidade de pontos LiDAR classificados como *Ground* por m², no Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca e com detalhe na área de estudo (Área 1).

No entanto, especificamente na área em que foi realizado o levantamento de campo (Área 1 - parcela de 20x50m implantada em uma encosta do Setor “A”) com ET, apesar da presença de densa cobertura vegetal, a densidade de pontos classificados como *Ground* é alta. Este resultado pode ser reflexo das características do voo que prevê uma sobreposição de faixas de escaneamento de 53,4% (ver Tabela 3). Além desta sobreposição, a Área 1 está localizada numa área de sobreposição de quatro faixas (Figura 24), ocasionando uma maior emissão de feixes e aumentando as chances de que um maior número de pontos chegue ao solo, resultando numa maior densidade de pontos.

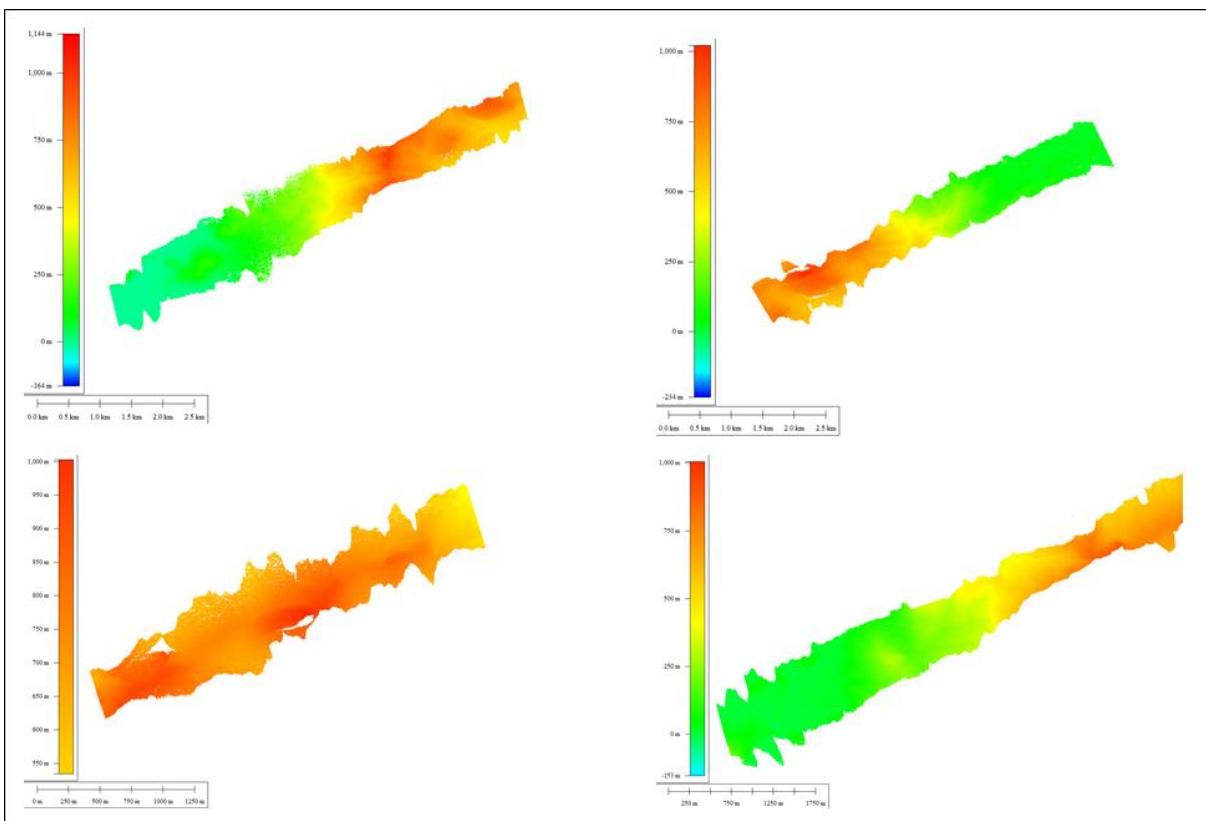


Figura 24: As quatro faixas do aerolevantamento com LiDAR que compreendem a área de estudo (Área 1) levantada em campo.

4.2. Avaliação da exatidão altimétrica dos MDT

Para cada valor de pixel (0,4; 1; 2; 5 e 10 m) foram gerados quatro MDT, a partir de dois métodos de interpolação em dois *softwares*, gerando um total de 20 modelos. A fim de facilitar a leitura da Tese é proposta uma abreviatura para cada um dos modelos gerado, a saber:

(a) MDT**Ft** (0,4;1;2;5;10) para os modelos gerados no Fusion através do comando *Tinsurfacecreate*, os números em parênteses representam o tamanho de pixel;

(b) MDT**Fg** (0,4;1;2;5;10) para os modelos gerados através do comando *Gridsurfacecreate*;

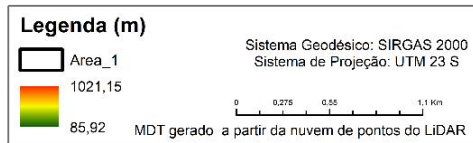
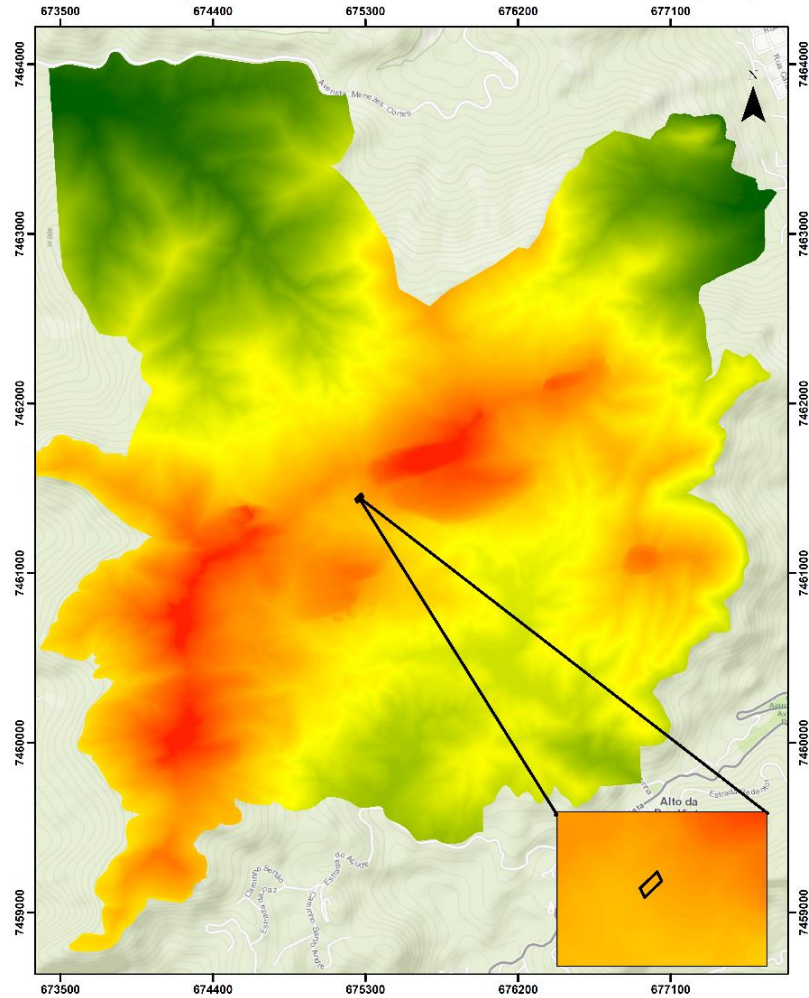
(c) MDT**Ab** (0,4;1;2;5;10) para os modelos gerados no *ArcGis* 10.3 pelo método *Binning*;

e

(d) MDT**At** (0,4;1;2;5;10) para os modelos gerados através do método *TIN*.

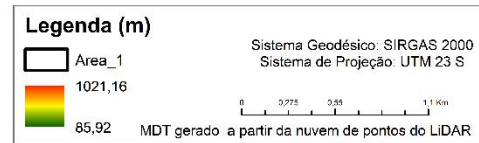
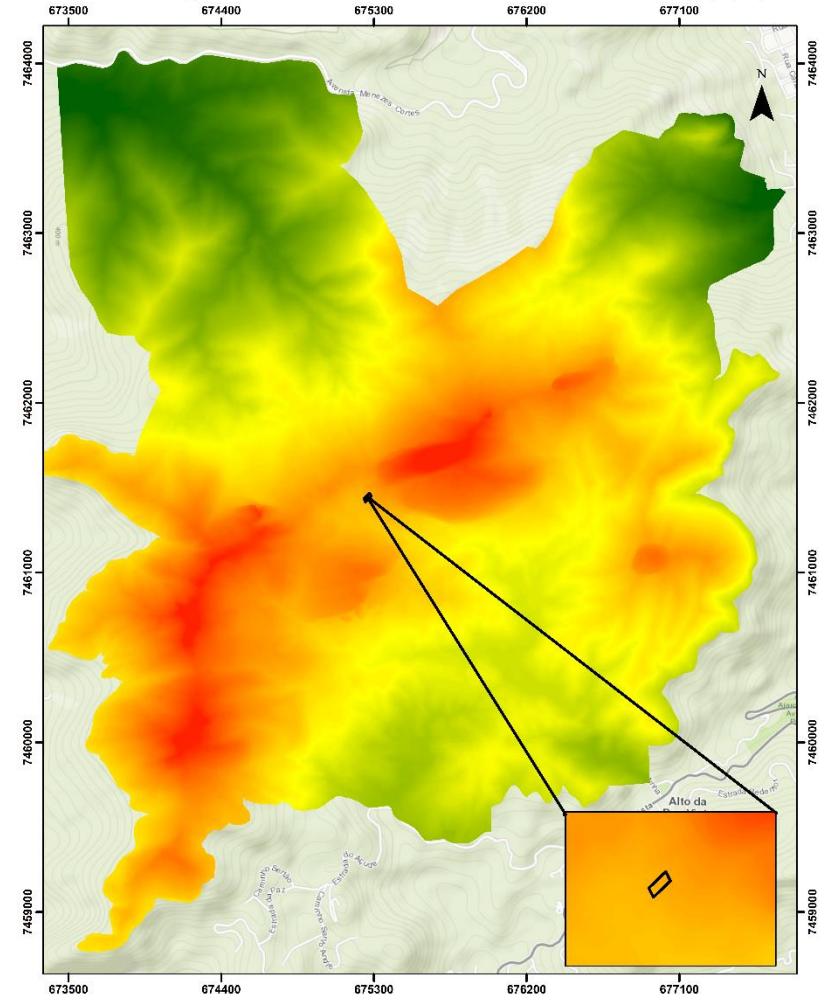
Na Figura 25, estão apresentados os modelos gerados a partir dos *softwares* Fusion e ArcGis 10.3 com os valores máximo e mínimo de altura encontrados.

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTFt(0,4)



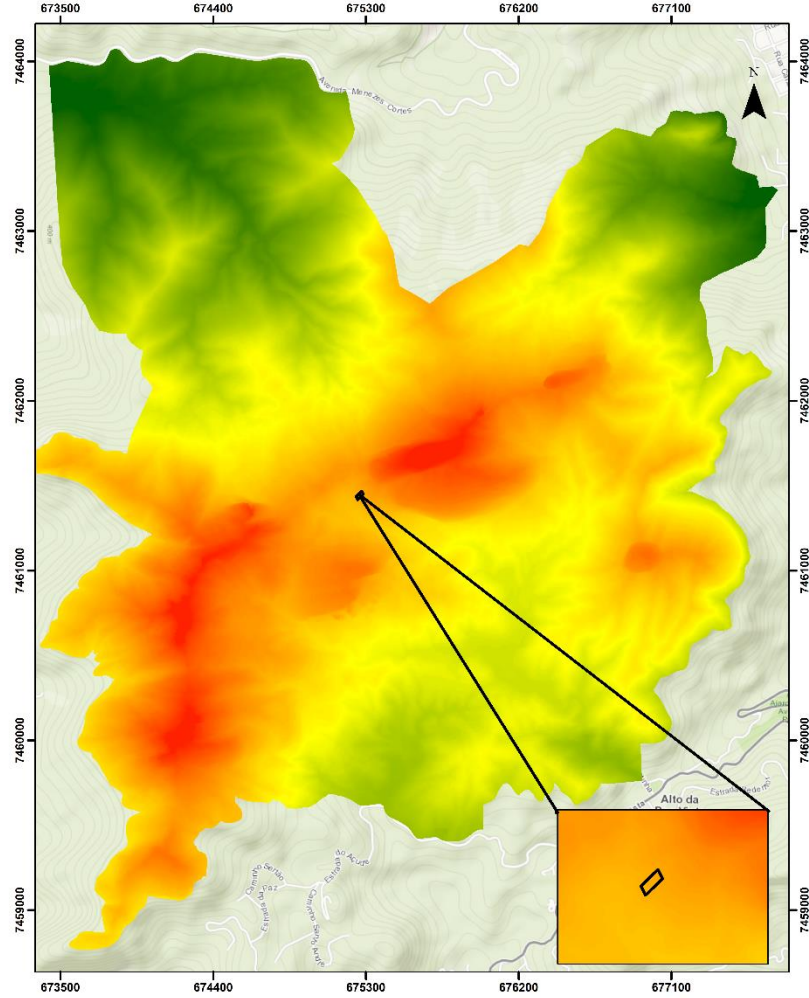
(a)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTFg(0,4)



(b)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAb(0,4)



Legenda (m)

Area_1
 1021,14
 85,95

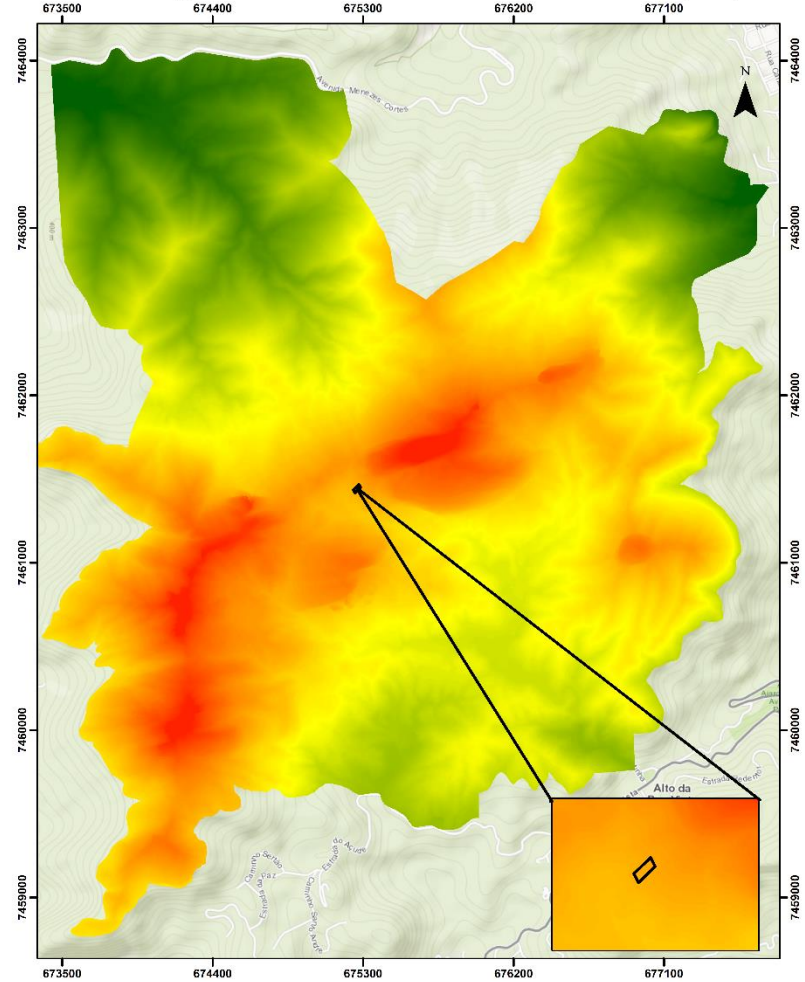
Sistema Geodésico: SIRGAS 2000
Sistema de Projeção: UTM 23 S

MDT gerado a partir da nuvem de pontos do LIDAR

0 0,275 0,55 1,1 Km

(c)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAt(0,4)



Legenda (m)

Area_1
 1021,13
 85,95

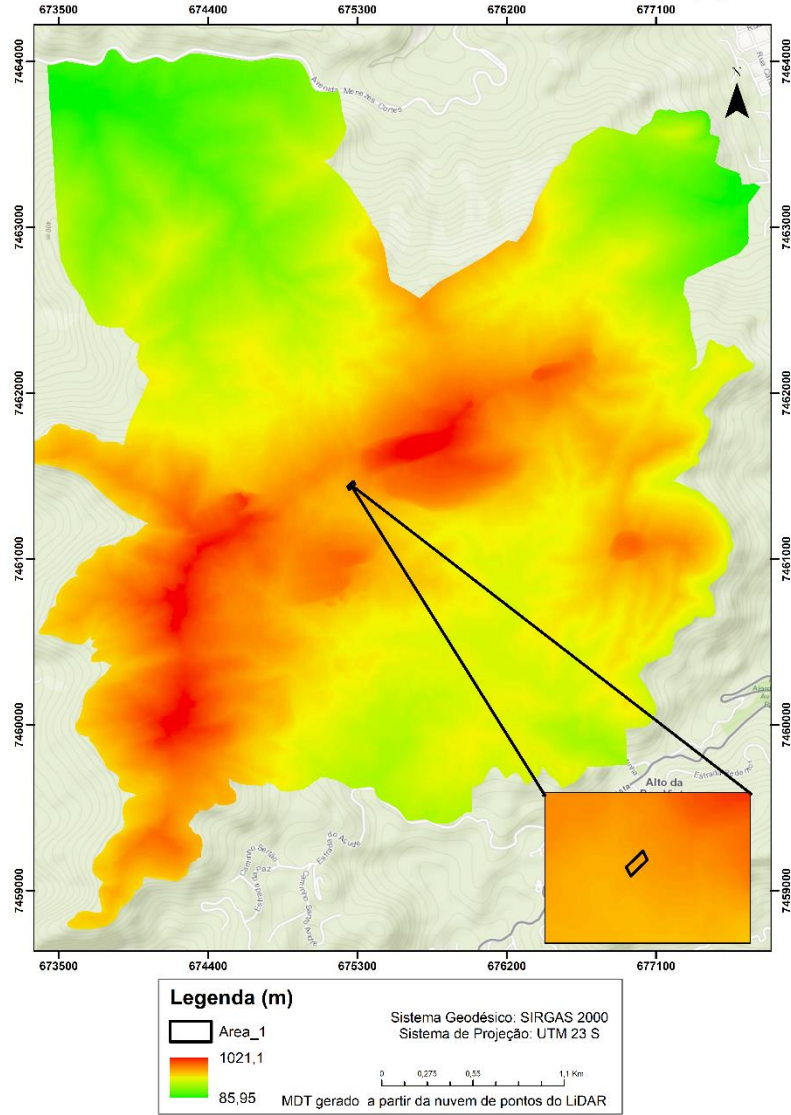
Sistema Geodésico: SIRGAS 2000
Sistema de Projeção: UTM 23 S

MDT gerado a partir da nuvem de pontos do LIDAR

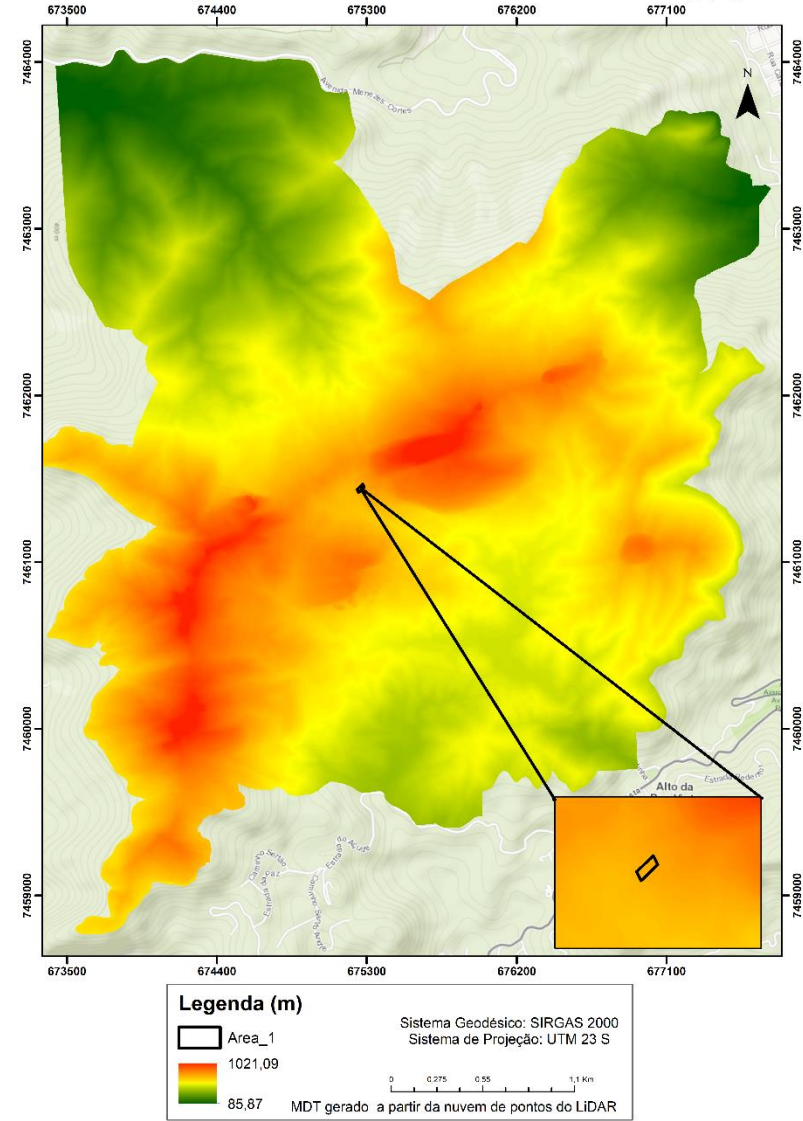
0 0,275 0,55 1,1 Km

(d)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTf(1)



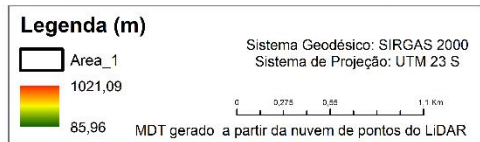
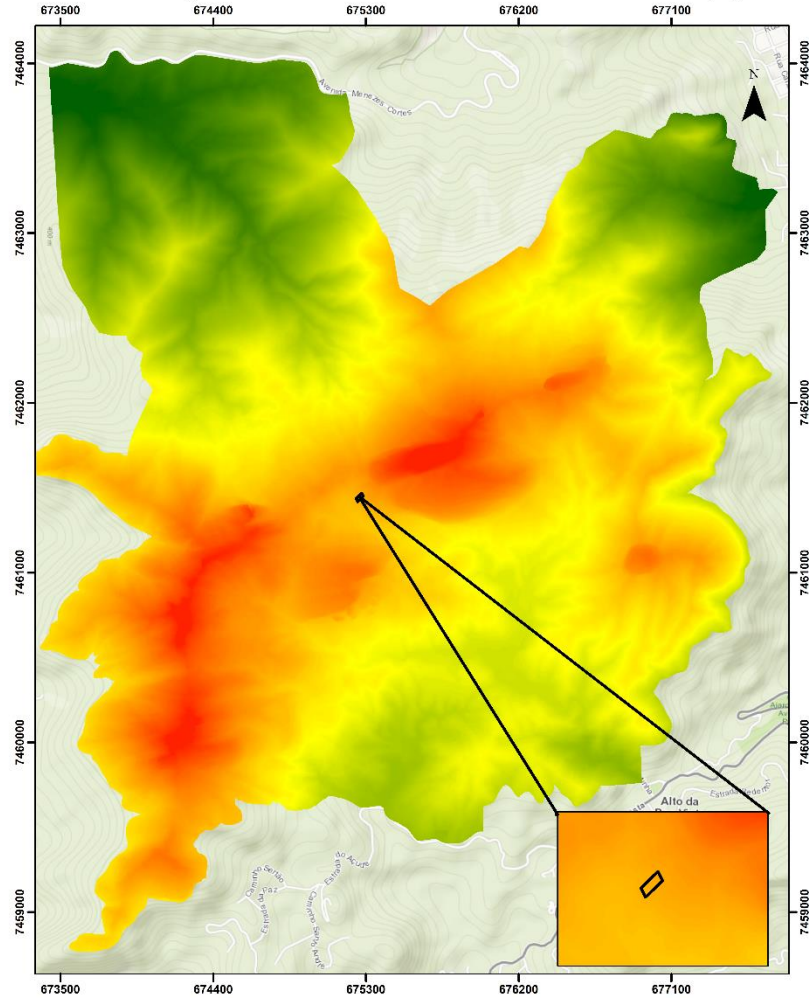
Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTfg(1)



(e)

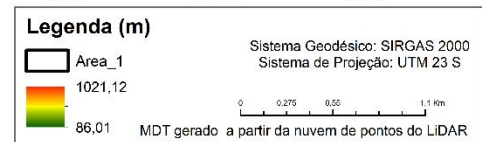
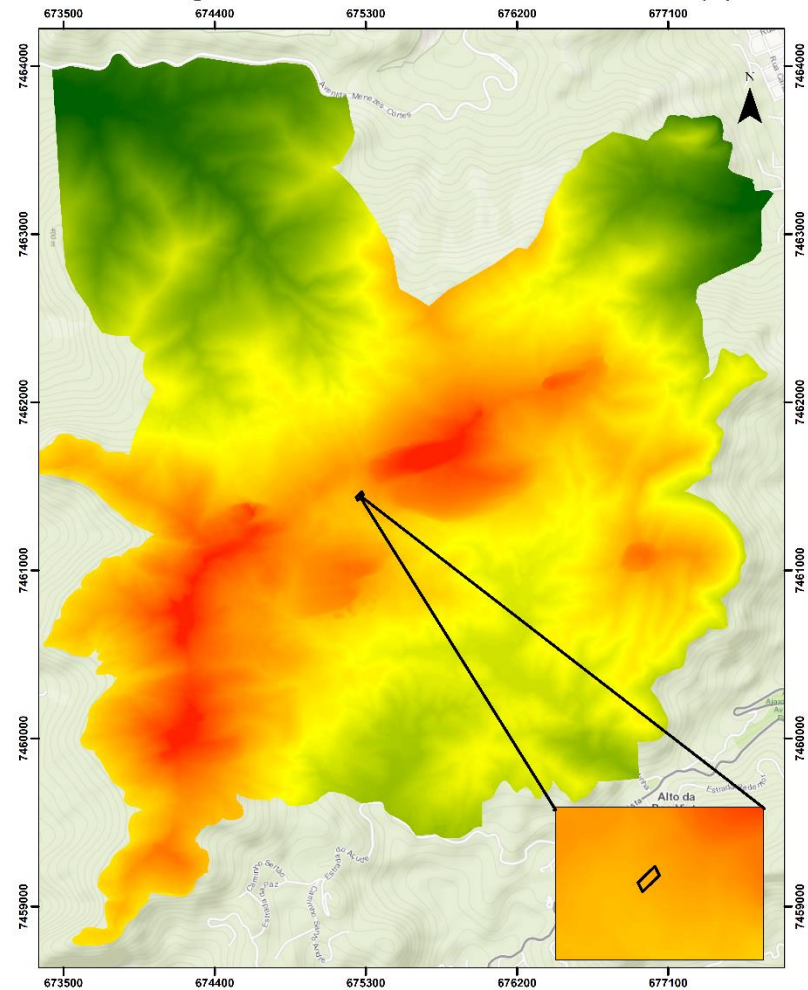
(f)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAb(1)



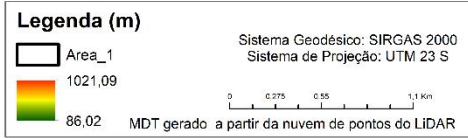
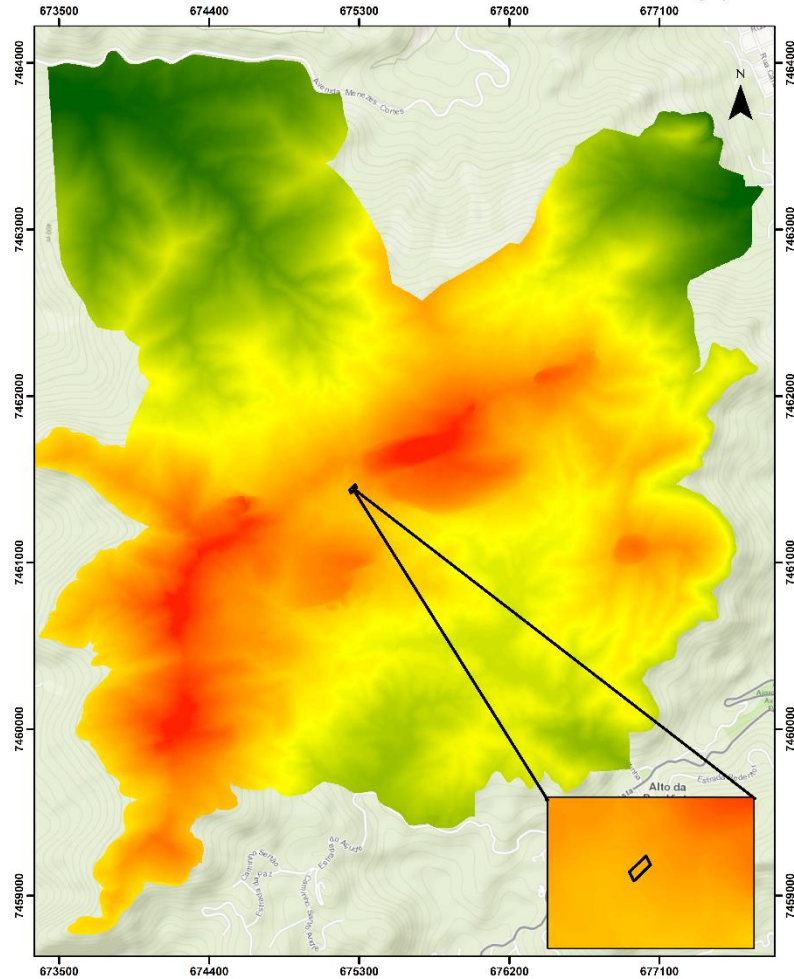
(g)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAt(1)

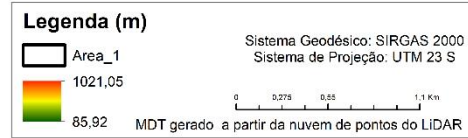
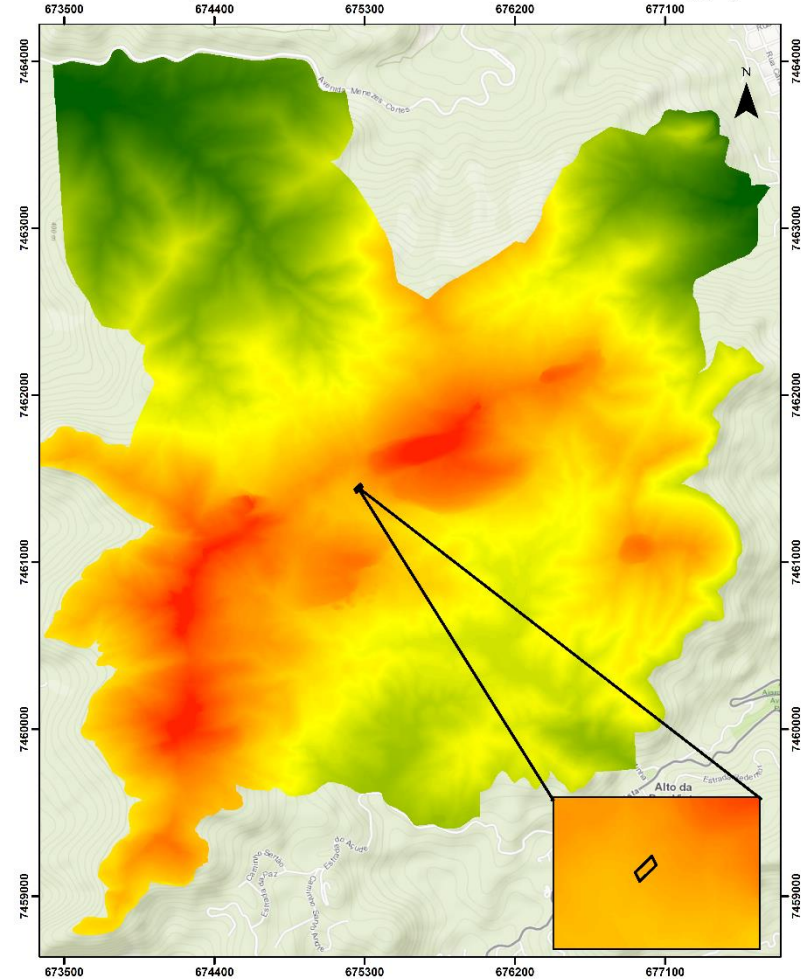


(h)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTf(2)



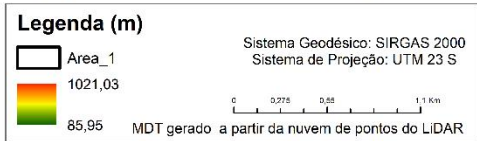
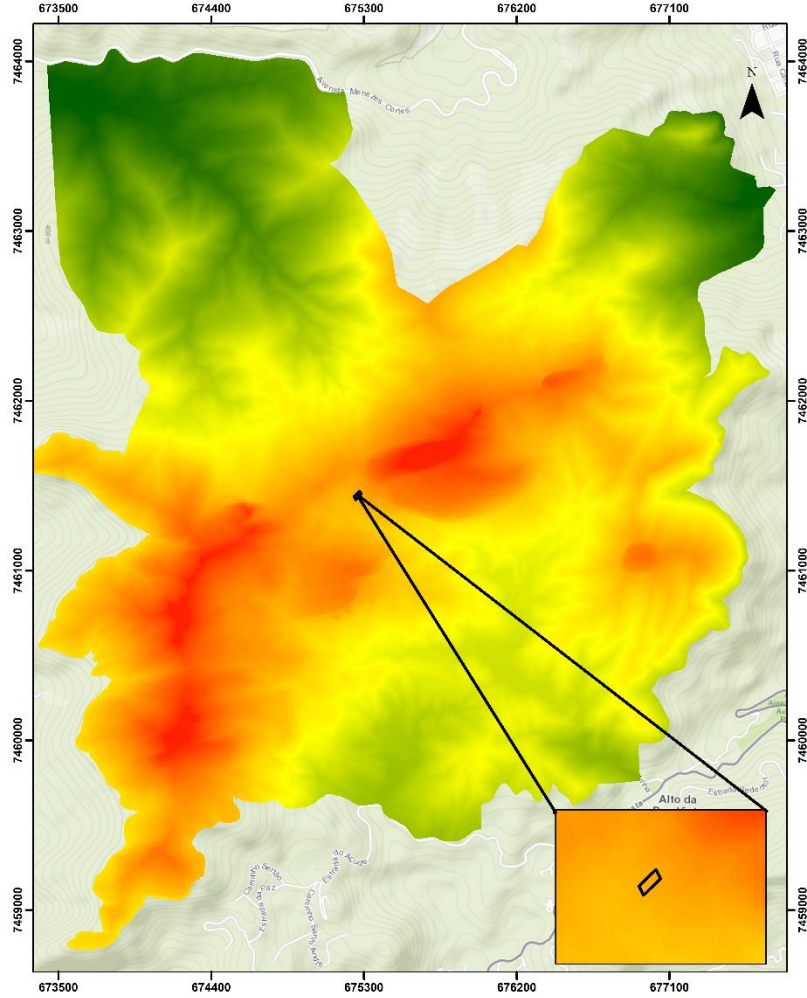
Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTfg(2)



(i)

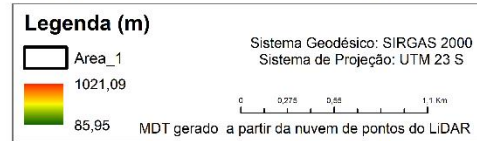
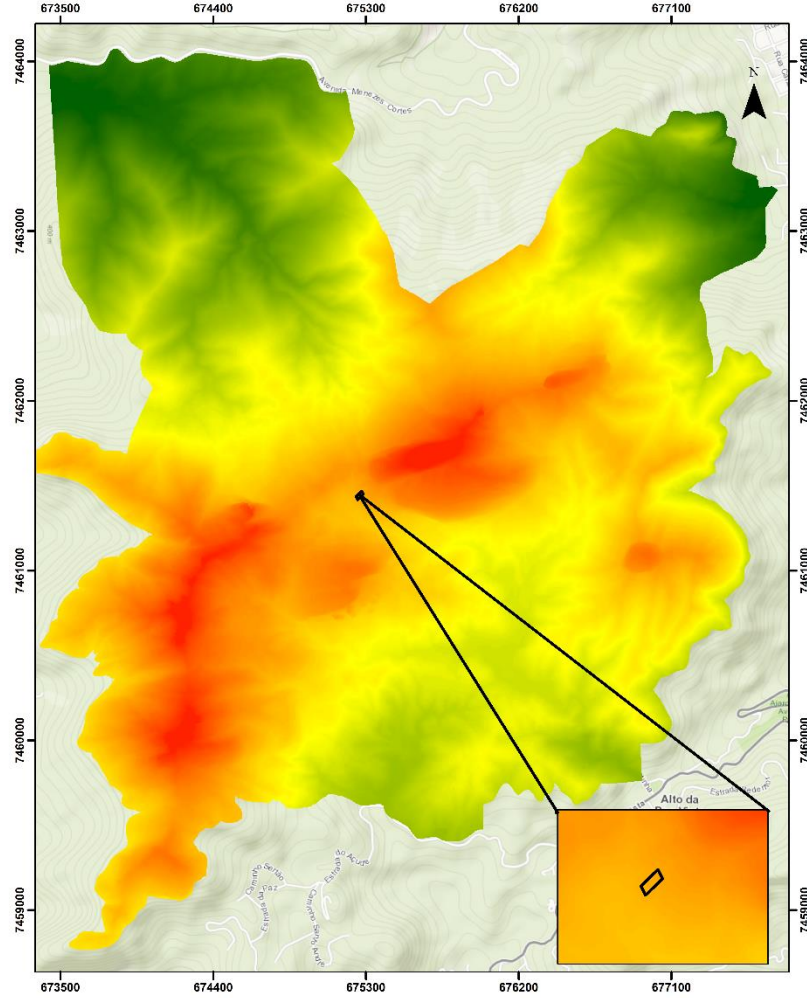
(j)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAb(2)



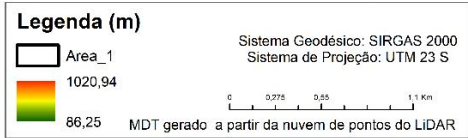
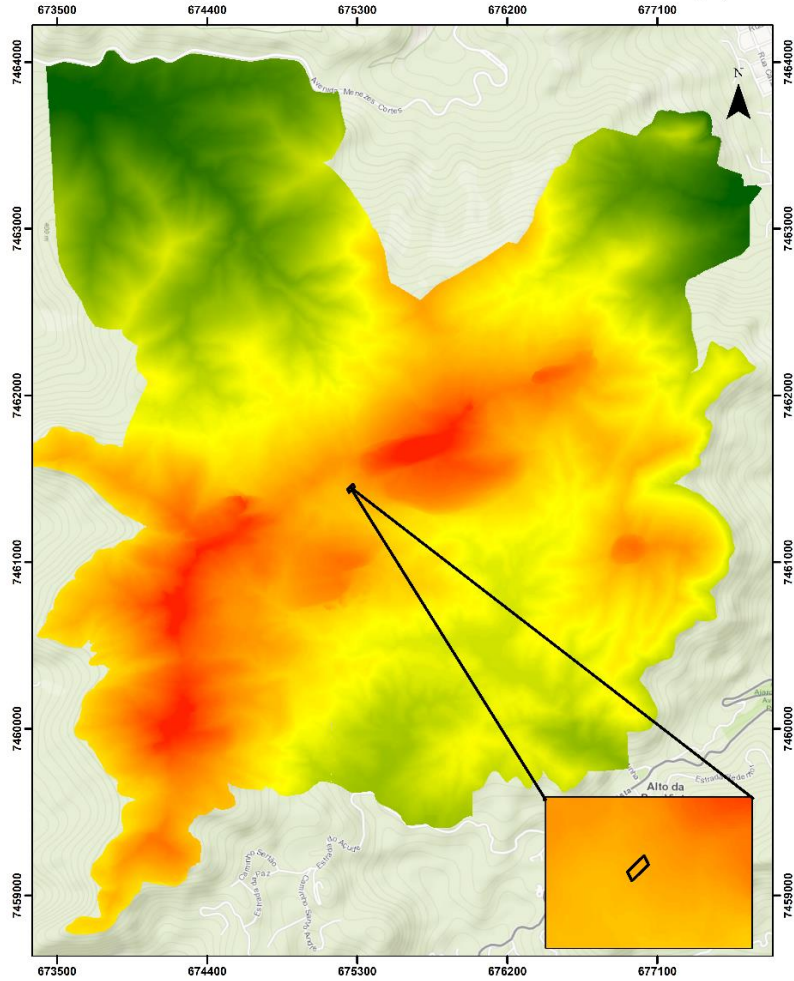
(k)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAt(2)



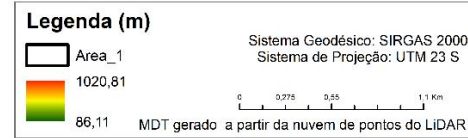
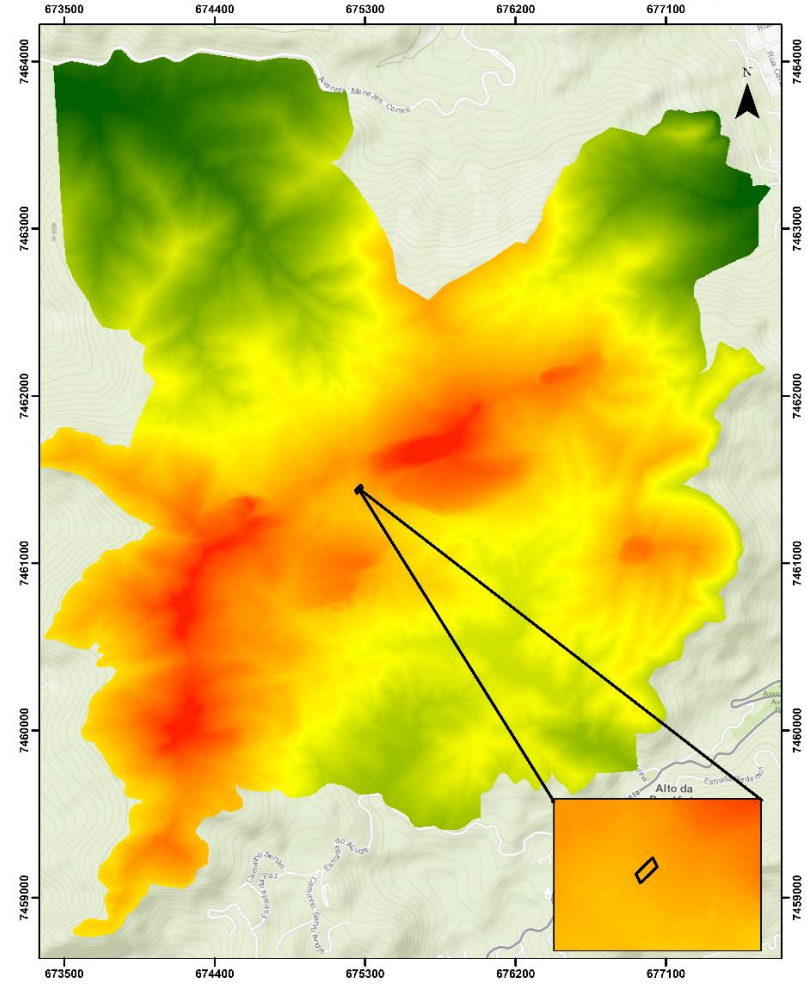
(l)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTFt(5)



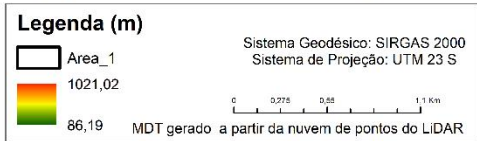
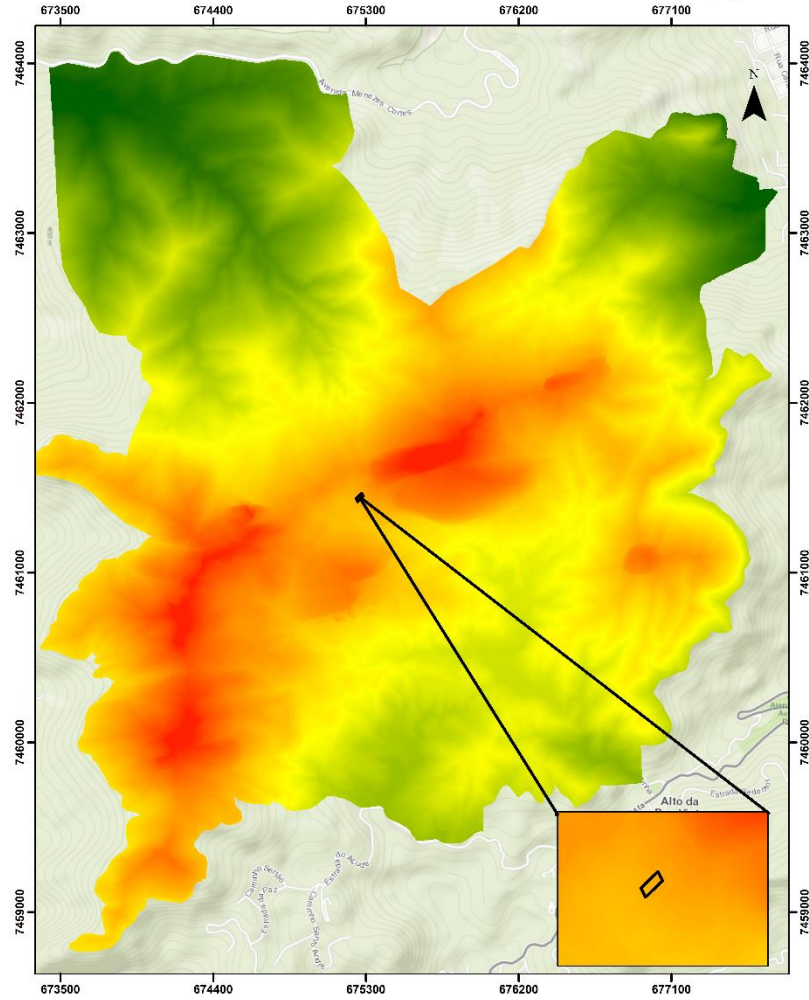
(m)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTFg(5)

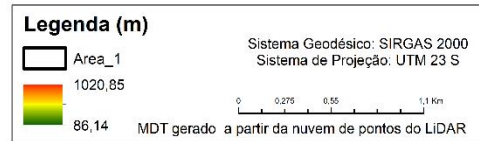
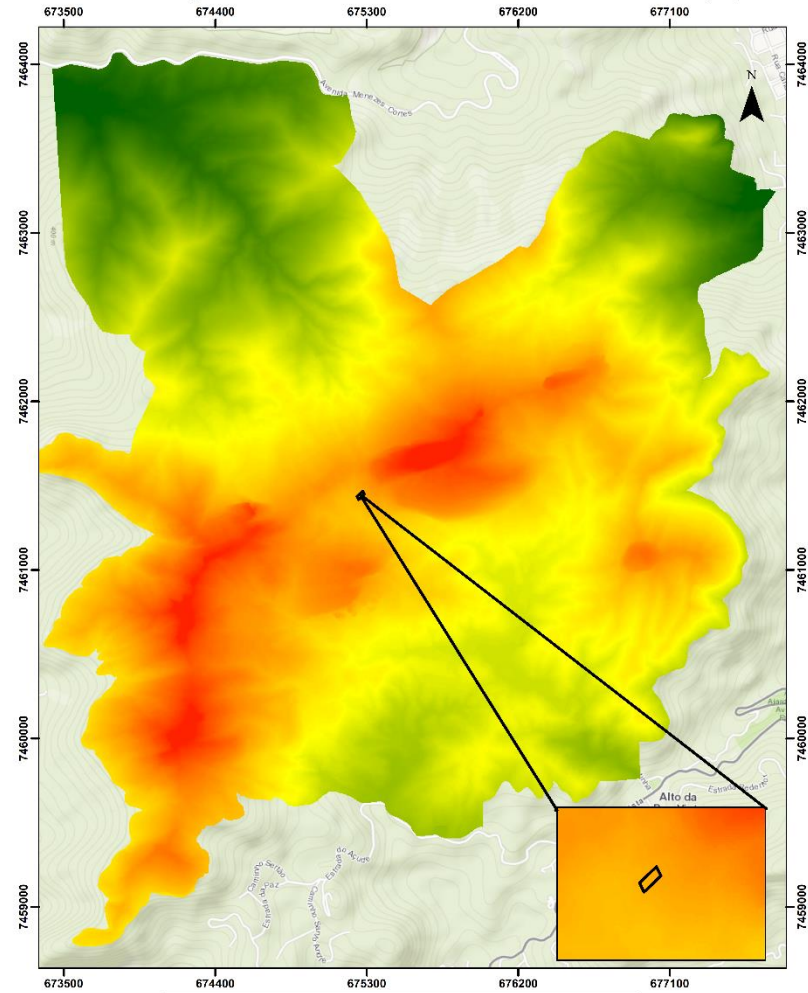


(n)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAt(5)



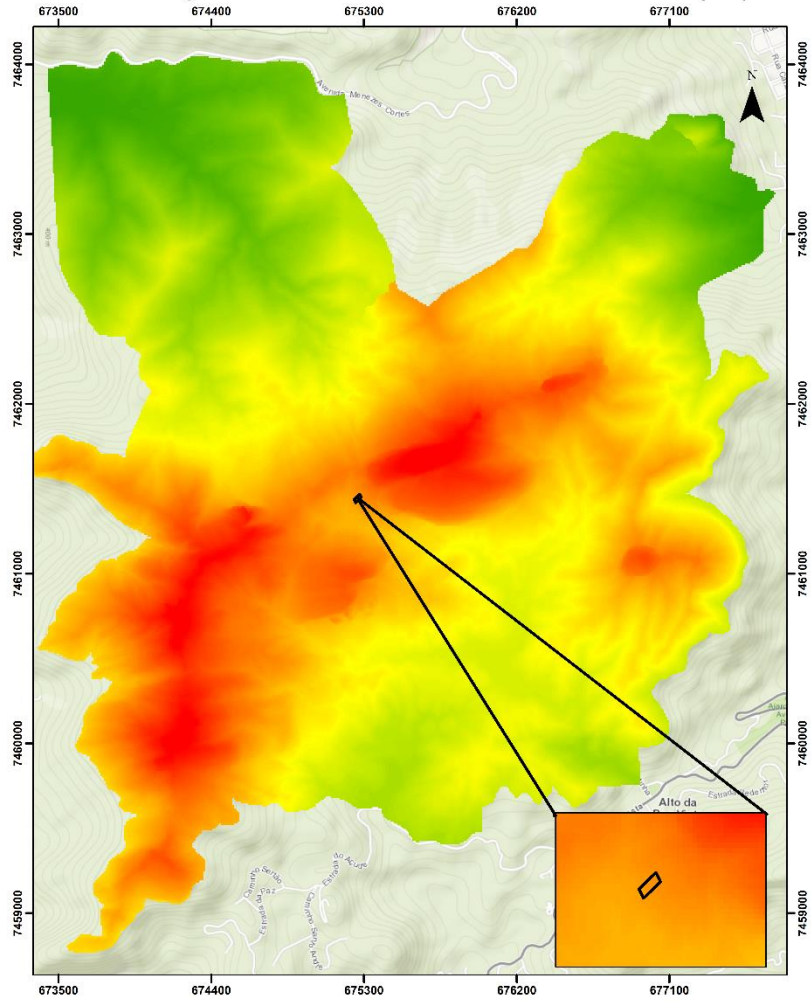
Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAb(5)



(o)

(p)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTFt(10)



Legenda (m)

Area_1

1020,94

89,27

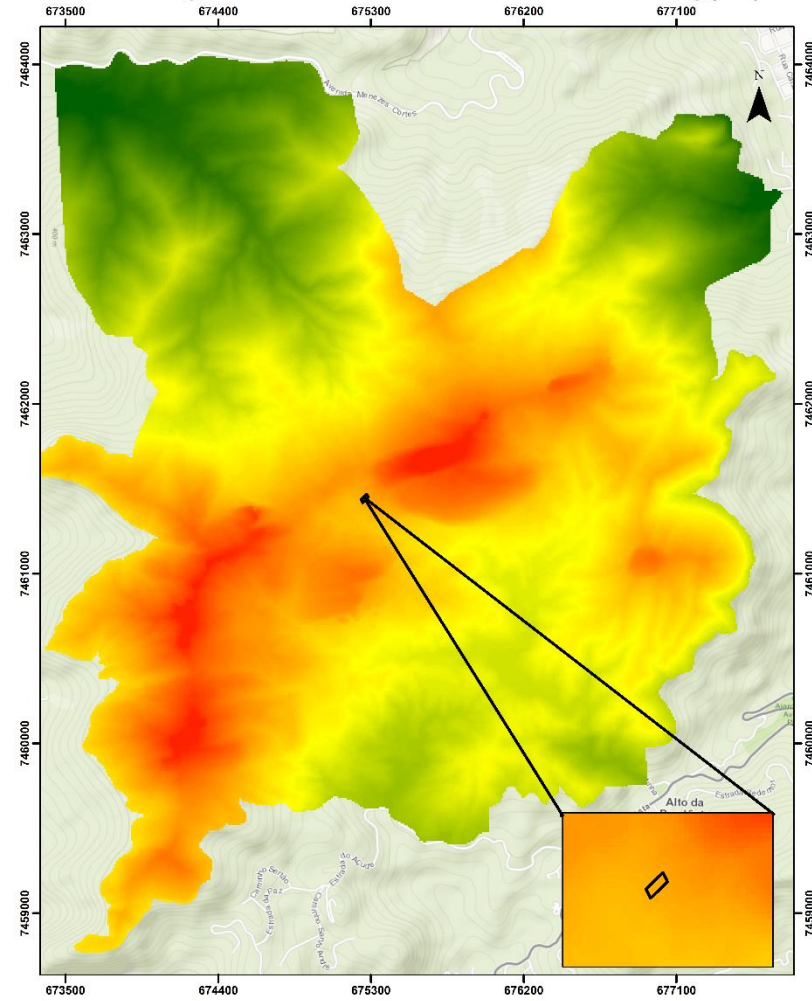
Sistema Geodésico: SIRGAS 2000
Sistema de Projeção: UTM 23 S

0 0,275 0,55 1,1 Km

MDT gerado a partir da nuvem de pontos do LiDAR

(q)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTFg(10)



Legenda (m)

Area_1

1020,57

87,91

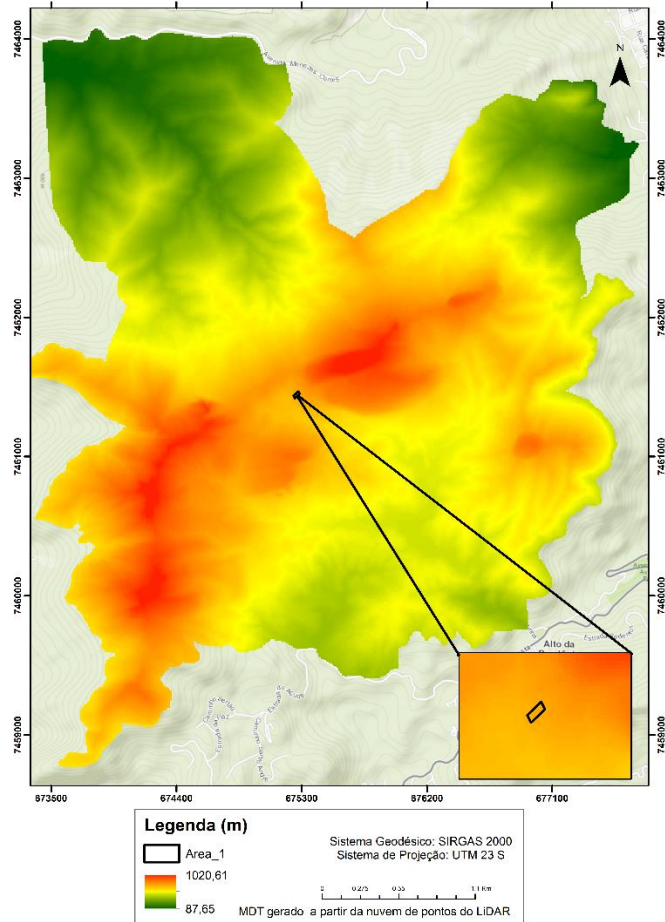
Sistema Geodésico: SIRGAS 2000
Sistema de Projeção: UTM 23 S

0 0,275 0,55 1,1 Km

MDT gerado a partir da nuvem de pontos do LiDAR

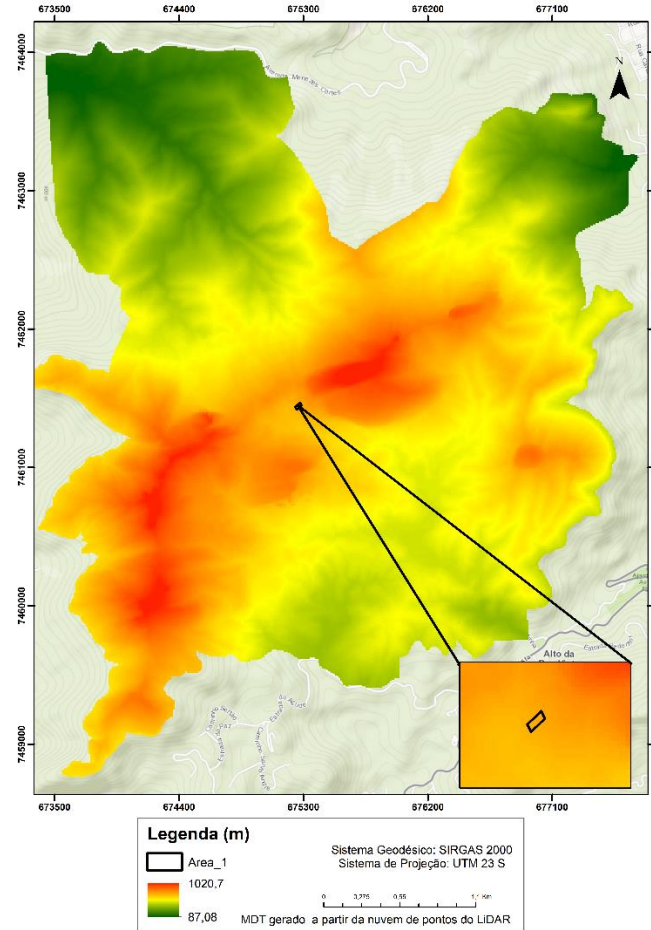
(r)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAb(10)



(s)

Modelo Digital de Terreno do Setor "A"- MDTAt(10)



(t)

Figura 25: Modelos Digitais do Terreno produzidos a partir de dados LiDAR do Setor A do PARNA da Tijuca utilizando diferentes valores de células, com detalhe para a área onde foi realizado o levantamento de 165 pontos com Estação Total: (a) MDTFt (0,4); (b) MDTFg (0,4); (c) MDTAb (0,4); (d) MDTAt (0,4); (e) MDTFt (1); (f) MDTFg (1); (g) MDTAb (1); (h) MDTAt (1); (i) MDTFt (2); (j) MDTFg (2); (k) MDTAb (2); (l) MDTAt (2); (m) MDTFt (5); (n) MDTFg (5); (o) MDTAt(5); (p) MDTAb (5); (q) MDTFt (10); (r) MDTFg (10); (s) MDTAb (10); (t) MDTAt (10).

Quando analisamos as alturas máxima e mínima dos MDT em cada um dos métodos, e considerando os diferentes valores de pixel (0,4;1;2;5; e10), percebemos uma variação pequena nas alturas máximas e mínimas encontradas. As alturas mínimas variaram de 85,87 m no MDT $Fg(1)$ até 89,27 m no MDT $Ft(10)$. Estas diferenças encontradas, provavelmente, estão relacionadas aos métodos de interpolação utilizados e aos tamanhos de pixel previamente definidos. Por outro lado, as alturas máximas variaram de, 1.021,16 m no MDT $Fg(0,4)$ até 1.020,57 m através desta mesma metodologia, mas com pixel de 10 m (MDT $Fg(10)$).

Alguns trabalhos avaliaram o uso de diferentes interpoladores na geração de modelos digitais de representação da superfície. Silva et al. (2013), avaliaram três métodos de interpolação (Krigagem, IDW-*Inverse Distance Weighted*, e vizinho mais próximo) para geração de MDT derivados do LiDAR. A área de estudo compreende uma floresta composta por espécies de coníferas, no oeste do estado de Washington (EUA). Os resultados obtidos foram comparados com os dados da carta topográfica. Os interpoladores que apresentaram melhores resultados, estavam associados com o uso da krigagem e inverso da distância. Lima et al. (2016), avaliaram métodos de interpolação mais adequados para geração de MDE de precisão em zonas costeiras de alta dinâmica sedimentar, obtidos pelo posicionamento relativo cinemático do GPS. Foram avaliados os interpoladores IDW, Krigagem, *Spline*, TIN, *Topo to Raster*, *Trend* e Vizinho natural. Segundo os autores, o MDE gerado pelo TIN foi o único livre de tendência e classificado como classe A, em termos de precisão e acurácia, para um nível de confiança de 90%. Neste sentido, avaliações de altimetria de produtos gerados pela tecnologia LiDAR se tornam fundamentais para garantir a qualidade final dos produtos gerados e a não propagação de erros, por exemplo, na estimativa da biomassa (e.g. LEITOLD et al., 2015b).

A seguir, é apresentada a avaliação altimétrica dos modelos gerados. No Anexo 4 são apresentadas as detalhadas referente a metodologia de Vieira & Genro (2013) para cada um dos MDT gerados.

4.2.1. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 0,4 m

A análise de exatidão altimétrica dos MDT indica que dos quatro métodos analisados o que teve pior comportamento foi o MDT**Fg** (Tabela 8). Este produto foi enquadrado, somente, na escala 1:5.000 e apresentou a maior diferença de altura (2,67 m) quando comparado com os pontos levantados por Estação Total (ET), tendo a acurácia estimada em 1,53 m, de acordo com a metodologia proposta por Vieira e Genro (2013). Nos outros três modelos analisados as diferenças máximas de altura ficaram entre 0,9 m no MDT**At** e 0,98 m no MDT**Ft**. Estes resultados são muito parecidos e indicam que os métodos utilizados para interpolação tiveram desempenho semelhante.

Tabela 8: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 0,4 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.

Método /Software	Decreto Nº. 89.817/1984		ΔH	GEOPEC (SANTOS et al. 2016)		Vieira & Genro (2013)
	90%	EP		PEC-PCD da ET- CQDG	Análise de Tendência t _{tab} =1,652	Analogia ao PEC
MDT Ft	0,536	0,194	Mín. 0,003 Média: 0,041 Máx: 0,981	1:2.000 Classe C	t calc(h)=1,6378	0,59
	1:2.000 Classe B					1:2.000 Classe B
MDT Fg	1,303	0,495	Mín. 0,002 Média: -0,164 Máx: 2,67	1:5.000 Classe D	*t calc(h)=-2,4831	1,53
	1:5.000 Classe B					1:5.000 Classe C
MDT At	0,517	0,188	Mín:0,004 Média: 0,057 Máx:0,89	1:2.000 Classe C	t calc(h)=2,3602	0,57
	1:2.000 Classe B					1:2.000 Classe B
MDT Ab	0,527	0,191	Mín: 0,001 Média: 0,061 Máx: 0,9	1:2.000 Classe C	t calc(h)=2,4415	0,58
	1:2.000 Classe B					1:2.000 Classe B

*Amostra não-normal. Todos os valores estão em metros.

Em termos de acurácia, o melhor resultado foi obtido no MDT**At** (0,517 m-considerando LE90 e 0,57 m de acordo com Vieira e Genro, op. cit.) no entanto, este modelo apresentou tendência. O MDT**Ft** e o MDT**Ab** apresentaram acurácia de 0,59 m e 0,58 m, respectivamente, sendo que o MDT**Ab** também apresentou tendência. Nestes casos, observando-se a média das diferenças altimétricas entre as observações de campo e os MDT, verifica-se que as mesmas se afastam do zero sendo encontrado o valor de -0,164 m para o MDT**Fg**, 0,057 m para o MDT**At**

e 0,061 m para o MDT**Ab**.

Já era esperado que a avaliação baseada em Santos et al. (2016), em função da maior rigidez dada pela ET-CQDG, encontraria um pior resultado para todos os MDT. Com exceção do MDT**Fg**, que passou a atender à escala 1:5.000 Classe D, os outros três modelos gerados passaram a atender à escala 1:2.000 Classe C.

Apesar da não-normalidade da amostra é possível perceber uma tendência em subestimar as alturas no MDT**Fg**, onde cerca de 60% dos pontos analisados apresentam uma diferença de altura menor que zero (Figura 26). A análise do gráfico de discrepância do MDT**Fg** permite visualizar, nitidamente, a tendência em subestimar a altura do modelo a partir da cota de 662 m. Nos outros dois modelos que apresentaram tendência (MDT**At** e MDT**Ab**), apesar de haver, a partir da cota 662 m também uma subestimação do valor de altura em parte dos pontos amostrados, no geral houve uma tendência em superestimar a altura.

Realizou-se nova análise, após correção dos valores dos MDT, pela soma desses erros sistemáticos (-0.164, 0,057 e 0,061 m) aos valores altimétricos de todos os pontos (offset). A análise do MDT**Fg**, após eliminação das tendências segundo Vieira & Genro (2013), permitiu aprovar os resultados, dados que o $t_{amostral}$ (-0,05) se encontra dentro do intervalo de confiança estabelecido. A acurácia estimada de 1,53m, quando comparada com a tolerância estabelecida para altimetria no PEC, substitui a indicação da escala 1:5.000 classe C (1,2 m) para 1:10.000 Classe A (2,5 m). A análise do MDT**At** após eliminação das tendências também permitiu aprovar os resultados, dados que o $t_{amostral}$ (0,02) se encontra dentro do intervalo de confiança estabelecido. A acurácia estimada de 0,56m, manteve a indicação da escala 1:2.000 classe B (0,6m). A análise do MDT**Ab**, após eliminação das tendências, também permitiu aprovar os resultados. O $t_{amostral}$ (-0,02) se encontra dentro do intervalo de confiança estabelecido, e a acurácia estimada de 0,57 m, quando comparada com a tolerância estabelecida para altimetria no PEC, ainda manteve a indicação da escala em 1:2.000 classe B (0,6 m).

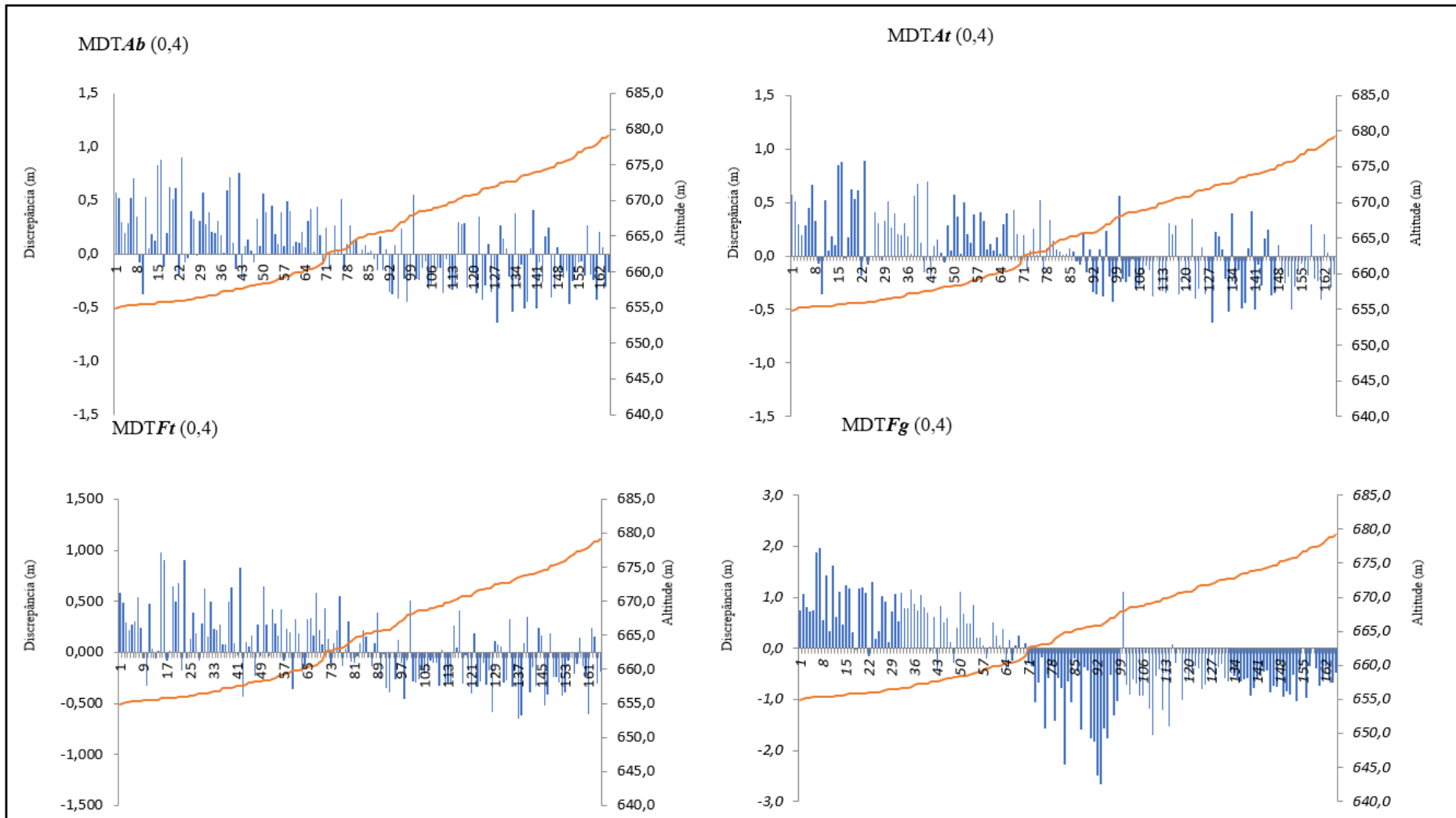


Figura 26: Gráficos de discrepância entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 0,4 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.

4.2.2. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 1 m

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da avaliação altimétrica para os MDT gerados com pixel de 1m. A análise de exatidão altimétrica dos MDT indica que, dos quatro métodos analisados, o que teve pior comportamento foi o MDT **Fg**. Este produto foi enquadrado, apenas, na escala 1:5.000 Classe B, e possui uma acurácia de 0,86 m segundo Vieira e Genro (2013). Apresenta, assim como no modelo com pixel de 0,4 m, uma não-normalidade na amostra, mas desta vez, sem tendência. O método de interpolação *Gridsurfacecreate*, não produziu bons resultados, quando considerados os valores de pixel de 0,4 e 1 m. Em ambas as situações, este método teve pior desempenho quando comparado com os demais.

Tabela 9: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 1 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.

Método/ Software	Decreto N ^o . 89.817/1984		ΔH	GEOPEC (Santos et al., 2016)		Vieira & Genro (2013)
	90%	EP		PEC-PCD da ET-CQDG	Análise de Tendência t _{tab} =1,652	Analogia ao PEC
MDT F_t	0,604	0,206	Mín.: 0,002	1:2.000 Classe D	t calc(h)=1,2535	0,63 1:2.000 Classe C
	1:2.000 Classe C		Média: 0,034 Máx: 0,991			
MDT F_g	0,762	0,272	Mín.: 0,001	1:5.000 Classe B	*t calc(h)=-0,0284	0,86 1:5.000 Classe A
	1:5.000 Classe A		Média -0,001 Máx: 1,368			
MDT A_t	0,526	0,196	Min:0,0	1:2.000 Classe C	t calc(h)=2,5403	0,60 1:2.000 Classe B
	1:2.000 Classe B		Média: 0,065 Máx:0,922			
MDT A_b	0,575	0,250	Mín: 0,001	1:2.000 Classe D	*t calc(h)=1,9526	0,75 1:2.000 Classe C
	1:2.000 Classe B		Média: 0,061 Máx: 1,737			

*Amostra não-normal. Todos os valores estão em metros.

A maior discrepância entre os pontos levantados por ET e seus homólogos nos modelos, foi encontrada no MDT A_b (1,737 m). O modelo gerado por este método, também apresentou tendência, uma vez que o tcalc no valor de 2,54 m, ficou acima do ttab (1,65 m). Como os dois modelos gerados pelo ArcGis apresentaram tendência, em termos de acurácia, o melhor resultado foi obtido no MDT F_t (0,604 m, considerando LE90 e 0,63 m de acordo com Vieira e Genro, 2013). Como encontrado na avaliação dos modelos com 0,4 m de pixel, a avaliação mais

rigorosa segundo Santos et al. (2016), enquadra o MDT **Ft** na escala 1:2.000 Classe C.

Na Figura 27 estão apresentadas as discrepâncias entre cada um dos modelos e os pontos de referência levantados por ET. Assim como nos modelos com pixel de 0,4 m, nos modelos com 1 m também é possível perceber que, com o aumento da cota de altura, há uma tendência em subestimar a altura real. Esta realidade é mais evidente no MDT **Fg**, onde a média da diferença de altura entre o MDT e a ET foi de -0,001 m.

Como houve tendência em alguns dos modelos gerados (MDT **At** e MDT **Ab**), realizou-se nova análise após correção dos valores do MDT pela soma dos erros sistemáticos (0,065 e 0,061 m) aos valores altimétricos de todos os pontos. A análise do MDT **At**, após eliminação das tendências, permitiu aprovar os resultados, dado que o $t_{amostral}$ (0,01) se encontra dentro do intervalo de confiança estabelecido. A acurácia estimada de 0,58 m, quando comparada com a tolerância estabelecida para altimetria no PEC, manteve a indicação da escala 1:2.000 classe B (0,6m).

A análise do MDT **At**, após eliminação das tendências, também permitiu aprovar os resultados, dados que o $t_{amostral}$ (0,01) se encontra dentro do intervalo de confiança estabelecido. A acurácia estimada de 0,74 m, quando comparada com a tolerância estabelecida para altimetria no PEC, mantém a indicação da escala 1:2.000 classe C (0,75 m).

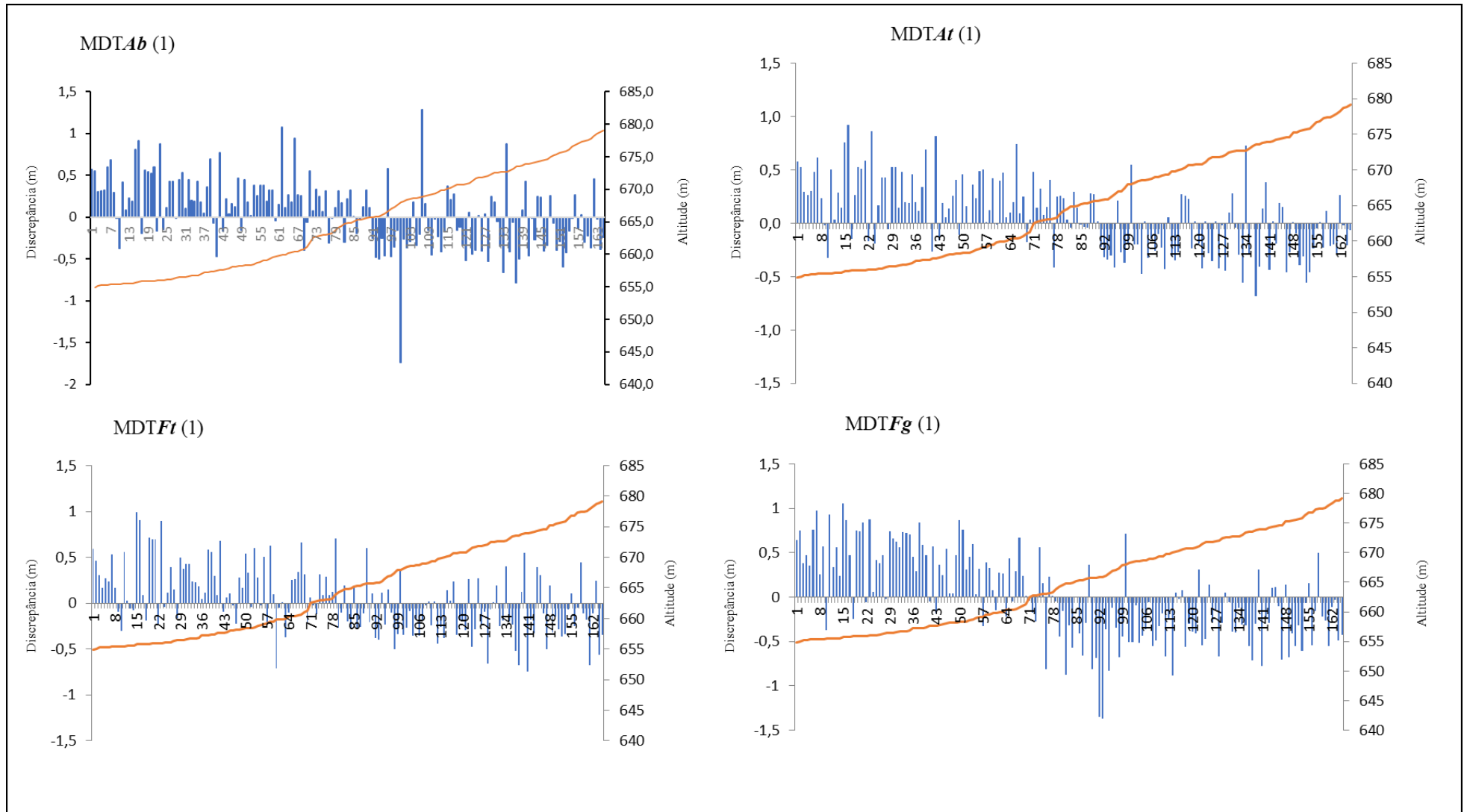


Figura 27: Gráficos de discrepância entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 1 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.

4.2.3. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 2 m

O MDT F_t foi enquadrado na escala 1:2.000 Classe D, segundo Santos et al. (2016), e 1:5.000 Classe A se considerado Vieira e Genro (2013). Já o MDT A_t , apresentou acurácia de 0,71 m, resultado melhor do que o encontrado no MDT F_g , o que levou os dois modelos a serem enquadrados na escala 1:5.000 Classe A (Vieira e Genro op.cit.). O MDT A_t , entretanto, apresenta uma tendência em superestimar as alturas, visto que a média da diferença entre os pontos levantados com ET e seus homólogos, ficou em torno de 0,08 m. Os MDT F_g e MDT A_b não apresentaram tendência e ambos foram enquadrados na escala 1:5.000 Classe B, segundo Santos et al. (2016). Em termos de acurácia o melhor resultado foi obtido no MDT F_t (0,699 m considerando LE90 e 0,77 m de acordo com Vieira e Genro (2013). Na Tabela 10 estão apresentados os resultados da avaliação altimétrica para os MDT gerados com pixel de 2 m.

Tabela 10: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 2 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.

Método/ Software	Decreto N ^o . 89.817/1984		ΔH	GEOPEC (Santos et al 2016)		Vieira & Genro (2013)
	90%	EP		PEC-PCD da ET-CQDG	Análise de Tendência t _{tab} =1,652	Analogia ao PEC
MDT F_t	0,699	0,247	Mín: 0,001 Média: 0,029 Máx: 0,969	1:2.000 Classe D	*t calc(h)=0,8497	0,77 1:5.000 Classe A
	1:2.000 Classe C					
MDT F_g	0,821	0,282	Mín: 0 Média :0,040 Máx: 1,265	1:5.000 Classe B	t calc(h)=0,679	0,90 1:5.000 Classe A
	1:5.000 Classe A					
MDT A_t	0,624	0,229	Min:0,002 Média:0,087 Máx:1,102	1:5.000 Classe B	*t calc(h)=2,8401	0,71 1:2.000 Classe C
	1:2.000 Classe C					
MDT A_b	0,812	0,299	Mín: 0,001 Média:-0,026 Máx:1,788	1:5.000 Classe B	t calc(h)=-0,6772	0,90 1:5.000 Classe A
	1:5.000 Classe A					

*Amostra não-normal. Todos os valores estão em metros.

Na Figura 28 são apresentadas as discrepâncias entre as medidas em campo e os seus

homólogos nos MDT. Assim como nos modelos com grid de 0,4 m e 1 m, há uma tendência em subestimar a altura a partir da cota de 662 m, mais visível no MDT**Ab** onde a média do ΔH foi de -0,026 m. No entanto, apesar deste resultado, o MDT**Ab** não apresentou tendência, uma vez que o $t_{calc.}(-0,6772 \text{ m})$ ficou abaixo do $t_{tab.} (1,652 \text{ m})$. Realizou-se nova análise após correção dos valores do MDT**At** pela soma dos erros sistemáticos (0,087 m), aos valores altimétricos de todos os pontos. A análise do MDT**At** após eliminação das tendências permitiu aprovar os resultados, dado que o $t_{amostral} (0,01)$ se encontra dentro do intervalo de confiança estabelecido. A acurácia estimada de 0,69 m, segundo metodologia de Vieira e Genro (2013), quando comparada com a tolerância estabelecida para altimetria no PEC, mantém a indicação da escala 1:2.000 classe C (0,75 m).

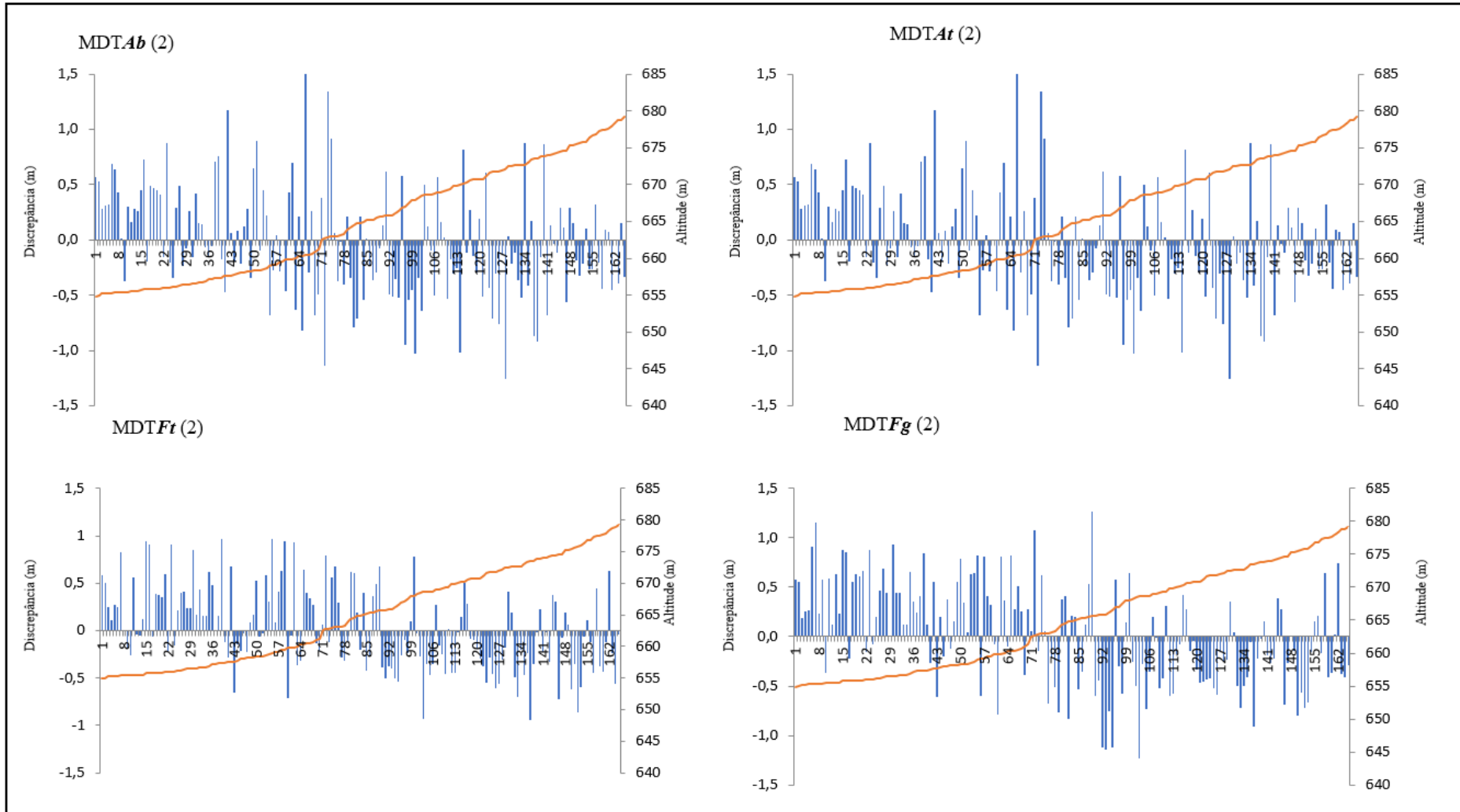


Figura 28: Gráficos de discrepância entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 2 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.

4.2.4. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 5 m

A análise de exatidão altimétrica dos MDT indica que, dos quatro métodos analisados, o que teve pior comportamento foi o MDT Fg (Tabela 11). Este produto foi enquadrado apenas na escala 1:10.000 classe A quando considerada a avaliação de Vieira e Genro (2013) e apresentou a maior diferença de altura (2,699 m) quando comparado com os pontos amostrados por ET. A acurácia deste modelo foi de 1,59 m segundo Vieira e Genro (op.cit.), acima da acurácia encontrada para os outros modelos que variaram entre 1,25 m no MDT At até 1,44 m no MDT Ft . Estes resultados enquadraram os outros três modelos na escala 1:5.000 Classe C. Em nenhum dos modelos foi encontrada tendência (Figura 29).

Tabela 11: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 5 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.

Método/ Software	Decreto N ^o . 89.817/1984		ΔH	GEOPEC (Santos et al 2016)		Vieira e Genro (2013)
	90%	EP		PEC-PCD da ET- CQDG	Análise de Tendência ttab=1,652	Analogia ao PEC
MDT Ft	1,396	0,485	Mín: 0,007	1:5.000 Classe D	t calc(h)=-0,0818	1,44 1:5.000 Classe C
	1:5.000 Classe C		Média: -0,083 Máx: 2,312			
MDT Fg	1,345	0,539	Mín:0,005	1:5.000 Classe D	t calc(h)=-1,2506	1,59 1:10.000 Classe A
	1:5.000 Classe C		Média:-0,083 Máx:2,699			
MDT At	1,159	0,410	Mín:0,01	1:5.000 Classe C	t calc(h)=0,4594	1,25 1:5.000 Classe C
	1:5.000 Classe B		Média:0,025 Máx:1,89			
MDT Ab	1,192	0,479	Mín: 0,003	1:5.000 Classe C	t calc(h)=-0,0362	1,43 1:5.000 Classe C
	1:5.000 Classe B		Média: -0,031 Máx:2,404			

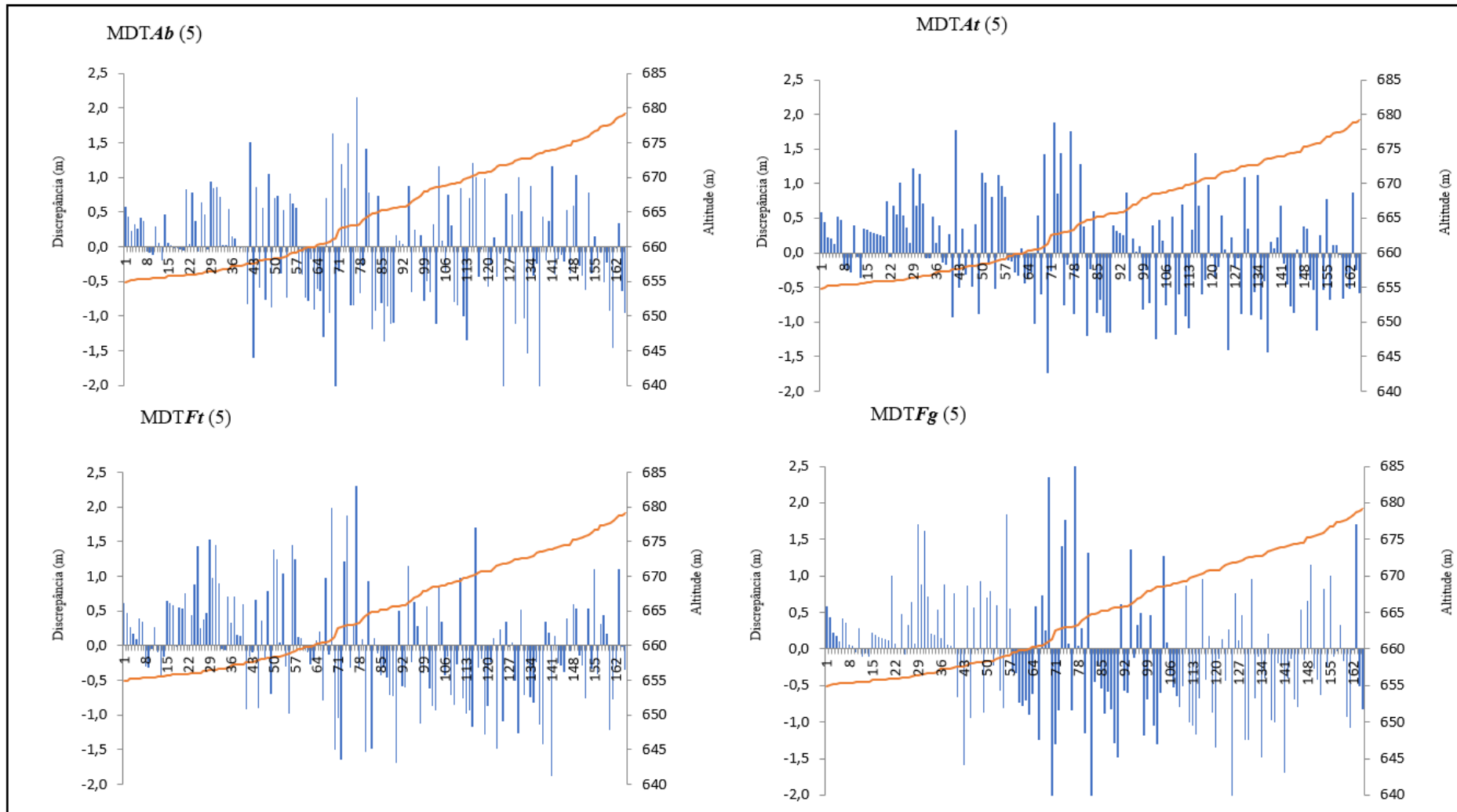


Figura 29: Gráficos de discrepância entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 5 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.

4.2.5. Avaliação altimétrica dos MDT com pixel de 10 m

A análise de exatidão altimétrica dos MDT indica que dos quatro métodos analisados o que teve pior comportamento, quando considerada a metodologia proposta por Vieira e Genro (2013), foi o MDT *Fg* (Tabela 12). Este produto foi enquadrado na escala 1:10.000 classe C, e apresentou a maior diferença de altura (4,92 m). Nenhum dos modelos apresentou tendência sendo importante destacar que, apesar da resolução espacial dos modelos, estes atendem à escala 1:25.0000 Classe A. A falta de tendência observadas nestes modelos também é percebida nos gráficos com as discrepâncias entre as observações de campo e os MDT (Figura 30).

Tabela 12: Tabela síntese da análise dos MDT derivados da nuvem de pontos LiDAR com pixels de 10 m baseados no PEC e em metodologia proposta por Santos et al. (2016) e Vieira e Genro (2013). ΔH =Diferença entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos em valores absolutos.

Método/ Software	Decreto Nº. 89.817/1984		ΔH	GEOPEC (Santos et al 2016)		Vieira & Genro (2013)
	90%	EP		PEC-PCD da ET- CQDG	Análise de Tendência ttab=1,652	Analogia ao PEC
MDT <i>Ft</i>	2,353	0,965	Mín. 0,005	1:10.000 Classe B	t calc(h)=0,5519	2,81 1:10.000 Classe B
	1:10.000 Classe A		Média: 0,064 Máx: 4,631			
MDT <i>Fg</i>	2,675	1,045	Mín. 0,016	1:10.000 Classe B	t calc(h)=1,5893	3,06 1:10.000 Classe C
	1:10.000 Classe B		Média:0,200 Máx: 4,942			
MDT <i>At</i>	2,421	0,872	Min:0,003	1:10.000 Classe B	t calc(h)=0,5682	2,60 1:10.000 Classe B
	1:10.000 Classe A		Média:0,062 Máx:3,887			
MDT <i>Ab</i>	2,442	0,871	Mín: 0,001	1:10.000 Classe B	t calc(h)=-0,0362	2,60 1:10.000 Classe B
	1:10.000 Classe A		Média: -0,004 Máx:4,367			

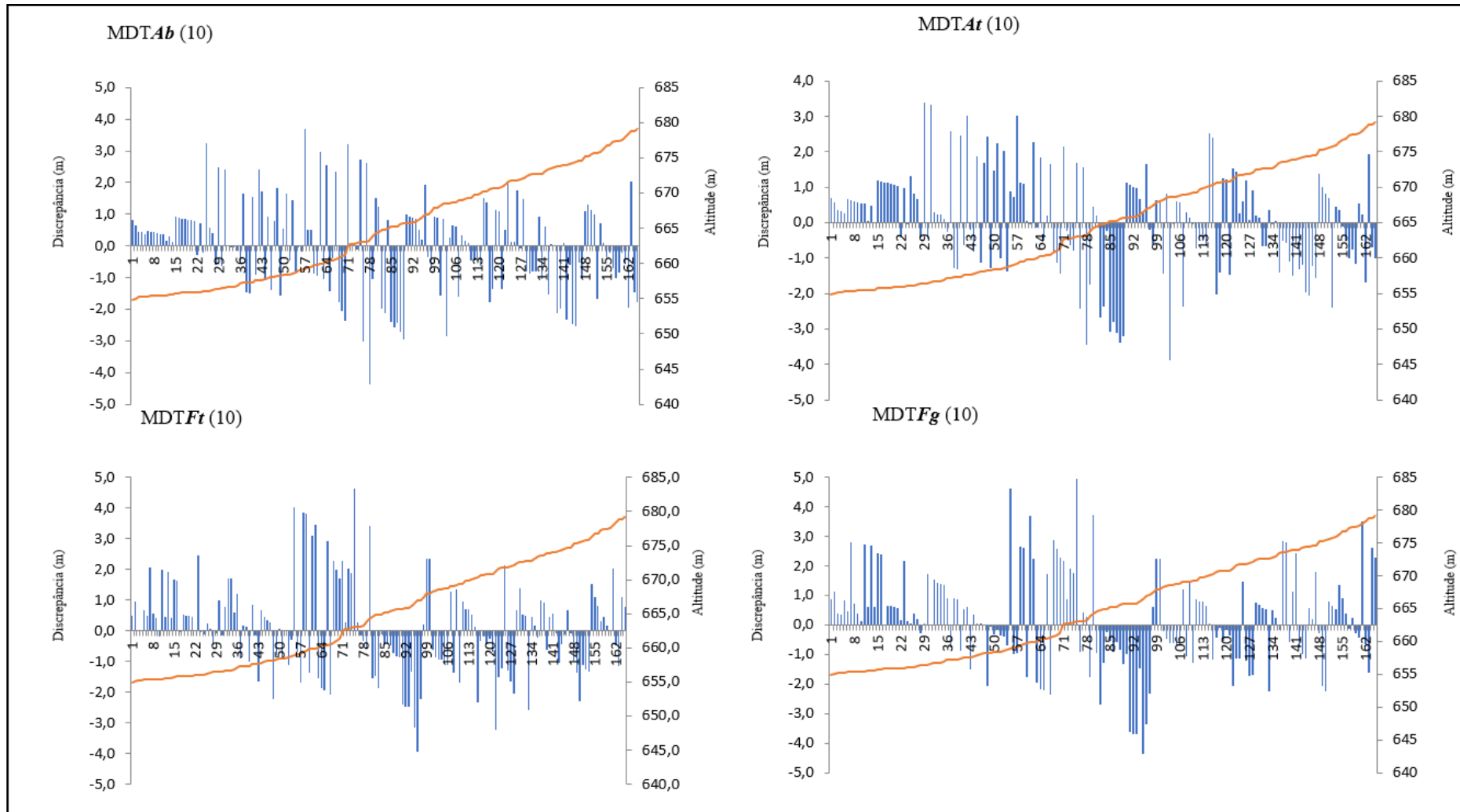


Figura 30: Gráficos de discrepâncias entre os pontos levantados por Estação Total e seus homólogos, considerando o pixel de 10 m. Em laranja o perfil topográfico da parcela.

A alta densidade de pontos na área permitiu uma análise estatística consistente dos resultados, e mostrou que a escolha do interpolador tem relação direta com os resultados alcançados. Foram considerados os melhores resultados aqueles modelos que apresentaram maior acurácia e ausência de tendência. Neste sentido, em geral, o interpolador *Gridsurfacecreate* do Fusion, não apresentou bons resultados, com exceção do modelo gerado com pixel de 2 m, cujo desempenho foi, junto com o *MDTAb(2)*, o melhor entre os outros modelos analisados. Nos modelos de maior resolução, aqueles gerados pelo comando *TINsurfacecreate*, apresentaram melhores resultados. Já nos modelos com resolução de 5 e 10 m, o desempenho do ArcGis foi melhor (Tabela 13).

Tabela 13: Síntese dos resultados da avaliação altimétrica de MDT gerados a partir da nuvem de pontos LiDAR.

Tamanho do grid (m)	Método/ Software	GEOPEC (Santos et al 2016)		Vieira & Genro (2013)
		PEC-PCD da ET-CQDG	Análise de Tendência ttab=1,652	Analogia ao PEC
0,4	MDT <i>Ft</i>	1:2.000 Classe C	t calc(h)=1,6378	0,59 1:2.000 Classe B
1	MDT <i>Ft</i>	1:2.000 Classe D	t calc(h)=1,2535	0,63 1:2.000 Classe C
2	MDT <i>Fg</i>	1:5.000 Classe B	t calc(h)=0,679	0,90 1:5.000 Classe A
	MDT <i>At</i>	1:15000 Classe B	t calc(h)=-0,67722	0,90 1:5.000 Classe A
5	MDT <i>At</i>	1:5.000 Classe C	t calc(h)=0,4594	1,25 1:5.000 Classe C
10	MDT <i>At</i>	1:10.000 Classe B	t calc(h)=0,5682	2,60 1:10.000 Classe B
	MDT <i>Ab</i>	1:10.000 Classe B	t calc(h)=-0,0362	2,60 1:10.000 Classe B

* Todos os valores estão em metros (m).

Em uma área de 8 km² na Bacia do Rio Cachoeira, Barbosa (2015) analisou MDT nas escalas 1:2.000, 1:10.000 e 1:50.000, gerados no *ArcGis* 10.1, a partir dos mesmos dados utilizados nesta Tese. Como pontos de controle foram utilizados os pontos cotados na base 1:2.000, elaborados pelo IPP, compreendendo um total de 641 pontos, sendo a maioria na área urbana. Na escala 1:2.000 foram encontrados erros significativos não tendo atingido a classe C, se considerada a área florestada. Na escala 1:10.000 o MDT ficou com erros altimétricos próximos a classe C (85%) e EMQ na Classe A. Segundo o autor, este resultado pode ser

atribuído ao fato do maior número de pontos de controle na área urbana, área esta que tem uma maior qualidade devido a elevada densidade de pontos do escaneamento. Na classe 1:50.000 o MDT obteve PEC Classe A. Os resultados aqui apresentados foram melhores do que o encontrado por Barbosa (2015). Um dos motivos pode ser a elevada densidade de pontos *Ground* na área analisada, mesmo estando localizada sob densa cobertura vegetal além da metodologia adotada nos dois estudos. O uso de ET para levantamentos topográficos em áreas com cobertura vegetal é altamente recomendável.

Cruz et al. (2011) avaliaram a exatidão planialtimétrica do MDS e MDT gerados a partir de um levantamento aéreo com o sensor Optech ALTM 2050 (*Airbone Laser Terrain Mapper*) com o objetivo de atender às precisões de altimetria de 0,15 m em atendimento ao PEC Classe A para escala 1:2.000, no município de São Sebastião, litoral de São Paulo. A região apresenta grandes variações de altitude com um relevo bastante íngreme, dificultando o acesso a área e apresentando uma vegetação densa e de grande porte. Para determinar as coordenadas dos pontos de campo foi utilizado o sistema GNSS em 36 pontos que incluíram a representação das partes mais elevadas da área e os resultados comparados ao estabelecido no PEC. A maioria dos pontos não estavam localizados sob o dossel da floresta. O MDT alcançou a classe B sem tendência nos resultados, mas mesmo sem atingir os valores especificados para exatidão altimétrica o resultado foi considerado muito bom, uma vez que as diferenças de altitudes foram, com exceção de 1 ponto, sempre menores que 2 m quando comparadas com os valores determinados em campo.

Num segundo trabalho, utilizando o mesmo produto citado no trabalho de Cruz et al. (2011), Barros et al. (2013) avaliaram a acurácia do MDT a partir da coleta de 30 pontos de controle sob o dossel da floresta. Estes pontos foram coletados com uma Estação Total, a cerca de 25 e 50 metros a partir do início da mata para evitar o efeito de borda. Para análise, além do PEC, foram utilizadas inferências estatísticas (VIEIRA e GENRO, 2013) para avaliar tendência e exatidão. O MDT, segundo o PEC, apresentou exatidão compatível com a escala 1:25.000 classe A. No entanto, o produto apresentou tendência e o teste de precisão apresentou resultado compatível com a escala 1:10.000, classe C. Comparando os dois trabalhos, os autores reportam uma piora no resultado do MDT avaliado, que pode ser reflexo da dificuldade de penetração dos sinais do LiDAR através da densa cobertura vegetal.

Ferreira e Cintra (2017) ao avaliarem a acurácia altimétrica dos dados LiDAR com densidade de 3 a 4 pts/m², em uma área de 22,75 km² no Município de Campinas, encontraram uma acurácia vertical de 27,5 cm, sendo que em terrenos arbustivos com árvores baixas, a acurácia foi de 32,4 cm. Macedo et al. (2013) avaliaram o MDT gerado a partir de dados LiDAR,

em uma plantação de eucalipto. Foram coletados pontos com ET em áreas planas e sem cobertura florestal, áreas planas e com cobertura florestal, áreas com declividade e com cobertura florestal e áreas com declividade e cobertura florestal. Na situação mais complexa (com cobertura florestal e desnível) o RMSE obtido foi de 0,50 m, mais alto que nas outras classes, entretanto, ainda com excelentes resultados.

Reutebuch et al. (2003) avaliaram a acurácia de um MDT de alta resolução produzido a partir de dados LiDAR utilizando 347 pontos de controle distribuídos em diferentes classes de cobertura vegetal. Os erros variaram de 0,16 m a 0,31 m. Houve um pequeno aumento nos erros com o aumento da densidade das copas, mas em geral o MDT se mostrou extremamente acurado. A influência da densidade da nuvem de pontos nos modelos gerados também é discutida por alguns autores, tendo-se encontrado um aumento exponencial no erro com o aumento do espaçamento entre os pontos (JAKUBOWSKI et al., 2013).

Foi encontrada tendência em 6 modelos analisados. A análise dos gráficos de discrepância aponta para uma tendência em subestimar a altura em áreas mais elevadas, principalmente, nos modelos com pixel de 0,4 e 1 m. A tendência em subestimar as alturas também foi observada em trabalho desenvolvido por Hodgson et al. (2005). Os autores analisaram os efeitos da cobertura da terra e da declividade numa bacia hidrográfica no Norte da Carolina (USA), num modelo de elevação derivado do LiDAR coletado no inverno, em condições de floresta sem folhas. Foram usados 1.225 pontos de controle para seis diferentes tipos de cobertura da terra. O RMSE variou de 14,5 cm até 36,1 cm, sendo o maior erro na classe arbustiva aberta. Com relação à declividade os autores encontraram que em pequenas declividades, de 0 a 10°, houve pouca evidência do aumento de erro com o aumento da mesma, com exceção para a classe de gramíneas baixas, cujo erro aumentou com a declividade. Em média, o modelo subestimou a elevação, independente da classe de cobertura da terra. Adams e Chandler (2002), também encontraram um viés dos dados LiDAR em subestimar a elevação, além de uma menor sensibilidade à inclinação dos terrenos quando comparado com um MDT derivado por fotogrametria.

Para Hodgson e Breshanm (2004), em ordem decrescente de importância, as medidas do sistema LiDAR (como o equipamento GNSS ou o IMU, por exemplo) são a fonte dominante de erros, seguido de erros de interpolação, erros de deslocamento horizontal e erros de filtragem de pontos. Por outro lado, a altitude da plataforma onde se localiza o equipamento também influencia a densidade da nuvem de pontos, o que pode refletir na acurácia do modelo gerado. Quanto maior a altitude do voo, menor a quantidade de retornos em função do aumento do diâmetro do feixe de laser (GOODWIN et al, 2006; LEITOLD et al., 2015b).

Foram realizadas algumas campanhas de campo, para avaliar a possibilidade do uso de GNSS usando o método de posicionamento por ponto preciso (PPP) para avaliar os MDT. Foram analisados 21 pontos, com o tempo de rastreamento variando de 30 a 60 min em função da presença ou não de cobertura florestal. Parte destes pontos corresponde às quinas das parcelas utilizadas para o levantamento da vegetação, inclusive na área em que foram levantados os pontos com ET. Estes dados foram comparados com o MDT \mathbf{Ft} (1). A média absoluta dos erros foi de 1,42 m e o desvio-padrão de 1,29 m. Com estes resultados, o MDT \mathbf{Ft} (1) estaria enquadrado na escala 1:10.000 classe C (LE90-3,11 m). Entretanto, houve uma variação muito grande nos pontos coletados. Numa mesma parcela uma das quinas apresentou erro de 0,77m enquanto outra, na mesma cota de altitude, apresentou erro de 3,83 m. Segundo Barros, R.S. (com. pessoal), os erros encontrados provavelmente são em função do uso do GNSS em áreas sob cobertura floresta, gerando um resultado com um grau de incerteza muito grande. Estes resultados comprovam a importância da utilização de dados levantados com ET em áreas sob cobertura florestal.

4.3. Levantamento e Análise da Vegetação

Foram amostrados um total de 678 indivíduos arbóreos vivos nas três áreas levantadas. Os resultados dos parâmetros fitossociológicos das Áreas 1, 2 e 3 são apresentados a seguir.

4.3.1. Área 1

A área 1 está localizada próximo ao estacionamento para quem vai subir o Pico da Tijuca (Figura 31). A parcela tem início na cota 656 m e termina na cota 676 m. Possui uma declividade média de 25,2° e uma orientação preferencial para o sudoeste. Uma análise visual da área apontava para uma mata em bom estado de conservação, com árvores de grande porte e sub-bosque presente. Para evitar o efeito de borda teve-se o cuidado de alocar a parcela cerca de 100 m distante de trilhas.

Foram amostrados 331 indivíduos vivos (Tabela 14). Nesta área, não foram encontrados muitos indivíduos com troncos múltiplos (1,2%) e a altura média foi de 8,2 m, enquanto a máxima foi de 32 m. Como foram incluídos na análise indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm, o diâmetro médio encontrado foi relativamente baixo (8,7 cm), possivelmente influenciado pelo critério de amostragem. O diâmetro máximo encontrado foi de 70 cm. A área basal foi de 41,7 m²/ha e a biomassa acima do solo de 149,9 Mgha⁻¹.

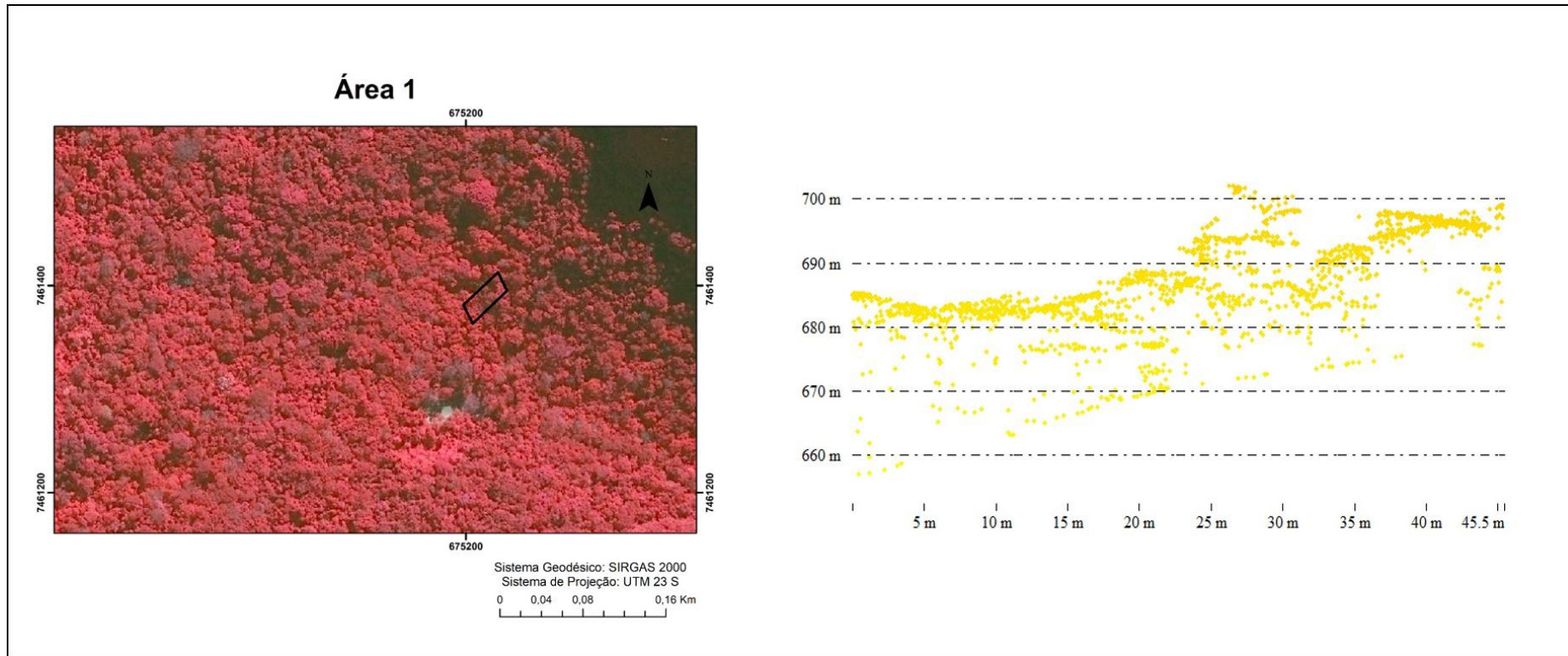


Figura 31: Localização da Área 1, utilizada para levantamento da vegetação, e perfil gerado a partir da nuvem de pontos do LiDAR.

Tabela 14: Parâmetros fitossociológicos da Área 1 gerados pelo conjunto de programas FITOPAC 1.6 (SHEPHERD, 2006) considerando o critério de inclusão de $DAP \geq 2,5$ cm. A biomassa foi calculada de acordo com Burger e Deletti (2008).

Parâmetros estruturais	Resultados
Número total de indivíduos amostrados	331
Número de indivíduos com troncos múltiplos	4
Porcentagem de indivíduos com troncos múltiplos	1,2
Densidade total (ind./ha)	3310
Área basal (m^2/ha)	41,7
Diâmetro médio (cm)	$8,7 \pm 9,2\delta$
Diâmetro máximo (cm)	70
Altura média (m)	$8,2 \pm 5,2\delta$
Altura máxima (m)	32
Altura mínima (m)	1,5
Biomassa ($Mg.ha^{-1}$)	149,9

No histograma de alturas da Área 1 (Figura 32), é possível perceber uma concentração maior de indivíduos nas classes entre 3 e 5,9 m e poucos indivíduos acima de 20 m, sendo a altura máxima encontrada de 32 m. A escolha do critério de inclusão a partir de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ m acaba por incluir na amostragem muitos indivíduos, compostos por jovens do dossel e indivíduos típicos do sub-bosque, de menor porte, que se encontram no estrato inferior da mata. Considerando que as alturas mínima e máxima dos indivíduos com DAP entre 2,5 e 5 cm foram de 1,5 e 7,5 m, respectivamente, e a altura média de 4,3 m, e que estes indivíduos representam 43% do total amostrado, isto explica a grande concentração de indivíduos nos menores intervalos de altura. A análise da figura também mostra um estrato arbóreo superior com a maior parte dos indivíduos entre 18 e 22,9 m. Este estrato não chega a constituir um dossel fechado, acima do qual encontram-se algumas árvores emergentes com alturas entre 25 e 32 m.

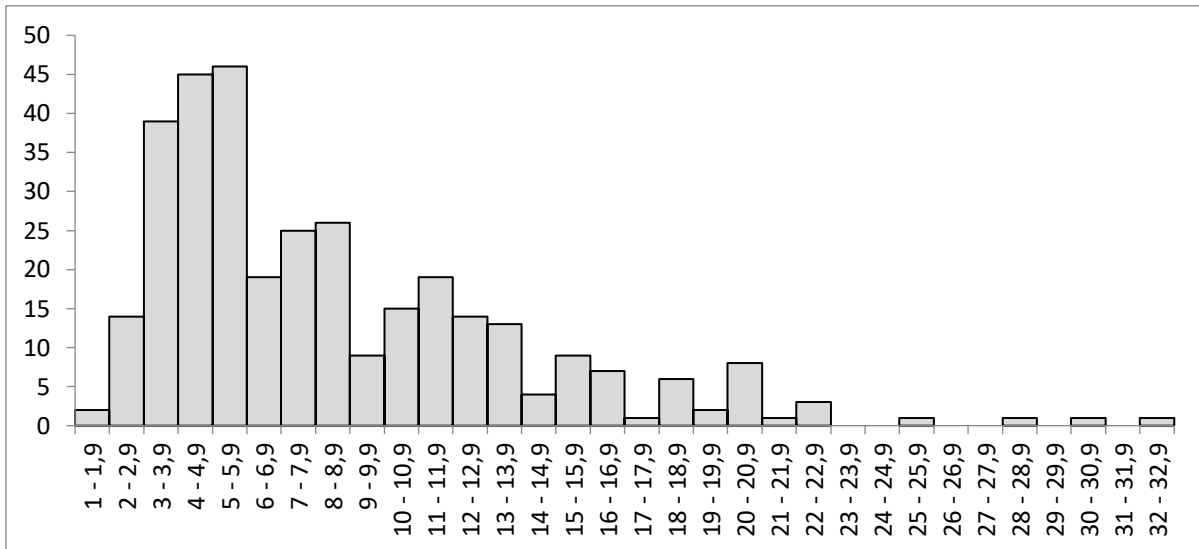


Figura 32: Histograma de alturas da Área 1 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.

No histograma de diâmetros da Área 1 (Figura 33) é possível perceber uma grande concentração de indivíduos na primeira classe de diâmetros, que contém 72,2% do total de indivíduos amostrados. A grande concentração de indivíduos na primeira classe está relacionada, em parte, ao método utilizado para o cálculo do intervalo de classe, que leva em consideração a amplitude total de diâmetros. A grande amplitude, motivada pela presença daqueles poucos indivíduos com diâmetros muito elevados, conduziu a intervalos de classes muito amplos e à consequente concentração exagerada dos indivíduos na primeira classe. Entretanto, a distribuição da figura apresenta a forma de “J” invertido, indicando que a área estudada se encontra, aparentemente, em equilíbrio dinâmico.

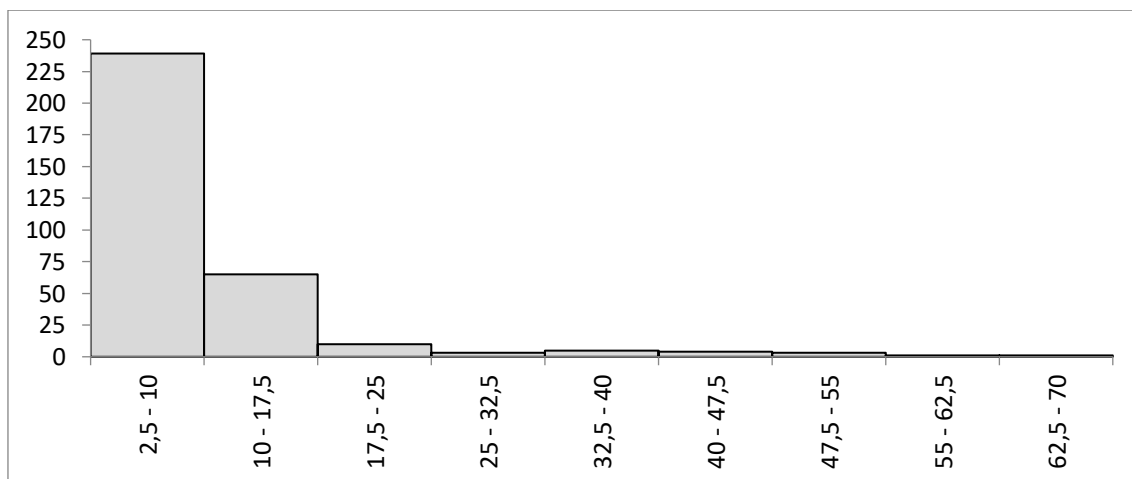


Figura 33: Histograma de diâmetros da Área 1 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.

Existe muita discussão sobre a estratificação em florestas. Para Peixoto et al. (1995), “a estratificação é entendida não como uma subdivisão estática do conjunto de populações da floresta, mas como o grupamento de árvores que, em determinado momento, atingem em conjunto, uma organização horizontal perceptível”. Ainda segundo os autores, habitualmente reconhece-se, em florestas tropicais úmidas, três estratos arbóreos. No entanto, Grubb et al. (1963) afirmam que não há, em nenhuma parte do mundo, a existência da presença de três estratos constituídos por espécies arbóreas com descontinuidade bem marcada entre eles. Segundo os autores, o reconhecimento de estratos numa população lenhosa procede de um julgamento subjetivo. Muitas vezes, estudos fitossociológicos em MA incluem em suas amostragens diferentes situações sucessionais que fazem parte inclusive, de florestas maduras. Na hora de apresentar os resultados de distribuição de alturas, as árvores amostradas são reunidas em histogramas que não levam em consideração a distribuição espacial destas diferentes situações sucessionais, o que de fato torna muito subjetiva e mesmo imprecisa a definição de estratos verticais (KURTZ e ARAUJO, 2000).

Uma outra forma de representar a organização vertical da comunidade vegetal é através de perfis de vegetação que, embora retratem trechos específicos da comunidade, ilustram como as árvores e suas copas estão distribuídas verticalmente, além de indicar a declividade do terreno. No perfil de vegetação da área (Figura 34), não é possível identificar três estratos arbóreos, conforme indicado em outros trabalhos desenvolvidos em MA de encosta (e.g. SILVA, 1980). De uma maneira subjetiva, são visualizados dois estratos, aquele que representa o dossel e um inferior, que constitui o sub-bosque, entendido aqui de maneira mais ampla como o estrato formado por indivíduos sob certa restrição de luz, ocasionada pelos indivíduos do dossel. No trecho representado, os indivíduos que compõem o dossel não o fazem de forma contínua, permitindo a entrada de luz até o estrato inferior. Isto está relacionado à declividade do terreno, fazendo com que as copas das árvores do dossel se apresentem de forma escalonada (e.g. KURTZ e ARAUJO, 2000).

Embora as espécies não tenham sido identificadas, destaca-se a grande quantidade de indivíduos de *Euterpe edulis* Mart. (palmito), de fácil reconhecimento, representando 22% dos indivíduos vivos amostrados. No local, a espécie apresenta desde indivíduos muito jovens até adultos, sugerindo que a mesma esteja fechando o seu ciclo de vida. No trabalho desenvolvido por Zaú (2004), *E.edulis* foi a espécie mais abundante e com maior valor de importância. É importante destacar que foi amostrado na área um grande indivíduo morto, ainda em pé, com DAP de 108 cm. Este indivíduo, outrora pertencente ao dossel, ou mesmo como emergente, ao morrer e perder suas folhas, acabou por expor outros indivíduos à exposição total a luz solar,

que passaram a fazer parte do dossel.

Segundo Peixoto et al. (1995), a saída de árvores pode provocar distúrbios no dossel da floresta, causando alterações nos estratos inferiores, desorganizando o sistema, o que impossibilita a visão clara da estratificação florestal. Quando esta saída é lenta e gradual, com a perda sucessiva de galhos e do fuste, não há um distúrbio aparente na estratificação, não havendo, por conseguinte, a formação de uma clareira. Realmente nesta área, a morte de um grande indivíduo do dossel, não provocou a formação de clareira, provavelmente por que sua morte foi lenta, a ponto do seu tronco ainda permanecer em pé, mesmo já tendo se passado 5 anos (nas ortofotos de 2012 já é possível perceber a presença deste indivíduo morto).



Figura 34: Perfil esquemático da vegetação de uma faixa de 20 por 10m do início da parcela da Área 1.

4.3.2. Área 2

A Área 2 está localizada em um trecho de mata próximo a uma das trilhas do PARNA (Figura 35). Possui uma elevação média de 527 m, com declividade média de 32,5°, sendo a mínima de 21,6° e a máxima de 42°, e orientação preferencial para sul. Para evitar o efeito de borda teve-se o cuidado de alocar a parcela distante de trilhas. No entanto, nesta área é possível encontrar um pequeno platô que corresponde a uma trilha fechada pela administração do PARNA, em torno de 20 m após o início da parcela. Uma análise visual da Área 2 apontava para uma mata em bom estado de conservação, com árvores de grande porte e sub-bosque denso (Figura 36).

Foram amostrados 295 indivíduos vivos (Tabela 15). A porcentagem de indivíduos com troncos múltiplos (9,2%) é maior do que a encontrada na Área 1 (1,2%) e pode estar relacionada ao histórico de perturbação da área, como, por exemplo, o corte seletivo de alguns indivíduos, embora não se tenha constatado sinais de tal atividade. O diâmetro médio foi de 8,5 cm e o máximo de 55,6 cm. Estes valores foram inferiores ao encontrado na Área 1 e refletem-se na área basal (30,5 m²/ha) e na biomassa acima do solo (94,7 Mgha⁻¹), também inferiores à Área 1.

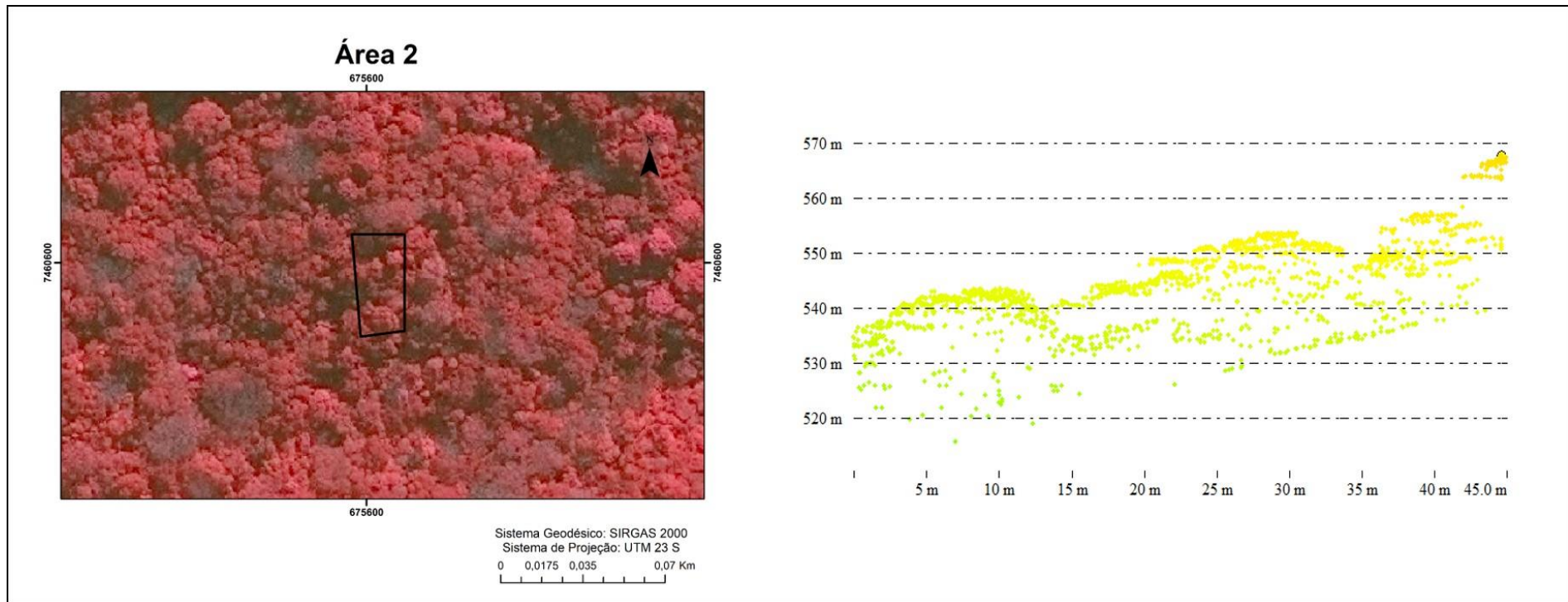


Figura 35: Localização da Área 2, utilizada para levantamento da vegetação e perfil gerado a partir da nuvem de pontos do LiDAR.



Figura 36: Detalhes dos indivíduos amostrados na Área 2.

Tabela 15: Parâmetros fitossociológicos da Área 2 gerados pelo conjunto de programas FITOPAC 1.6 (SHEPPHERD, 2006) considerando o critério de inclusão de $DAP \geq 2,5$ cm. A biomassa foi calculada de acordo com Burger e Deletti (2008).

Parâmetros estruturais	Resultados
Número total de indivíduos amostrados	295
Número de indivíduos com troncos múltiplos	27
Porcentagem de indivíduos com troncos múltiplos	9,2
Densidade total (ind./ha)	2950
Área basal (m^2/ha)	30,5
Diâmetro médio (cm)	$8,5 \pm 7,7\delta$
Diâmetro máximo (cm)	55,6
Altura média (m)	$7,5 \pm 4,4\delta$
Altura máxima (m)	26
Altura mínima (m)	2
Biomassa ($Mgha^{-1}$)	94,7

No histograma de alturas da Área 2 (Figura 37) existe uma maior concentração de indivíduos com alturas entre 4 e 5,9 m e a altura máxima encontrada foi de 26 m, menor que na

Área 1 (32 m), assim como o número de indivíduos amostrados. O dossel é mais baixo, com a maior parte dos indivíduos entre 15 e 18,9 m, sendo que alguns podem chegar a 20 m. Algumas árvores emergentes podem alcançar 26 m. Quando são considerados apenas os indivíduos com DAP entre 2,5 cm e 5 cm, as alturas variaram entre 2 e 7 m e a média foi de 4,2 m. Estes indivíduos representam 37,6% do total amostrado.

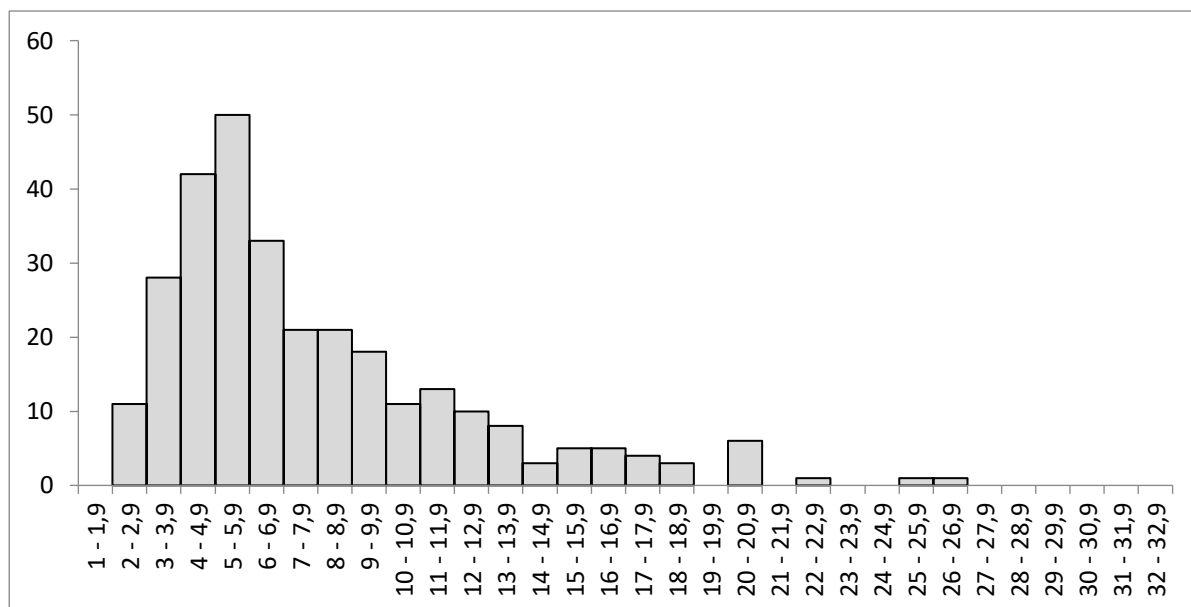


Figura 37: Histograma de alturas da Área 2 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.

Com relação a distribuição de diâmetros (Figura 38), assim como na Área 1, há uma maior concentração de indivíduos com pequenos diâmetros. O diâmetro máximo foi de 55,6 cm, menor do que o encontrado na Área 1.

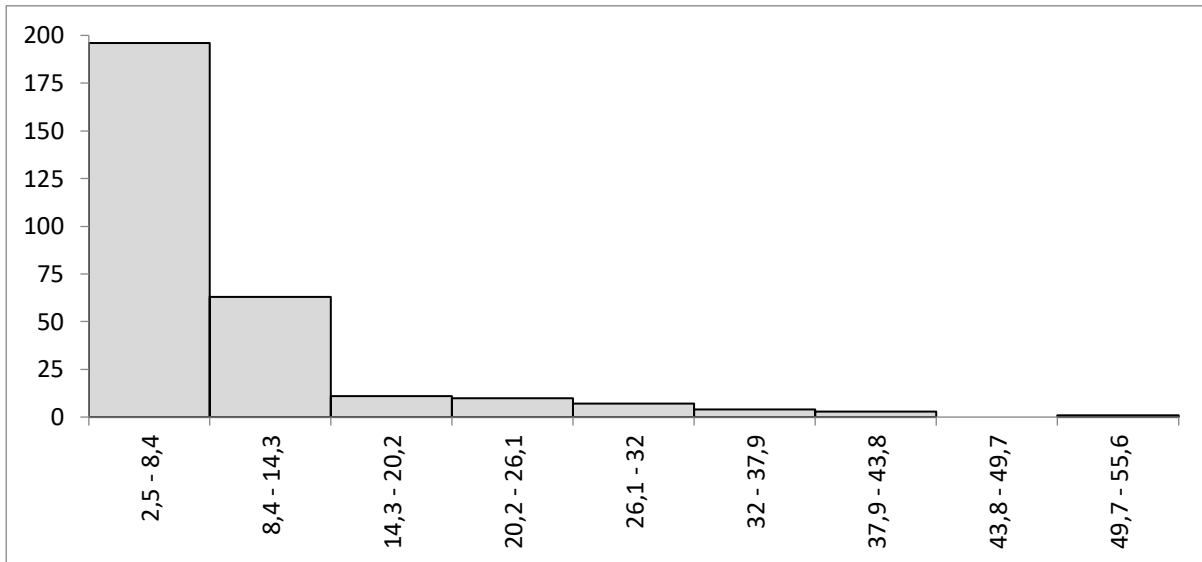


Figura 38: Histograma de diâmetro da Área 2 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.

De um modo geral, a Área 2 apresenta-se com uma menor quantidade de árvores, quando comparada a Área 1, e indivíduos de menor diâmetro, condicionando uma biomassa acima do solo, também menor.

4.3.3. Área 3

A escolha da terceira área levou em consideração a ausência de sub-bosque com o objetivo de explorar o uso dos dados LiDAR na determinação da estratificação florestal. Não foi simples encontrar uma área livre de sub-bosque, que comportasse uma parcela de 50 por 20 m. Esta parcela foi implantada próximo ao Centro de Visitantes do PARNA, numa área destinada à recreação (Figura 39). É composta por poucas árvores, em geral sem a presença de sub-bosque (Figura 40). Num dos lados da parcela, se encontra um pequeno lago, enquanto que no outro uma pequena encosta florestada. São encontradas algumas clareiras, sendo a maior com cerca de 66 m². Em duas das extremidades da parcela, há um adensamento maior de árvores com alguns indivíduos compondo o sub-bosque, mas que não comprometem o objetivo proposto. A área é plana, com uma declividade média de 3,45° (mín. 0,03°; máx 20,43°). A elevação média é de 464 m e a parcela está orientada, preferencialmente, para sul.

Foram amostrados 52 indivíduos vivos (Tabela 16) e, destes, apenas um com tronco múltiplo que representa 1,9% dos indivíduos amostrados. Como existe uma grande clareira na área, além de outras pequenas, e grande parte da parcela estava livre de sub-bosque, o número de indivíduos amostrados ficou bem abaixo do encontrado nas Áreas 1 e 2. Este resultado irá refletir numa menor área basal (16 m²/ha), assim como na biomassa acima do solo (50,3 Mgha⁻¹).

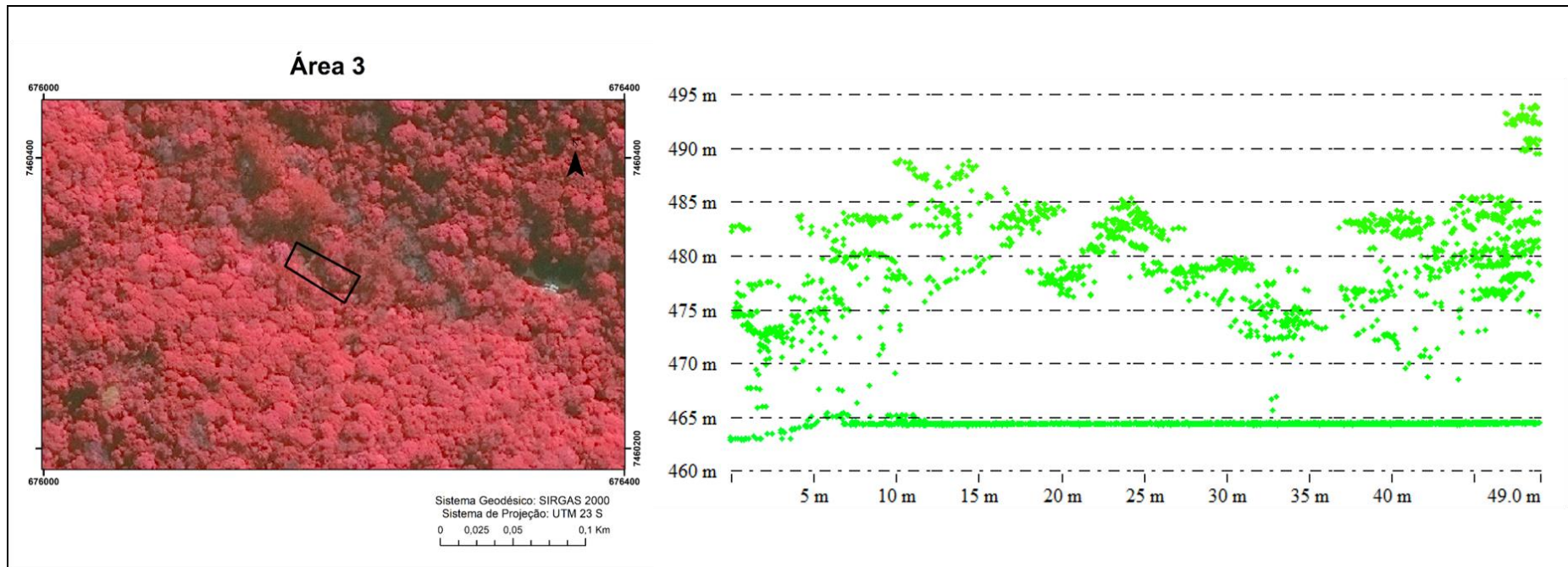


Figura 39: Localização da Área 3, utilizada para o levantamento da vegetação, e perfil gerado a partir da nuvem de pontos do LiDAR.

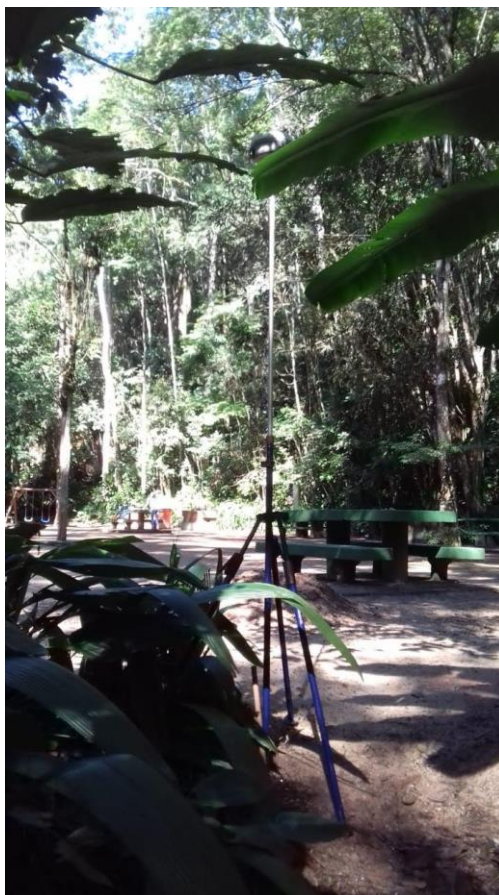


Figura 40: Detalhe da parcela implantada na Área 3, em área destinada a recreação, sem a presença de sub-bosque.

Tabela 16: Parâmetros fitossociológicos da Área 3 gerados pelo conjunto de programas FITOPAC 1.6 (SHEPPHERD, 2006) considerando o critério de inclusão de $DAP \geq 2,5$ cm. A biomassa foi calculada de acordo com Burger e Deletti (2008).

Parâmetros estruturais	Resultados
Número total de indivíduos amostrados	52
Número de indivíduos com troncos múltiplos	1
Porcentagem de indivíduos com troncos múltiplos	1,9
Densidade total (ind./ha)	520
Área basal (m^2/ha)	16
Diâmetro médio (cm)	$16,2 \pm 11,58$
Diâmetro máximo (cm)	48,8
Altura média (m)	$10,6 \pm 5,78$
Altura máxima (m)	25
Altura mínima (m)	3
Biomassa ($Mgha^{-1}$)	50,3

No histograma de distribuição de alturas (Fig.41), há duas modas: uma em torno dos 5 m, que corresponde aos indivíduos do sub-bosque, outra em torno de 12 m. Foram encontrados apenas sete indivíduos (13,5% do total) com DAP entre 2,5 e 5 cm, com altura mínima de 3 m e máxima de 5,5 m. A altura média destes indivíduos foi de 4,1 m. O dossel situa-se entre 17 e 18 m. Como existem algumas clareiras na Área, o dossel não é contínuo e nos adensamentos se encontram os poucos indivíduos que compõem o sub-bosque.

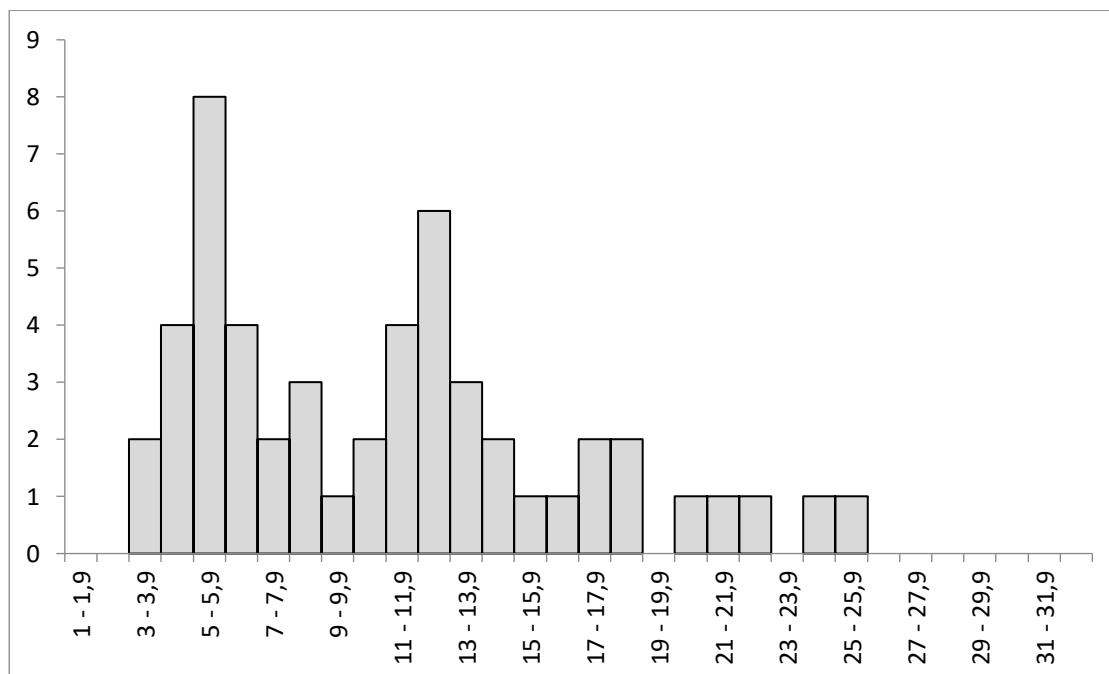


Figura 41: Histograma de alturas da Área 3 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.

O histograma de distribuição dos diâmetros (Figura 42) não apresenta a forma de “J” invertido, indicando que não há um equilíbrio dinâmico na comunidade amostrada. Este resultado está relacionado a perturbações antrópicas (a área está localizada em trecho quase sem sub-bosque, destinado a recreação), que interferem na forma do histograma (CARVALHO e NASCIMENTO, 2009).

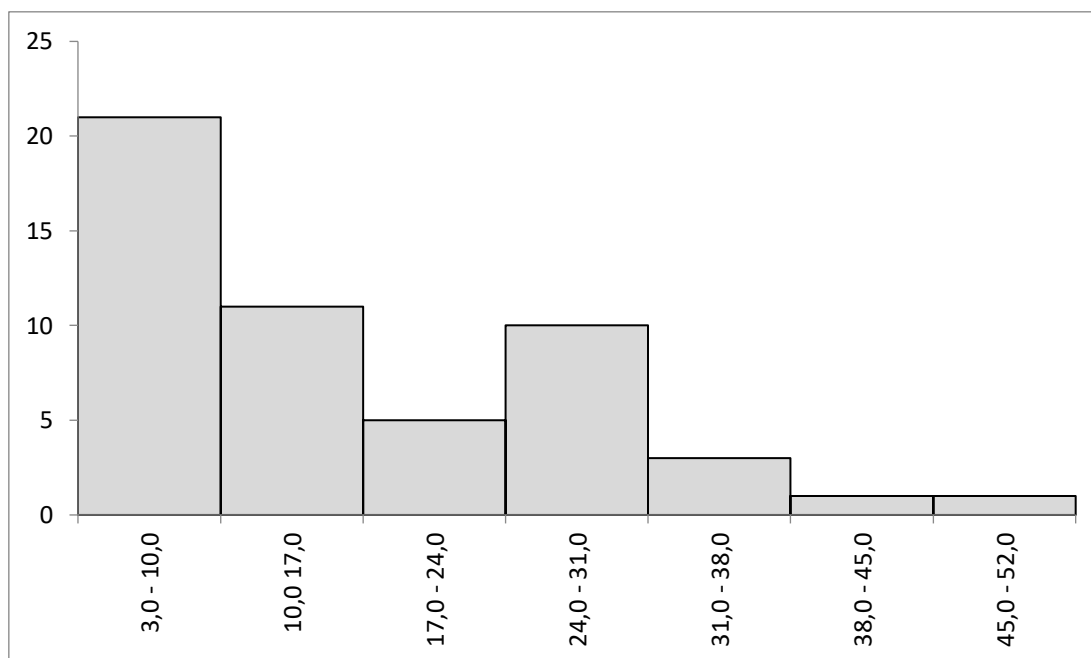


Figura 42: Histograma de diâmetro da Área 3 considerando o critério de inclusão de indivíduos com $DAP \geq 2,5$ cm.

Das três áreas amostradas, na Área 1 foram encontrados os maiores valores de altura média, área basal e biomassa acima do solo. Como a escolha da Área 3 foi condicionada a ausência de sub-bosque, já era esperado que os parâmetros estruturais apresentassem valores inferiores e indicassem perturbação antrópica.

A densidade de indivíduos da Área 1 (Tabela 17) está próxima a encontrada por Zaú (2010), em trabalho desenvolvido também no Setor “A” do PARNA, sugerindo que este trecho da mata também encontra-se em estágio avançado de sucessão, e foi maior do que a encontrada nas áreas com idade de 5, 25 e 50 anos, amostradas por Oliveira (2002) na Ilha Grande. Esta densidade se reflete, em parte, na área basal encontrada ($41,71 \text{ m}^2/\text{ha}$), que também foi maior do que as áreas com 5 ($5,6 \text{ m}^2/\text{ha}$), 25 ($26,3 \text{ m}^2/\text{ha}$) e 50 anos ($32,4 \text{ m}^2/\text{ha}$). Quando comparada com Zaú (2010), a área basal encontrada foi um pouco menor.

Quando são comparados apenas os indivíduos com $DAP \geq 5$ cm a área basal da Área 1 fica abaixo da encontrada por Kurtz e Araujo (2002, $57,28 \text{ m}^2/\text{ha}$) em mata considerada pelos autores como em estágio climácico na Estação Ecológica do Paraíso, em Guapimirim, apesar da maior densidade de indivíduos. Como a área basal é uma medida que leva em consideração o diâmetro dos indivíduos, significa que na Área 1 há uma quantidade maior de indivíduos, porém com diâmetros pequenos no conjunto (ver Figura 34), indicando que, apesar do bom estado de conservação, a mata ainda não se encontra em estágio climácico. Por exemplo, Kurtz e Araujo (op. cit.) encontraram indivíduos emergentes com altura de 45 m enquanto que na Área 1 a altura máxima encontrada foi de 32 m. A altura média (8,15 m), também ficou abaixo da

encontrada por Oliveira (2002) na área climática (11 m). Mesmo o diâmetro máximo, de 70 cm, está muito abaixo do que o encontrado na área climática da Ilha Grande, de 117 cm (OLIVEIRA, op.cit.) e por Kurtz e Araújo (2000, 160 cm).

A Área 2 possui alguns parâmetros mais semelhantes com os encontrados na área com idade de 50 anos na Ilha Grande (OLIVEIRA, 2002), como a porcentagem de indivíduos mortos em pé (6,65%) e de indivíduos com troncos múltiplos (9,15). Já a altura média (7,5 m) e a máxima (26 m) ficaram mais próximas a área com 25 anos. A área basal e o diâmetro médio ficaram um pouco abaixo do encontrado por Zaú (2010). O trecho que compreende a Área 2, como comentado, possui indivíduos de menor altura e diâmetro, assim como mais indivíduos com troncos múltiplos. Isto pode indicar que esta área pode ter sofrido corte seletivo e por isso se aproxima mais da área amostrada por Oliveira (2002). Entretanto, o processo de recuperação da MA é dependente do histórico de uso da área (tipo e duração do uso e tempo de recuperação) e de características específicas de cada local (como declividade e orientação da encosta, tipo de solo, pluviosidade, disponibilidade de propágulos etc). Desta forma, existe grande variação na densidade e área basal mesmo em florestas secundárias com idades próximas, no sudeste brasileiro (SOLÓRZANO et al., 2012).

Com relação à distribuição de diâmetros, tanto a Área 1 quanto a Área 2 apresentaram distribuição em “J” invertido que, de acordo com Heinsdijk (1965), é um padrão para florestas tropicais. Este padrão, em geral, significa uma grande quantidade de indivíduos recrutados, em relação a uma quantidade menor de indivíduos adultos, o que pode sugerir ausência de problemas de regeneração natural. Para Lopes et al. (2002), um decréscimo acentuado no número de indivíduos (no sentido das menores para as maiores classes diamétricas) pode significar que a floresta se encontra em pleno desenvolvimento para estágios avançados, pois existe grande um contingente de indivíduos jovens que irão suceder aqueles que já se encontram senis ou em decrepitude.

Em termos de biomassa acima do solo, os resultados foram comparados com o trabalho de Alves et al. (2010). Os autores calcularam a biomassa ($Mgha^{-1}$) em 13 parcelas permanentes de 1 ha, localizadas ao longo de um gradiente altitudinal na Serra do Mar, São Paulo. Foram utilizadas três equações alométricas para estimar a biomassa: (1) a de Chave et al. (2005), que utiliza como variáveis o diâmetro, altura e densidade da madeira, para todos os indivíduos arbóreos; (2) a de Nascimento e Laurence (2002) para palmeiras; e (3) a de Tiepolo et al. (2002) para lianas. Considerando os indivíduos com $DAP \geq 5$ cm, foi encontrada na formação Submontana uma quantidade de biomassa de $253,8 Mgha^{-1}$, e na formação Montana $283,2 Mgha^{-1}$. Quando foram considerados apenas os indivíduos com $DAP \geq 10$ cm, houve um

pequeno decréscimo no valor encontrado, sendo $243,60 \text{ Mgha}^{-1}$ na formação Submontana, e $271,7 \text{ Mgha}^{-1}$ na formação Montana. Estes valores encontram-se acima do que foi encontrado nas parcelas desta Tese, tanto para $\text{DAP} \geq 5 \text{ cm}$ (Área 1 – $148,2$ e Área 2 – $93,4 \text{ Mgha}^{-1}$) como para $\text{DAP} \geq 10 \text{ cm}$ (Área 1 – $139,7$ e Área 2 – $84,9 \text{ Mgha}^{-1}$). A diferença encontrada pode estar relacionada, com a maturidade entre as duas áreas de estudos, mas também deve-se avaliar as equações alométricas utilizadas. Enquanto os autores citados acima utilizaram três equações, em função das formas de vida, e incluíram lianas, esta Tese utilizou apenas uma, desenvolvida para ambiente de MA de encosta (BURGUER e DELETTI, 2008).

Apesar das florestas do PARNA da Tijuca serem caracterizadas como em estágio sucessional avançado (ZAU, 2010), inclusive trechos próximos às margens das estradas pavimentadas ao longo do PARNA (MATTOS, 2007), elas ainda possuem parâmetros estruturais inferiores aos encontrados em área climáticas (KURTZ e ARAUJO, 2000; OLIVEIRA, 2002).

O critério de inclusão de indivíduos com DAP entre $2,5$ e 5 cm , gerou apenas um pequeno aumento na biomassa da Área 1 ($1,1\%$) e 2 ($1,3\%$). Por outro lado, em termos de número de indivíduos, este critério de inclusão representou $43,5\%$ dos indivíduos na Área 1 e $37,6\%$ na Área 2. Este aumento no número de indivíduos irá refletir diretamente no trabalho de campo, levando-o a ser executado num período bem maior. Em geral, para MA é recomendado como critério de inclusão para amostragem com componente arbustivo-arbóreo um $\text{DAP} \geq 5 \text{ cm}$ (MORO e MARTINS, 2011), mesmo para estudos que envolvem florística e fitossociologia.

Tabela 17: Parâmetros estruturais de levantamentos fitossociológicos realizados em trechos de Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro.

Parâmetros estruturais	Área 1 (DAP≥ 2,5 cm)	Área 2 (DAP≥ 2,5 cm)	Oliveira (2002), 5 anos (DAP≥ 2,5 cm)	Oliveira (2002), 25 anos (DAP≥ 2,5 cm)	Oliveira (2002), 50 anos (DAP≥ 2,5 cm)	Oliveira (2002) climácica (DAP≥ 2,5 cm)	Zaú (2010) (DAP≥ 2,5 cm)	Area1 (DAP≥ 5 cm)	Area 2 (DAP≥ 5 cm)	Kurtz e Araujo (2000) (DAP≥ 5 cm)
Número de indivíduos amostrados (vivos)	331	295	498	724	591	519	986	187	184	592
Área amostrada (m ²) / n ^o de pontos	1000	1000	2600	2600	2600	2600	2800	1000	1000	150
Densidade total (ind./ha)	3.310	2.950	1.915	2.784	2.273	1.996	3.532	1.870	1.840	1.369,9
Área basal (m ² /ha)	41,7	30,5	5,6	26,3	32,4	57,9	49,1	40,3	29,4	57,28
Diâmetro médio (cm)	8,7	8,5	4,7	7,5	9,6	12,2	12,2	12,8	11,6	-
Diâmetro máximo (cm)	70	55,6	16	53	52	117	-	70	70	160
Indivíduos mortos em pé (%)	3,5	6,6	15,1	7,8	6,3	1,5	3,5	2,9	1,3	1,3
Indivíduos com troncos múltiplos (%)	1,2	9,1	18,3	8,8	7,6	0,9	-	2,1	5,4	-
Altura média (m)	8,1	7,5	3,7	7	8,8	11	10,5	11,1	9,5	
Altura máxima (m)	30	26	12	27	30	45		32	26	45

4.4 Estimativa da altura das árvores através e Modelo de Densidade Relativa da Vegetação

A altura das copas foi determinada a partir da subtração entre o MDS e o MDT. Foram usados modelos digitais com resolução espacial de 1 m, gerados no Fusion, conforme apresentado na metodologia, em função da melhor avaliação do MDT, em termos de acurácia. As áreas de 0,1 ha extraídas do MDC, com 1 m de resolução, estão apresentadas na Figura 43.

A Área 1 apresentou altura máxima de 30,41 m e mínima de 0,005 m, enquanto que a altura média foi de 21,8 m (Tabela 17). Como o MDC é obtido pela subtração do MDS, que considera os primeiros retornos do LiDAR, as menores alturas correspondem a pequenas aberturas no dossel, que permitem que os feixes do laser cheguem até próximo do terreno. Comparando com os dados levantados em campo, a altura máxima encontrada na Área 1 foi um indivíduo com 32 m. Os resultados ficaram muito próximos, principalmente se considerarmos o ano do levantamento LiDAR, 2012, e os dados do levantamento de campo, 2016-2018.

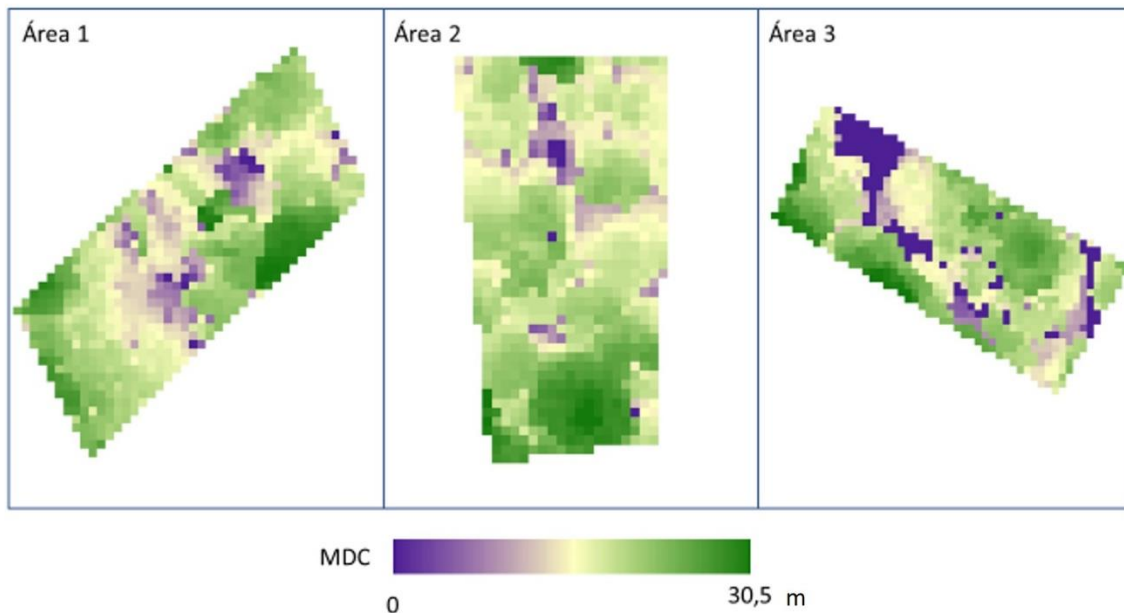


Figura 43: Altura do dossel a partir do Modelo Digital de Copas (MDC) com resolução de 1 m. As áreas mais escuras em tom de roxo representam clareiras enquanto que os tons de verde escuro representam as árvores mais altas.

Tabela 18: Métricas derivadas do Modelo Digital de Copas (MDC) produzido a partir dos dados LiDAR e características do terreno nas três áreas amostradas.

Altura das Copas			Características do Terreno	
Áreas	Min-max (m)	Média \pm DPad	Elevação Média (m) (Min -Max)	Declividade ($^{\circ}$) Média (Min – Max)
Área 1	0 - 30,4	21,8 \pm 4,1	668,7 (656,8-677,8)	25,45 (min. 10,5 – máx.40,8)
Área 2	1,34 – 30,3	20,4 \pm 3,6	526,9 (512,3-540,5)	32,5 (min. 21,6 – máx. 42,02)
Área 3	0 – 30,1	17,1 \pm 7,9	464,1 (462,6-465,2)	3,4 (min. 0,03 – máx. 20,43)

Na Área 2 a altura máxima do MDC foi de 30,3 m enquanto que nos dados levantados no campo, a altura máxima encontrada foi de 26 m. É importante considerar que o valor máximo encontrado no MDC é baseado numa célula de 1 m², enquanto a estimativa da altura das árvores é feita por indivíduo. Apenas 8,6% dos pixels possuem valor acima de 26 m e um único pixel possui altura acima de 30 m. A Figura 44 (a) apresenta a distribuição dos pixels acima de 26 m. Parte deles está localizada próximo a borda da parcela e podem representar indivíduos que não foram amostrados, mas cujas copas se projetam e acabam por influenciar no resultado do MDC. Por outro lado, a declividade média encontrada na Área 2 foi de 32,5° o que também, pode ter influenciado este resultado, no que diz respeito a acurácia do MDT. Entretanto, mesmo com uma pequena superestimação da altura máxima encontrada, considera-se a estimativa calculada através de dados LiDAR, satisfatória.

Na Área 3, a altura máxima encontrada foi de 30,13 m, enquanto que no campo a altura máxima foi de 25 m. Considerando os pixels com altura maior que 25 m, estes representam 7,1% da área total da parcela. A distribuição dos pixels com altura maior que 25 m (Figura 44, b) aponta, assim como na Área 2, a influência das copas de indivíduos na borda da parcela. Nesta área, uma das laterais da parcela estava localizada próxima a um barranco florestado, e como constatado em campo, algumas árvores tinham suas copas projetadas para dentro da parcela. Uma das áreas apontadas com alturas maiores que 25 m, correspondem a um único indivíduo, com pixels em torno de 26 m, resultado muito próximo ao encontrado no levantamento dos dados de campo. O desvio-padrão mais alto, encontrado na Área 3 pode ser explicado em função das clareiras existentes na área.

A questão da influência da projeção de copas de indivíduos adjacentes às parcelas, nos resultados, se repete nas três áreas amostradas. Em matas localizadas em terrenos com declividade acentuada é comum a ocorrência desta interferência, como ocorre nas parcelas que compreendem as Áreas 1 e 2. A maneira encontrada para minimizar essa influência é aumentar a área da parcela, reduzindo-se este ‘efeito de borda’. Estudos sugerem que para florestas

tropicais, o ideal é trabalhar com parcelas de, pelo menos, 0,25 ha (D'OLIVEIRA et al. 2014).

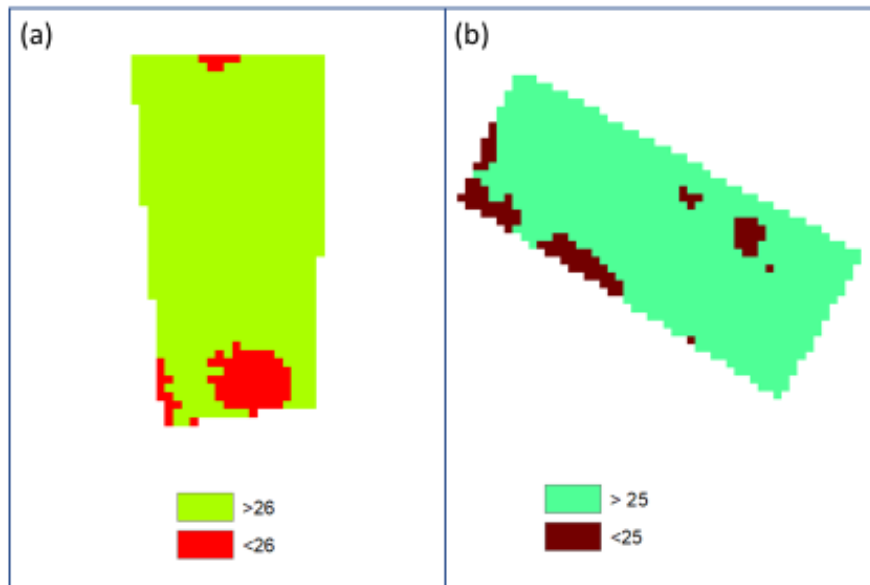


Figura 44: Distribuição dos pixels com altura maior que 26 m, na Área 2 (a) e maior que 25 m na Área 3 (b).

Para comparar a média de altura do MDC com a média obtida a partir dos dados de campo, foram incluídos apenas os indivíduos com $DAP \geq 10$ cm, que correspondem aos indivíduos do dossel, de acordo com Guedes-Bruni et al. (2006). Os valores de altura encontrados a partir dos dados LiDAR foram, nas três áreas, maiores do que os estimados em campo (Figura 45).

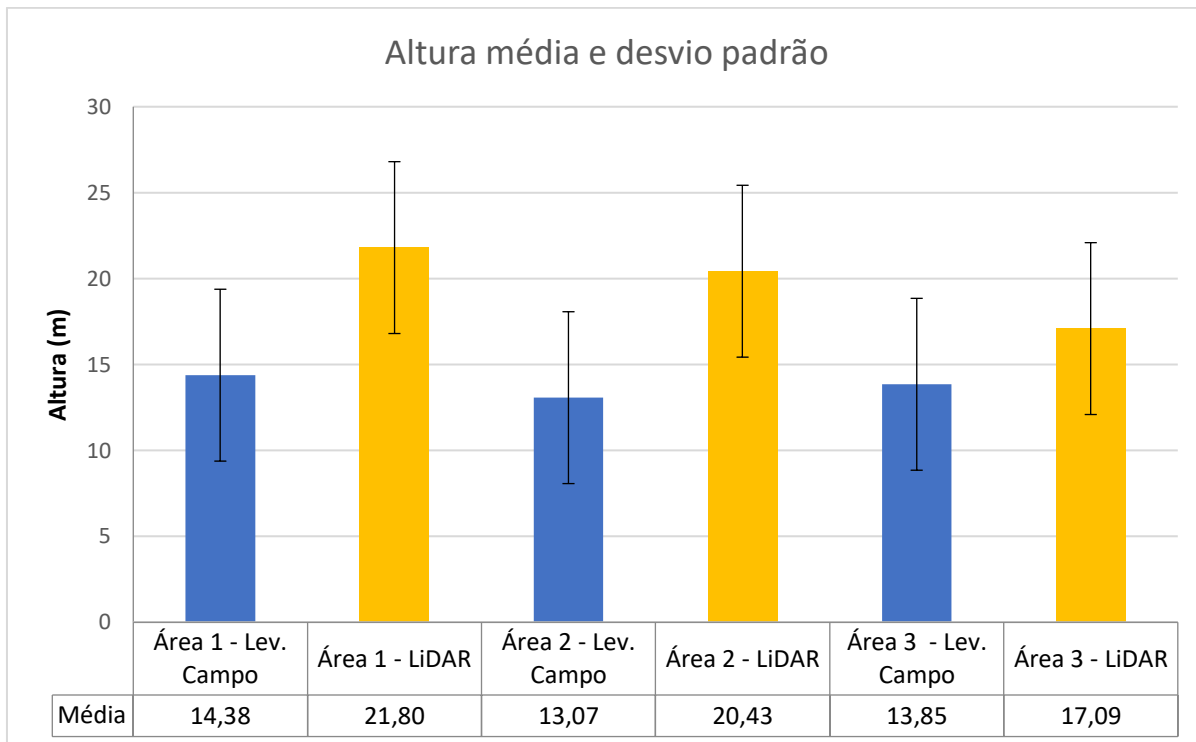


Figura 45: Gráfico com a média de altura obtida pelo Modelo Digital de Copas (MDC) e dos dados de campo considerando os indivíduos com $DAP \geq 10$ cm.

Na Área 1, a média de altura dos indivíduos amostrados em campo foi de 14,38 m, enquanto a do MDC foi de 21,84 m. Em parte, isto pode ser explicado pelos dados em si. Enquanto que para cada indivíduo amostrado em campo é definido um valor de altura, no MDC, em função da resolução de 1m, a cada pixel é atribuído um valor de altura. Como o modelo é gerado a partir da diferença entre o MDT e o MDS, apenas as copas dos indivíduos mais altos são incluídas. Na amostragem com indivíduos com $DAP \geq 10$ cm, também são incluídos indivíduos cujas copas encontram-se abaixo de alguns indivíduos do dossel e das emergentes. Na Área 1 foram encontrados apenas 28 indivíduos (8,45% do total de indivíduos amostrados) cujas copas estavam totalmente expostas a luz solar. A altura média desses indivíduos foi de 18,82 m, um pouco mais próximo do valor encontrado a partir dos dados LiDAR (21,84 m na Área 1).

Na Área 2, considerando o $DAP \geq 10$ cm, a diferença entre os dados levantados no campo e o resultado encontrado no MDC foi de 19,6% para uma superestimação da altura média. Quando são considerados apenas os indivíduos com exposição total a luz solar (21 indivíduos), a média encontrada é de 17,5 m, mais próxima ao encontrado no MDC. Na Área 3, como há muitos pixels com valores próximos a altura mínima encontrada, o valor médio de altura ficou abaixo das outras duas áreas (17,09 m). São encontrados 11 indivíduos com exposição total a luz solar, e a altura média é de 17,18 m. Entretanto, é preciso lembrar que a altura média de 17,09 m foi calculada incluindo todos os pixels, inclusive aqueles que representam as clareiras,

cujos valores são muito próximos à altura mínima.

É intuitivo argumentar que os indivíduos com maiores dimensões de copa, que correspondem, no geral, as árvores de maior altura, interceptam um número maior de feixes do LiDAR que árvores de menor altura, mas que também compõem o dossel. Desta forma, a média de alturas do dossel estimada pelo LiDAR superestima a média aritmética da copa das árvores que compõem o dossel e emergentes.

A distribuição da altura das copas (i.e. distribuição dos valores das células raster do MDC) em cada área é apresentada na Figura 46. Em nenhuma das áreas se observa uma distribuição simétrica. Na Área 1, existe uma maior concentração de pixels (23,7%) nos intervalos entre 22 e 23,9 m e na medida em que nos afastamos deste intervalo, diminui a frequência dos pixels, tanto para valores acima de 23,9 m, quanto para valores abaixo de 22 m. Este comportamento também é encontrado na Área 2, a medida que nos afastamos do ponto médio a frequência dos pixels diminui, sendo que a maior concentração de pixels corresponde ao intervalo entre 19 e 19,9 m.

Na Área 3, em função das clareiras que ocorrem na parcela, 12,5% dos pixels encontram-se entre os intervalos de 0 e 0,99 m. Entre 18 e 19,9 m também existe uma maior frequência de pixels que correspondem ao dossel da Área.

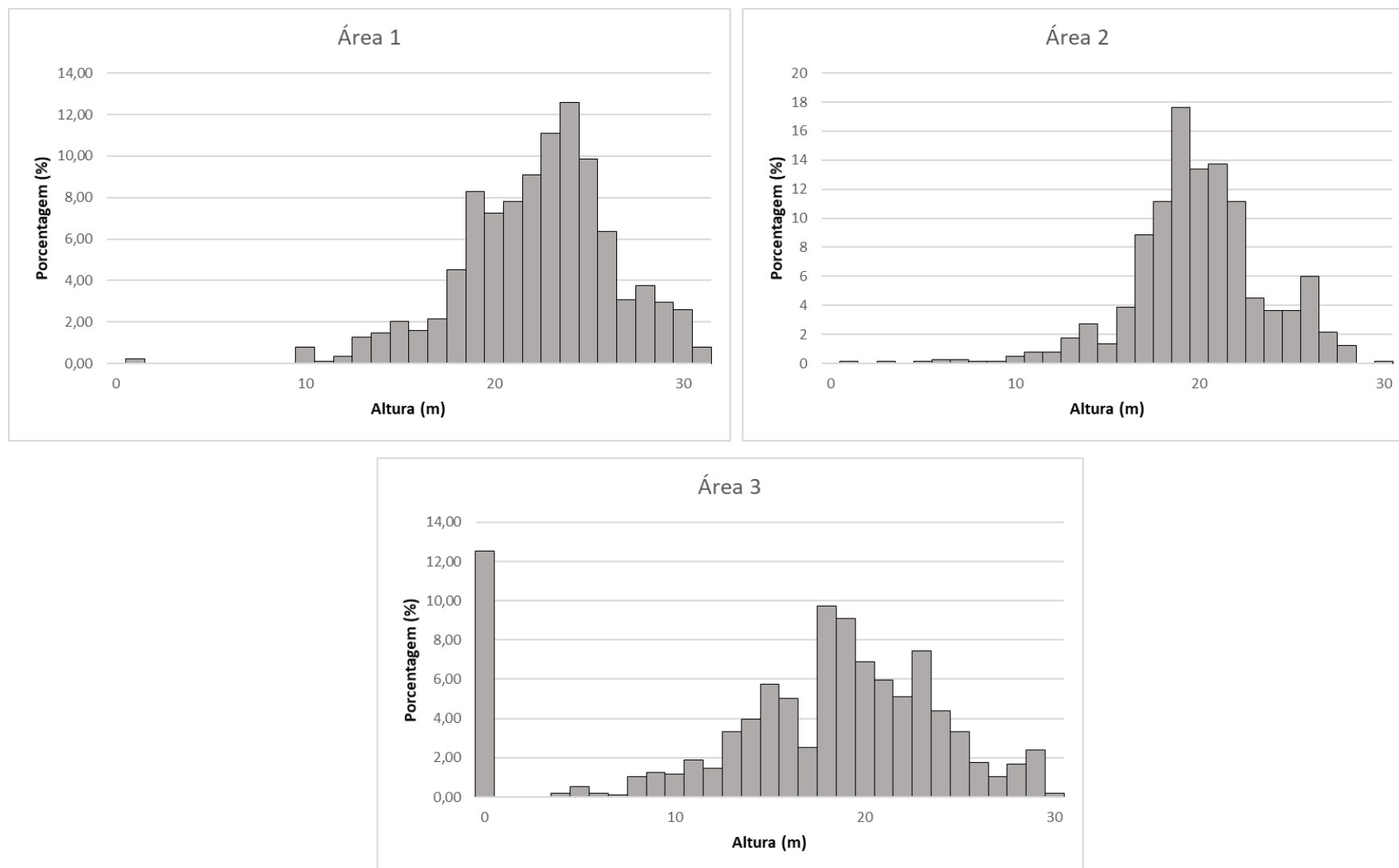


Figura 46: Distribuição de frequência de altura do Modelo Digital de Copas (MDC) com 1 m de resolução, derivado do LiDAR, para as três áreas de estudo.

A partir do MDC, foi determinada a existência ou não de clareiras. Segundo Brokaw (1982), “A clareira é uma abertura no dossel que se estende verticalmente para o solo, através de todos os níveis de vegetação, devendo ser definida a uma altura média de 2 m acima do solo.” Assim, para cada uma das áreas foram identificados os pixels com valor ≥ 2 m e a eles foi atribuído o valor 1. Se o pixel adjacente a ele estivesse dentro da classe estipulada, a este pixel também era atribuído o valor 1. Na Área 1, só foram identificados 2 pixels isolados com altura inferior a 2 m, que não podem ser caracterizados como clareiras e sim como pequenas aberturas do dossel em função da arquitetura da vegetação. Na Área 2, também não foram encontradas clareiras, apenas 1 pixel com altura inferior a 2 m. Na Área 3, entretanto, foram encontradas 9 clareiras, sendo a maior com 66,55 m². As outras clareiras encontradas possuíam: 17,8; 9,9; 8; 4; 3; e 2 m².

O MDC para toda área do Setor “A” do PARNA (Figura 47) apresenta altura máxima de 187,65 m. Alturas desta ordem dizem respeito às linhas de transmissão encontradas no PARNA e não, obviamente, à copa de árvores e por isso foram excluídas das análises. Este resultado chama a atenção para a importância da filtragem da nuvem de pontos. A área em que estão localizadas as linhas de transmissão representam três arquivos .las. A análise da classificação da nuvem de pontos aponta apenas para três classes: *Ground*, *Low Vegetation*, *Medium Vegetation*. Isto significa, que os pontos referentes às linhas de transmissão foram classificados, erroneamente, como retornos de vegetação.

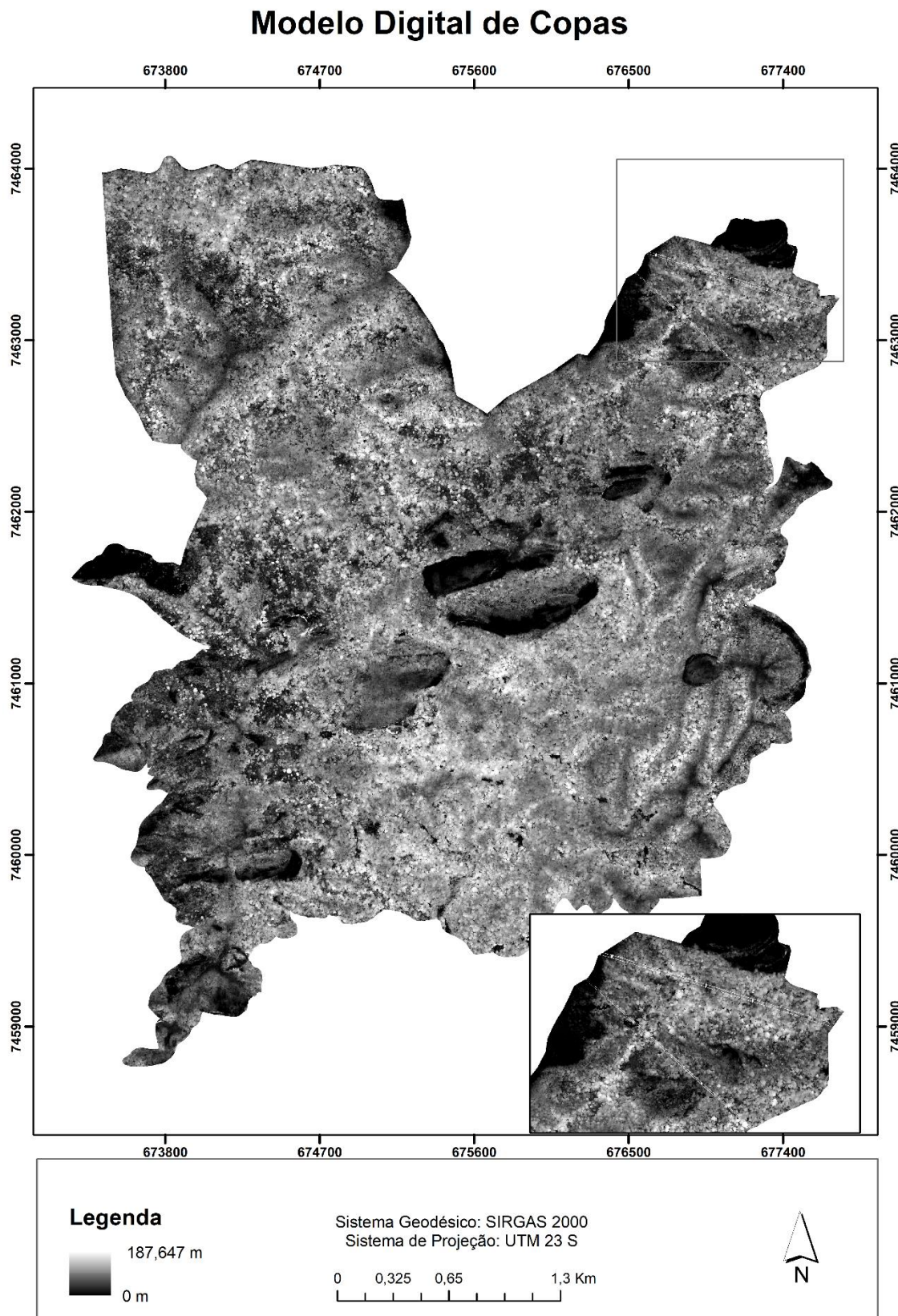


Figura 47: Modelo Digital de Copas do Setor “A” do PARNA da Tijuca, com detalhe para as linhas de transmissão, erroneamente classificadas como vegetação.

Para avaliar a distribuição das alturas das copas ao longo de todo o Setor “A” do PARNA, foi elaborado um mapa de altura de copas, denominado MDC, resultado da subtração do MDS pelo MDT (Figura 48). Como apresentado na metodologia, a escolha das classes de altura levou em consideração a Resolução N^o 6 do CONAMA de 1994, que define os estágios sucessionais da vegetação da MA a partir de alguns parâmetros, entre eles, a altura dos indivíduos. Segundo a Resolução, a vegetação em estágio avançado considera árvores com altura superior a 20 m. Foram então definidas as seguintes classes de altura: menor que 1 m; de 1 a 5 m; de 5 a 10 m; de 10 a 15 m, de 15 a 20 m; de 20 a 30 m; e > 30m. Na tabela 19 está apresentada a área em hectares, e em porcentagem de cada uma das classes no Setor “A” do PARNA da Tijuca¹⁵. É importante destacar que os dados referentes à avaliação das alturas das árvores dizem respeito apenas, a três parcelas implantadas durante este trabalho. Como os resultados encontrados foram satisfatórios, optou-se por extrapolar esse modelo para toda área do Setor “A”. Entretanto, é importante que novas áreas sejam validadas em campo para garantir a qualidade do produto gerado.

15 Para o cálculo da área de cada uma das classes foram excluídos os pixels referentes às linhas de transmissão.

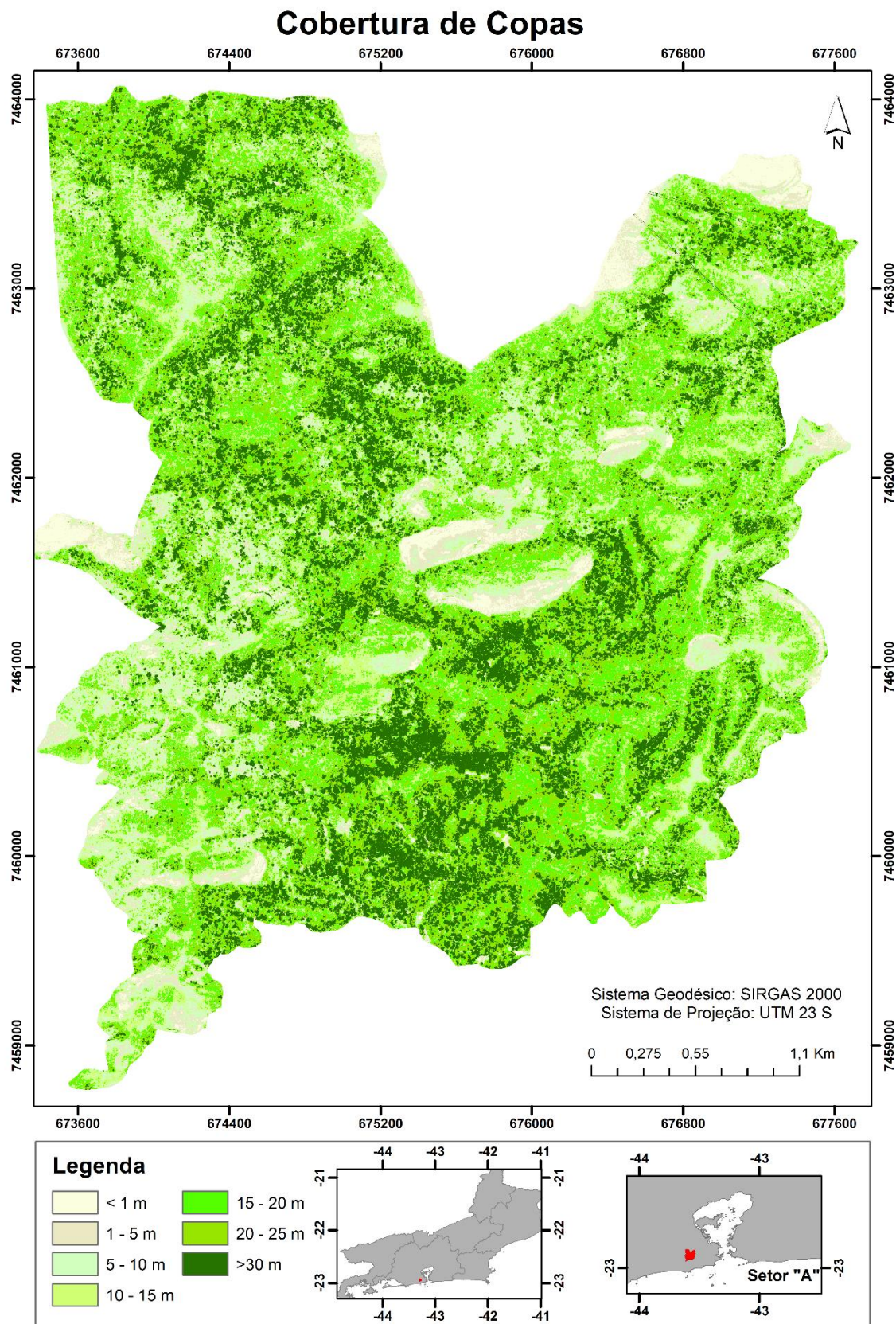


Figura 48: Mapa de Cobertura de Copas com resolução de 1 m, desenvolvido a partir dos dados LiDAR.

Tabela 19: Área ocupada (em hectares e %) por cada uma das classes de cobertura de copa determinadas a partir dos dados LiDAR.

Classe	Área (ha)	%
Menor que 1 m	42,5	2,9
Entre 1 – 5 m	77,5	5,2
Entre 5 – 10 m	172,8	11,6
Entre 10 – 15 m	254,1	17,1
Entre 15 – 20 m	336,1	22,7
Entre 20 – 30 m	512,2	34,5
Maior que 30 m	88,2	5,9

A classe de altura abaixo de 1 m é a de menor representatividade no Setor “A”, apenas 2,9%. Compreende aos afloramentos rochosos e a vegetação rasteira sobre estas áreas, além de parte da vegetação gramíneo-lenhosa. Também são encontradas em áreas onde o feixe de laser consegue alcançar os estratos mais inferiores da floresta, em função da presença de clareiras ou de pequenas aberturas no dossel além das áreas de estacionamento e de solo exposto, e estão localizadas, preferencialmente, na porção norte do Setor “A” (Tabela 20). Accioly e Coelho-Netto (2011), em estudo desenvolvido no Maciço da Tijuca, encontraram um padrão de distribuição espacial da vegetação gramíneo-lenhosa, concentradas nas encostas voltadas para o norte. Como esta classe (menor que 1 m) representa os afloramentos rochosos, 69% desta está localizada em áreas com declividade superior a 35° (Tabela 21).

Tabela 20: Distribuição das classes de altura de copas de acordo com a orientação das encostas do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.

Classes de Altura de copas	Área %			
	Norte	Sul	Leste	Oeste
Menor que 1 m	42	18	24	15
Entre 1 e 5 m	34	22	23	21
Entre 5 e 10 m	36	19	22	23
Entre 10 e 15 m	31	23	23	23
Entre 15 e 20 m	27	25	24	23
Entre 20 e 30 m	24	28	26	22
Maior que 30 m	30	22	27	21

A classe de altura entre 1 e 5 m é encontrada recobrando parte dos afloramentos rochosos assim como nas áreas com vegetação gramíneo-lenhosa. Considerando que a porção voltada para o norte (28,2%) do Setor “A” é apenas um pouco mais representativa do que as porções sul (25%), leste (24,5%) e oeste (22,4%), podemos dizer que esta classe é encontrada em maior área na porção orientada para norte. Em termos de declividade, esta classe também é mais representativa nas áreas com declividade superior a 35°.

De um modo geral, as classes com alturas de copas de até 15 m são encontradas, preferencialmente, nas porções do Setor “A” voltadas para o norte. Este padrão pode estar relacionado à conjunção de fatores como a menor disponibilidade hídrica, maior susceptibilidade a incêndios e taxas mais elevadas de deposição de poluente conforme constatado por Oliveira et al. (1995).

Tabela 21: Distribuição das classes de altura de copas de acordo com a declividade do terreno do Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.

Classes de Altura de copas	Área %			
	0 – 10°	10 – 20°	20 – 35°	Maior que 35°
Menor que 1 m	4	5	22	69
Entre 1 e 5 m	3	7	33	57
Entre 5 e 10 m	3	9	42	46
Entre 10 e 15 m	3	11	46	40
Entre 15 e 20 m	4	13	49	34
Entre 20 e 30 m	5	14	50	30
Maior que 30 m	6	15	48	31

Em torno de 22,7% da área é representada por árvores com altura de copa entre 15 e 20 m. São encontradas em maior quantidade em áreas com declividade entre 20 e 35° e distribuídas, de certa forma homogeneamente, em cada umas das porções norte, sul, leste e oeste.

Cerca de 35% do Setor “A” é representado por árvores com altura de copa entre 20 e 30 m e 5,9% com árvores maiores que 30 m. Juntando estas duas classes, que segundo o parâmetro de altura definido pela Resolução N° 6 do CONAMA de 1994, se encontrariam em estágio sucessional avançado, chega-se a cerca de 40,4% da área de estudo. Este resultado é bastante inferior ao encontrado no mapa de uso e cobertura do IPP (2016), onde 72% da área encontra-se na classe Estágio Avançado. A diferença encontrada pode estar relacionada as escalas

adotadas e a própria metodologia adotada. Neste estudo, foi considerado apenas a altura das copas como parâmetro para se avaliar o estágio sucessional.

O Modelo de Densidade Relativa da Vegetação (MDRV) foi gerado segundo metodologia proposta por D'Oliveira et al. (2014). São utilizados dois parâmetros: o primeiro determina a altura máxima do modelo e o segundo, representa a altura de referência para o cálculo da densidade relativa da vegetação (ver item 3.6). Como o sub-bosque (indivíduos com DAP entre 2,5 e 5 cm) nas três parcelas amostradas apresentou altura média em torno de 4,5 m, optou-se por utilizar cinco metros como a altura máxima do modelo. O parâmetro de 1 m seguiu sugestão de d'Oliveira et al. (op. cit).

Na Área 1, a maior parte da parcela (73%) é representada por áreas sem dados (“no data”) (Figura 49). Significa que não houve retornos no intervalo de 0 a 1 metro, nem tão pouco no intervalo de 1 a 5 m. A ausência de retornos, neste caso, ocorre em função da densidade dos estratos superiores, entre eles o dossel, que acaba por interceptar a maior parte dos feixes do laser. Além dos pixels “no data”, também são encontrados pixels com valor zero. Estes pixels, que representam 13,8% da parcela, indicam áreas sem a presença de retornos no estrato de 1 a 5 m. Os outros valores encontrados refletem a diversidade da densidade do sub-bosque, sendo que quanto mais próximo de zero, menor a densidade de retornos no estrato estudado. Já havia sido observado em campo que a estrutura do sub-bosque não é uniforme: alguns trechos apresentam maior densidade de indivíduos, galhos e folhas, enquanto outros apresentam baixa densidade, facilitando, inclusive, a locomoção.

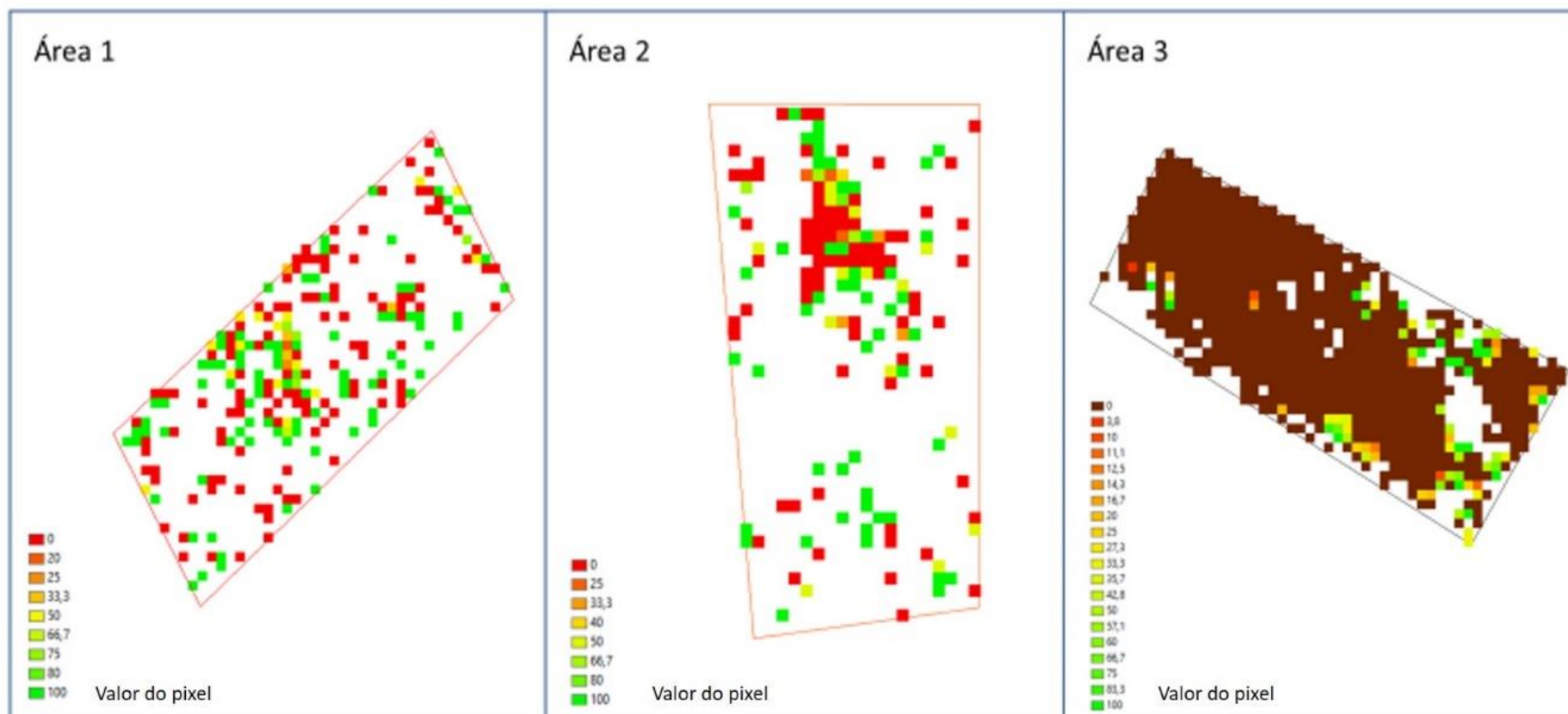


Figura 49: Modelo de Densidade Relativa da Vegetação das três áreas de estudo localizadas no Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.

Na Área 2, a porcentagem de área sem dados é de 82,3%, maior do que a encontrada na Área 1. A maior uniformidade do dossel, associada a uma altura média dos indivíduos arbóreos mais baixa, quando comparado a Área 1, podem explicar, em parte, este resultado, uma vez que a ausência de dados está relacionada à existência de um dossel denso (D'OLIVEIRA et al. 2014). As áreas com pixel com valor zero, compreendem 9%, sendo que uma parte destes pixels se encontra espacialmente agregado, no meio da parcela em sua porção superior. Assim como observado na Área 1, na Área 2 também foi percebido em campo a estrutura não uniforme do sub-bosque.

Por outro lado, na Área 3, a maior parte da parcela (74,3%) é representada por pixels no valor zero. A escolha da localização desta área teve como objetivo explorar a capacidade do uso da tecnologia LiDAR na identificação de áreas sem sub-bosque. O MDC permitiu apenas a identificação das clareiras, enquanto que no MDRV foi possível identificar toda a área sem sub-bosque (Figura 50). Algumas áreas sem dados estão localizadas próximo à borda da parcela, onde há influência dos indivíduos adjacentes a esta. Os valores referentes às diferentes densidades do sub-bosque estão localizados em uma das laterais e em uma das extremidades da parcela, onde se encontravam alguns poucos indivíduos que compunham o sub-bosque.

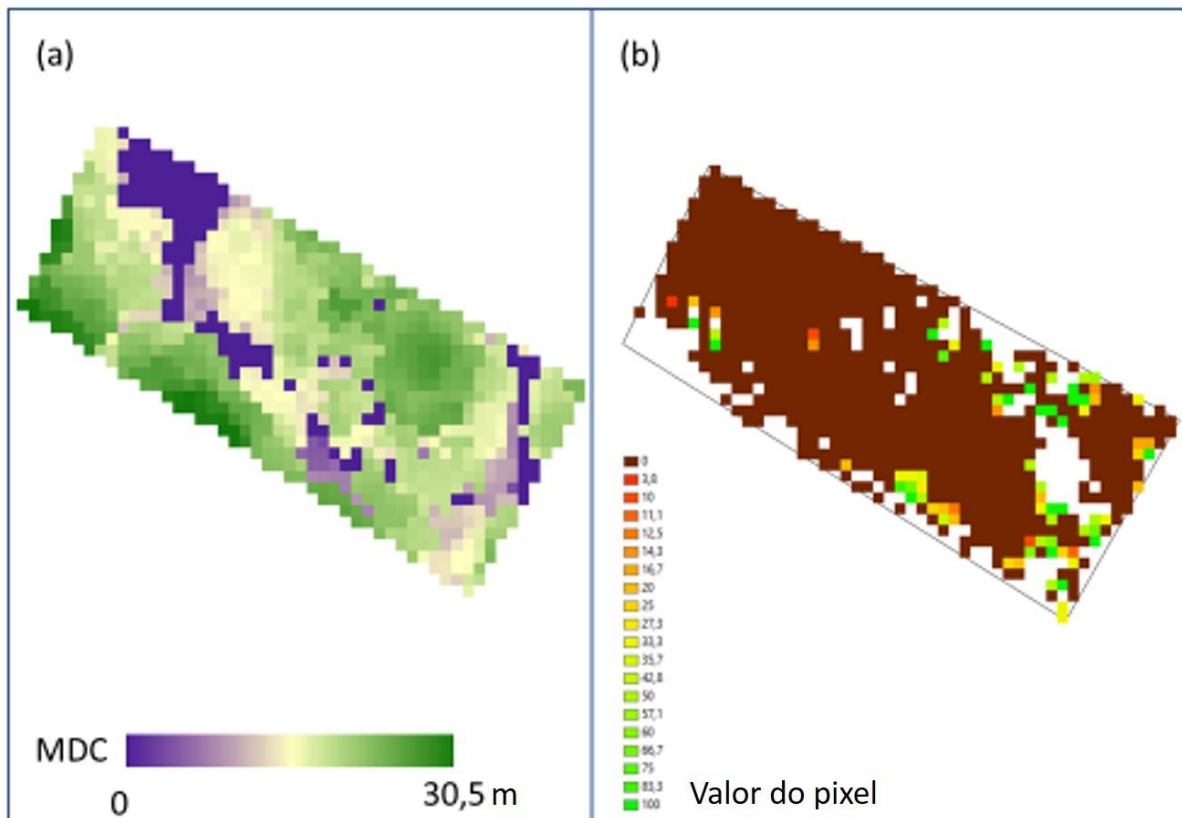


Figura 50: Modelo Digital de Copas (a) da Área 3 onde são identificadas apenas as clareiras existentes na Área. O Modelo de Densidade Relativa da Vegetação (b) permite “enxergar” toda a área de recreação com ausência de sub-bosque, representado pelos pixels de valor 0 (zero), onde foi instalada a parcela.

Quando analisamos visualmente o MDRV para todo o Setor “A” do PARNA, é possível identificar todas as estradas (Figura 51), algumas trilhas, áreas destinadas a recreação e pátios de estacionamento, além de algumas cicatrizes provenientes de movimentos de massa, cujos pixels apresentam valor zero, uma vez que não há sub-bosque¹⁶. Os afloramentos rochosos também são identificados com pixels com valor zero, assim como as áreas com gramíneas. Segundo d’Oliveira et al. (2014), é importante identificar estas áreas principalmente em estudos relativos à estimativa de biomassa a partir de dados LiDAR. A identificação destas áreas também pode ser utilizada para orientar ações de manejo ou recuperação florestal.

A maior parte do Setor “A” (59,2%) é representada por áreas sem dados (“no data”), reflexo da densa cobertura vegetal que recobre a maior parte da área. As células com valor 0 (zero) compreendem 12,2% da área. Entretanto, é preciso cuidado ao interpretar os resultados. As construções encontradas no PARNA, cujos retornos erroneamente foram classificados como vegetação, apresentam valores de pixel de 100, o que, de acordo com metodologia proposta por

¹⁶ Assim como nas Áreas levantadas em campo, o MDRV para o Setor “A” do PARNA da Tijuca, foi gerado com os parâmetros de 5 e 1 m. Desta forma, considera-se o sub-bosque como o estrato cujos indivíduos encontram-se entre as alturas de 1 e 5 m.

d' Oliveira et al. (2012), significaria a presença de denso sub-bosque. No entanto, estes valores acabam sendo altos em função da altura dos telhados, cujas alturas estão dentro do intervalo definido como aquele onde se encontra o estrato do sub-bosque. O levantamento de novas áreas em campo para validar os padrões encontrados permitirão maiores inferências acerca da densidade do sub-bosque.

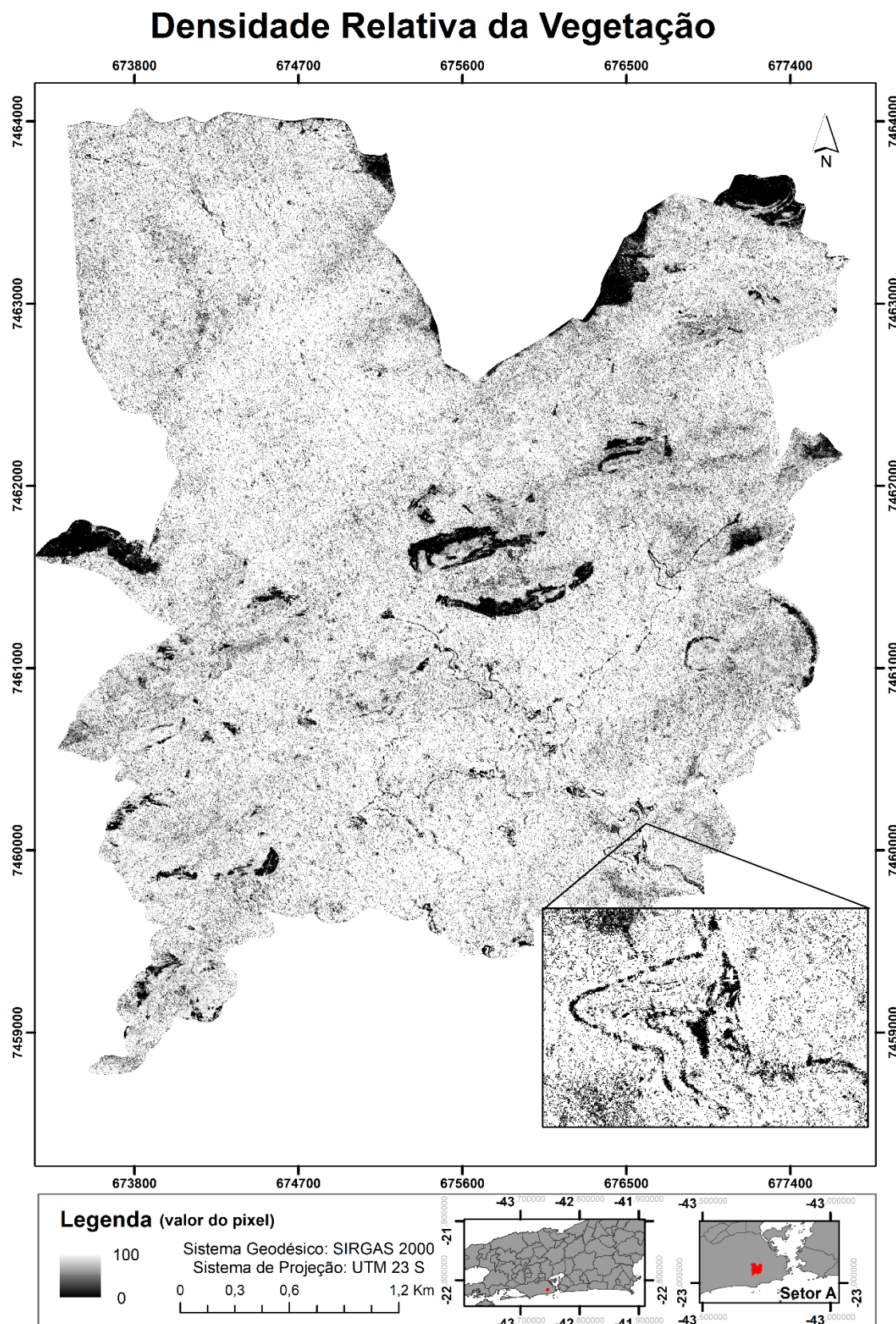


Figura 51: Modelo de Densidade Relativa da Vegetação (MDRV) elaborado a partir da nuvem de pontos LiDAR. Destaque para as estradas que cortam o Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.

4.5 Extração de métricas da nuvem de pontos

Foram extraídas métricas da nuvem de pontos correspondentes às três áreas amostradas durante os trabalhos de campo. Para cada uma das áreas foi realizada a normalização da nuvem de pontos, a partir da subtração do MDT. Num primeiro momento, foram extraídas as métricas referentes a todos os retornos acima de 1 m, para evitar algum ruído referente a filtragem da nuvem de pontos. Os resultados estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Métricas extraídas da nuvem de pontos para as três parcelas amostradas, considerando os retornos acima de 1m.

Métricas	Área 1	Área 2	Área 3
Total de retornos	7.122	6.918	13.529
Total de 1º retornos	5.654	6.439	11.401
Total de retornos acima de 1 m	6.941	6.771	8.537
Nº de primeiro retorno acima de 1 m	5.612	6.364	7.704
Nº de segundo retorno acima de 1 m	1.221	02	765
Nº de terceiro retorno acima de 1 m	106	5	64
Nº de quarto retorno acima de 1 m	2	0	4
Altura mínima*	1,059	1,009	1,024
Altura máxima	30,41	28,972	30,13
Altura média	18,87	18,49	17,78
Moda da altura	22,05	19,651	18,58
Desvio padrão da altura	5,71	4,85	4,29

*Altura mínima acima de 1 m

A Área 1 apresentou um total de 7.122 retornos, enquanto que na Área 2 foram encontrados 6.918 retornos (Figura 52). Existe uma pequena diferença entre estas duas áreas, e a maior quantidade de retornos encontrada na Área 1 pode estar relacionada à sobreposição de quatro faixas de escaneamento. Já na Área 3, a quantidade de retornos foi muito maior (13.529), e pode estar relacionada a presença de clareiras que chegam até 66 m², pois percebe-se que em áreas de solo exposto e afloramentos, existe uma quantidade muito grande de retornos. A diferença entre o total de retornos e o total de retornos acima de 1 m foi de 4.992 pontos na Área 3. Estes pontos compreendem àqueles classificados como *Ground* que, após a normalização, são

excluídos das análises.

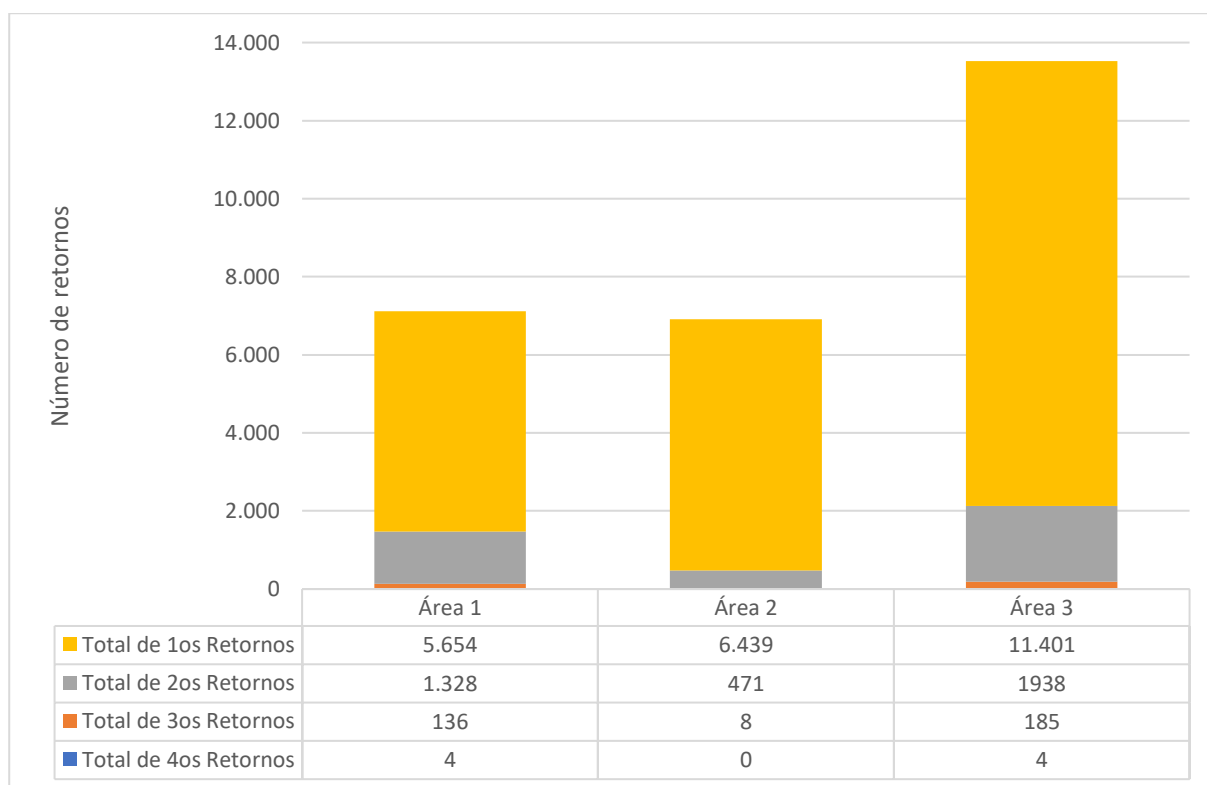


Figura 52: Número de retornos da nuvem de pontos LiDAR nas três áreas de estudo no Setor “A” do Parque Nacional da Tijuca.

Do total de retornos acima de 1 m (6.941), na Área 1, 5.612 (cerca de 80%) correspondem ao primeiro retorno, 1.221 ao segundo, 106 ao terceiro e apenas 2 ao quarto retorno. Apesar do equipamento registrar retorno múltiplos, grande parte destes não consegue penetrar através da densa vegetação. Na Área 2, quase 94% dos retornos são representados por primeiros retornos. Na Área 1, como visto no perfil de vegetação de um trecho da área (ver Figura 34), existem aberturas no dossel que podem explicar uma quantidade maior de segundos retornos. Já na Área 2, o dossel é mais fechado, formando uma barreira natural aos feixes de laser. Na Área 3, também há uma maior quantidade de retornos que correspondem aos primeiros (cerca de 90%). As elevações máximas encontradas são quase iguais às encontradas no MDC, com exceção da Área 2, cujo resultado pode estar relacionado ao método de interpolação utilizado.

Na Figura 53 está apresentado o número de retornos nas três áreas de estudo, considerando diferentes estratos de alturas.

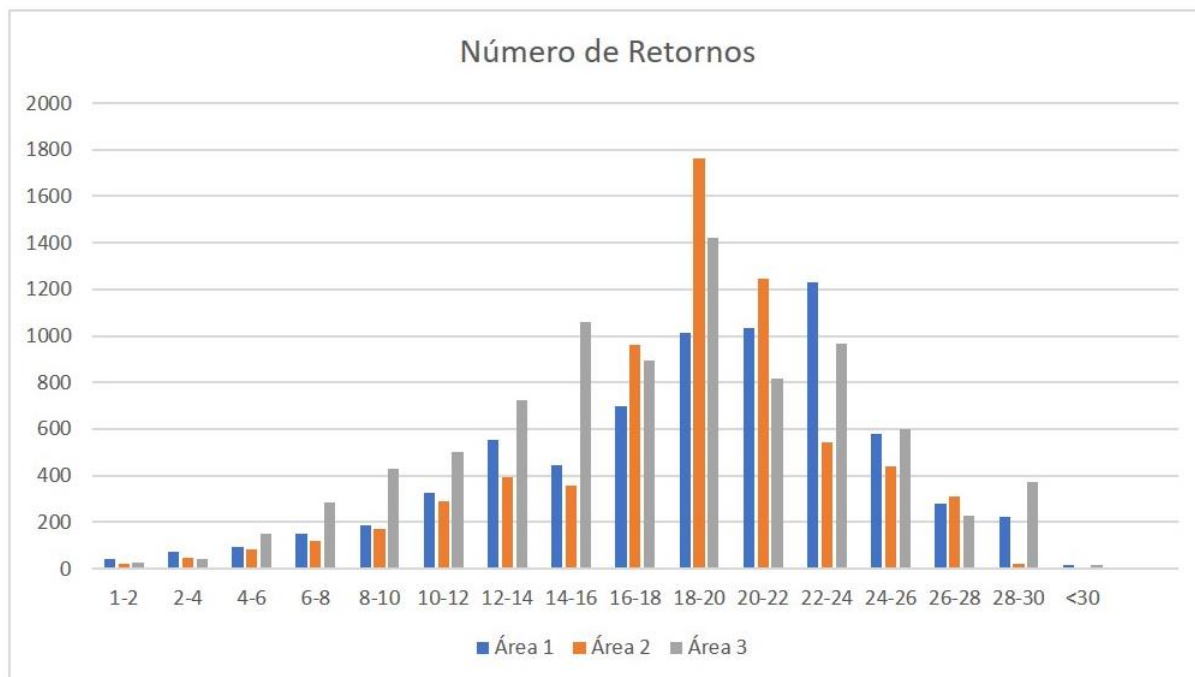


Figura 53: Número de retornos em cada um dos estratos analisados nas três áreas levantadas em campo.

Na Área 1, a maior parte dos retornos (17,2%) encontra-se no intervalo de altura de 22 a 24 m. Este intervalo de altura corresponde aos indivíduos que compõem o dossel. Tanto para esquerda ou direita do eixo, há uma queda no número de retornos, com exceção do intervalo entre 12 e 14 m, em que há um pequeno aumento no número de retornos. Como comentado anteriormente, na Área 1 o dossel não é contínuo e, em alguns trechos, são encontrados indivíduos de menor porte com exposição total à luz solar. A existência de um indivíduo de grande porte morto, mesmo ainda em pé, também abriu a possibilidade para que jovens ocupassem esta nova situação de dossel.

Na Área 2, como o dossel é mais baixo, a maior parte dos retornos encontra-se no intervalo de altura entre 18 e 20 m. Já na Área 3, a maior parte dos retornos também se encontra no estrato com intervalo de 18 a 20 m. Entretanto, podemos observar um mesmo padrão de comportamento do gráfico nas três áreas estudadas. Existe uma maior quantidade de retornos em classes de altura maiores, enquanto que nas classes inferiores o número de retornos diminui. Esse comportamento mostra que, mesmo com uma boa densidade de pts/m², em função da densidade do dossel, muito poucos pontos conseguem penetrar nos estratos mais inferiores da floresta.

5. Conclusões

O uso de dados LiDAR para o estudo da vegetação vem se mostrando bastante promissor permitindo que se acesse informações das florestas que antes apenas eram possíveis através de extensos inventários florestais. Sem tornar o uso de dados de campo indispensáveis, a utilização da tecnologia LiDAR permite, agora, melhores estimativas de parâmetros florestais numa escala de paisagem, dependendo apenas da disponibilidade de dados. Nesta Tese, apesar das dificuldades com manipulação dos dados (nuvem de pontos), mais pela pouca experiência da autora desta Tese do que pelo dado em si, foram alcançados bons resultados que permitem uma utilização maior do que apenas o uso para restituição da base do Município, ou para estudos de deslizamentos, motivos pelos quais os dados foram adquiridos.

Existem, atualmente, inúmeros programas capazes de ler arquivos .las, desde *softwares* pagos até gratuitos. O Fusion, *software* desenvolvido pelo Serviço Florestal do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), se mostrou bastante eficaz em várias fases desta pesquisa, como na interpolação da nuvem de pontos para gerar o MDT, MDS e MDC. Existem inúmeras opções de linhas de comando que permitem explorar exaustivamente os dados. Apenas neste *software*, foi possível extrair da nuvem de pontos normalizada, métricas dos retornos considerando diferentes estratos de altura. Também neste *software*, foi possível gerar um modelo que permitisse “enxergar” embaixo do denso dossel que recobre a área de estudo. Ao excluir os retornos que chegam no dossel da floresta foram identificadas as estradas e áreas de recreação do Setor “A” do PARNA da Tijuca, que não possuem sub-bosque.

Com relação a avaliação dos MDT gerados, quanto menor o tamanho do pixel, maior foi a tendência em subestimar a altura, quando comparado com os dados da Estação Total. Com relação aos *softwares* utilizados, tanto o Fusion quanto o ArcGis apresentaram bons resultados. Em relação ao método de interpolação, no Fusion, o *Tinsurfacecreate* teve um melhor desempenho, garantindo melhor acurácia e menos tendência. No ArcGis o desempenho dos dois métodos avaliados se mostrou muito parecido; em determinadas escalas o método *Binning* teve melhor resultado enquanto que em outras o TIN apresentou melhor desempenho.

O levantamento da vegetação usando $DAP \geq 2,5$ cm se mostrou bastante extenuante e em termos da descrição da estrutura da vegetação, o $DAP \geq 5$ cm teria sido suficiente. No entanto, como o objetivo da Tese era associar os resultados do levantamento da vegetação com os dados LiDAR, no que diz respeito a estratificação vertical da floresta, o critério de amostragem foi adequado. A análise dos resultados das Áreas 1 e 2, permitiu enquadrá-las em estágio avançado de sucessão. A escolha da Área 3, como representativa de uma área sem sub-bosque, também

atendeu aos objetivos da Tese.

As estimativas de altura através do LiDAR, quando comparadas com as áreas levantados em campo, teve um bom desempenho, quando avaliadas as alturas máximas. As diferenças encontradas foram pequenas (1,6 m na Área 1; 4,3 m na Área 2 e 5,1 m na Área 3) se considerado que altura levantada em campo é uma estimativa, e podem estar relacionadas ao intervalo de tempo do levantamento e da amostragem em campo, assim como resultado da interferência das copas das árvores presentes nas bordas das parcelas. Com relação a altura média, é preciso ampliar estas análises realizando novas mensurações em campo para buscar melhorar esta correlação.

O MDC indicou que a maior parte do Setor “A” do PARNA, quando analisado apenas o parâmetro altura, encontra-se em estágio avançado de sucessão, conforme já detectado por outros estudos. No MDRV, foi possível identificar todas as estradas do Setor “A” e pequenas trilhas, além das construções e áreas de recreação. O interessante deste modelo foi permitir que se “enxergasse” além do dossel, que no caso da Floresta da Tijuca é quase totalmente contínuo. Nas Áreas 1 e 2, a densidade do sub-bosque é variável, sendo que, na maior parte de ambas as parcelas, são encontradas células com ‘no data’. Estas células representam áreas, em que a densidade da vegetação acima de 5 m impede que os feixes de laser cheguem ao estrato inferior da floresta. Na Área 3 foi possível identificar toda a área da parcela com ausência de sub-bosque. A extração das métricas da nuvem de pontos mostrou que a maior parte dos retornos fica retida nas árvores que compõem o dossel.

Com relação aos desdobramentos da pesquisa:

- Sugere-se que sejam levantados mais pontos com Estação Total, de modo a garantir a acurácia dos modelos gerados para toda área do Setor “A”. Mesmo sendo mais custoso, o levantamento com aparelhos GNSS em áreas com cobertura florestal se mostrou muito instável, o que pode comprometer os resultados encontrados.
- O levantamento de mais parcelas com dados referentes à arquitetura da vegetação é fundamental para melhor explorar os dados LiDAR disponíveis. Uma das grandes possibilidades de uso desta tecnologia é a estimativa de biomassa acima do solo e de estoques de carbono numa escala de paisagem. No entanto, para que isto seja possível é necessário um maior número de parcelas para que se possa correlacionar as métricas extraídas a partir da nuvem de pontos, com os dados de vegetação.
- O delineamento do desenho amostral é muito importante também, para garantir resultados mais estáveis. Como apontado no texto, em florestas tropicais, é recomendado parcelas a partir de 0,25 ha. Esta área mínima de parcela diminui o

erro de posicionamento além da menor interferência do efeito de borda e incertezas.

- Em termos de esforço amostral referente ao levantamento e vegetação, sendo o único objetivo a estimativa de biomassa, sugere-se a amostragem com DAP mínimo de 10 cm. A redução do esforço amostral decorrente da adoção deste critério de inclusão permitirá a inclusão de mais áreas ao longo do Setor “A”.
- Ainda com relação à estimativa de biomassa, sugere-se que as áreas com ausência de sub-bosque, como as estradas que cortam o PARNA e as áreas de recreação, sejam identificadas, permitindo avaliar o comportamento do resultado encontrado.

6. Bibliografia

- ABREU, M.A. **Natureza e Sociedade no Rio de Janeiro**. SMCTE, Rio de Janeiro, 336 p., 1992.
- ABREU, K.M.P., COUTINHO, L.M. 2014. Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo da vegetação e métricas da paisagem. **Vértices**, v.16, n.1, 173-198.
- ADAMS, J.C., CHANDLER, J.H. Evaluation of LiDAR and medium scale photogrammetry for detecting soft-cliff coastal change. **The Photogrammetry Record**, v.17, n.99, p.405-418, 2002.
- ALVES, L.F.; VIEIRA, S.A.; SCARANELLO, M.A. CAMARGO, P.B.; SANTOS, F.A.M.; JOLY C.A., et al. Forest Structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). **Forest Ecology and Management**, v.260, p.679-691, 2010.
- ANDERSEN, H-E.; MCGAUGHY, R.J., REUTEBUCH, S.E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, p. 441-449, 2005.
- ANDERSEN, H.E.; REUTEBUCH, S.E.; MCGAUGHEY, R.J. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne LIDAR and conventional field methods. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.32, n.5, p.355-366, 2006.
- BARBOSA, L.S. Avaliação de Modelos Digitais de Terreno gerados por escaneamento a laser (LiDAR) no Maciço da Tijuca, RJ. **Dissertação de Mestrado**. Departamento de Geografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 131 p., 2015
- BARROS, R.S.; CRUZ, C.B.M; RABACO, L.M.L. & FAGUNDES, F. de O. Avaliação da Exatidão Planialtimétrica de produtos oriundos de Radar Interferométrico e LiDAR em área coberta por floresta. In: **Anais... XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, INPE, p. 2126-2133, 2013
- BECKER, J.H. & CENTENO, J.A.S. Avaliação de métodos de filtragem de nuvens de pontos derivados do sistema laser scanner aerotransportado para obtenção de MDT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 4, p. 651-659, 2013.
- BECKNEL, J.M.; KELLER, M.; PIOTTO, D.; LONGO, M.; SANTOS, M.N.; SCARANELLO, M.A.; CAVALCANTE, R.B.O., PORDER, S. Landscape-scale lidar analysis of aboveground biomass distribution in secondary Brazilian Atlantic Forest. **BioTropica**, v.50, n.3, p.520-530, 2018.
- BERGEN, S. J., GOETZ, R. O., DUBAYAH, G. M., HENEBRY, C. T., HUNSAKER, M. L., IMHOFF, R. F., NELSON, G. G., PARKER, & V. C. RADELOFF. Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. **Journal of Geophysical Research**. V.114, p. 1-13, 2009.
- BOUDREAU, J.; NELSON, R.F.; MARGOLIS, H.A.; BEAUDOIN, A.; GUINDON, L., KIMES, D.S. Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3876-3890, 2008.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, DOS RECURSOS HÍDRICOS E DA AMAZÔNIA LEGAL – MMA. **Relatório nacional para a convenção sobre a diversidade biológica**. Brasília, 283p. 1998
- _____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. PROJETO DE CONSERVAÇÃO E UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DA DIVERSIDADE BIOLÓGICA (PROBIO). **Mapeamento da Cobertura Vegetal do Bioma Mata Atlântica, ano base 2002**. Convênio UFRJ / IESB / UFF. Projeto Integrado para Mapeamento da Cobertura Vegetal do Brasil na escala 1:250.000. 2006.
- _____. **Decreto-lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acesso em 02 julho 2017.
- BROKAW, N.V.L. The definition of treefall gap and its effect on measures of forest dynamics. **Biotropica**, v.14, p.158-160, 1982.
- BUDOWSKI, G. Forest succession in tropical lowlands. **Turritalia**, v. 13, n.1, p. 231- 241, 1963
- BURGER, D.M.D.; DELETTI, W.B.C. Allometric models for estimating the phytomass of a secondary Atlantic Forest area of southeastern Brazil. **Biota Neotropica**, v.8, n.4, p.131-136, 2008.
- CASTILLO-NÚÑEZ, M., SÁNCHEZ-AZOFEIFA, A. CROITORU, A., RIVARDE, B., CALVO-ALVARADO, J. & DUBAYAH, R.O. Delineation of secondary succession mechanisms for tropical dry forests using LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2217-2237, 2011.

- CARVALHO, F.A.; NASCIMENTO, M.T. Estrutura diamétrica da comunidade e das principais populações arbóreas de um remanescente de Floresta Atlântica Submontana (Silva Jardim-RJ, Brasil). **Revista Árvore**, v. 33, n. 2, 2009.
- CENTENO, J.A.S & MITSHTA, E.A. Laser Scanner Aerotransportado no estudo de áreas urbanas: a experiência da UFPR. In: **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, p.3645-3652, 2007. 2007
- CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FOLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J.-P.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIERA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, n. 1, p. 87-99, 2005
- CHOMA, A.; RATCLIFF, C., FRISINA, R. Evaluation of remote sensing technologies for high-resolution terrain mapping. **Proceedings of SSC 2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis: The national biennial Conference of the Spatial Sciences Institute**, Melbourne, p.751-760, 2005.
- CLARK, M.L.; CLARK, D.B., ROBERTS, D.A. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. **Remote Sensing of Environment**, v.91, p.69-89, 2004. et al 2004
- COELHO-NETTO, A.L. **Surface hidrology and soil erosion in a tropical mountainous rainforest drainage basin**, RJ, Phd thesis, Katholieke Univ. Leuven, Belgium, 181 p., 1985.
- COELHO-NETTO, A.L. A interface florestal-urbana e os desastres naturais relacionados à água no Maciço da Tijuca: desafios ao planejamento urbano numa perspectiva sócio-ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**, v.16, p.46-60, 2005.
- COELHO-NETTO, A.L.; AVELAR, A.S.; FERNANDES, M.C. & LACERDA, W.A. Landslide susceptibility in a mountainous geocosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The role of morphometric subdivision of the terrain. **Geomorphology**, v.87, p.120–131, 2007.
- CONGALTON, R.G.; GREEN, K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. **Positional Accuracy**. 2. Ed. Boca Raton, Florida, cap.3, p.19-53, 2009.
- CONTO, T.; GORGENS, E.B.; SILVA, A.G.P.; LARANJA, D.C.F.; RODRIGUES, L.C.E. Caracterização do perfil vertical do dossel de um trecho de Mata Atlântica através de escaneamento laser aerotransportado. **Scientia Florestalis**, v.43, n.108, p. 873-884, 2015.
- CRÓSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. IG/UNICAMP, Campinas, 1992.
- CRUZ, C.B.M.; BARROS, R.S.; CARDOSO, P.V.; REIS, R.B.; ROSARIO, L.S.; BARBOSA, S.S.; RABACO, L.M.L.; LOURENÇO, J.S.Q. Avaliação da exatidão planimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LiDAR. In: **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, PR, INPE, p. 5463-5470, 2011.
- DOUBECK, A. **Topografia**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1989.
- DIAS, M.A., COELHO-NETTO, A.L. Distribuição de manchas de gramínea em um fragmento de floresta Atlântica urbano montanhosa – Maciço da Tijuca, RJ. **Revista de Geografia**, v.especial VIII SINAGEO, n.2, p.148-164, 2011.
- D'OLIVEIRA, Marcus VN et al. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 479-491, 2012.
- D'OLIVEIRA, M.V.N.; FIGUEIREDO, E.O.; PAPA, D.A. **Uso do Lidar como ferramenta para o manejo de precisão em florestas tropicais**. Embrapa, DF, 130 p., 2014.
- DLUGOSZ, F.L., ROSOT, N.C., ROSOT, M.A.D. & OLIVEIRA, Y.M.M. de. 2005. Uso da segmentação por crescimento de regiões em imagens Ikonos na discriminação de tipologias da Floresta Ombrófila Mista. In: **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, pp. 1493-1500, Goiânia.
- DRAKE, K.B.; DUBAYAH, R. O., CLARK D.B.; KNOX, R.G., BLAIRD, J.B, HOFTON, M.A., CHAZDON, R.L., WEISHAMPEL, J.F., PRINCE, S.D. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. **Remote Sensing of Environment**, v.79, p.305-319, 2002.
- DRUMOND, J.A. **Devastação e preservação ambiental** – os parques Estaduais do Rio de Janeiro. Niterói, Eduff, 1997.

- FELGUEIRAS, C.A. “Modelagem Numérica do Terreno.” In: **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Cap. 7. 1999. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>
- FENG, Y.; LU, D.; CHEN, Q.; KELLER, M.; MORAN, E.; SANTOS, M.N.; BOLFE, E.L., BATISTELLA, M. Examining effective use of data sources and modelling algorithms for improving biomass estimation in a moist tropical forest of the Brazilian Amazon. **International Journal of Digital Earth**, v.10, n.10, p.996-1016, 2017.
- FERREIRA, L.G.; FERREIRA, N.C.; FERREIRA, M.E. Sensoriamento Remoto da vegetação: evolução e estado da arte. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v.30, n.4, p.379-390, 2008.
- FELFILI, J.M.; Rezende, R.P. Conceitos e métodos em fitossociologia. **Comunicações Técnicas Florestais**, v.5, p.1-68, 2003.
- FERREIRA, F.R.; CINTRA, J.P. Avaliação da acurácia altimétrica dos dados LIDAR utilizando a metodologia do Programa Nacional de Elevação Digital dos Estados Unidos. In: **Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia**, Rio de Janeiro, SBC, p. 487-491, 2017.
- FLORENZANO, T.G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo, Oficina de Textos, 2000.
- GATZIOLIS, D.; ANDERSEN, H.-E. **A guide to LIDAR data acquisition and processing for the forests of the Pacific Northwest**. Portland, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2008.
- GENTRY, A.H., EMMONS, L.H. Geographical variation in fertility, phenology, and composition of the understory of Neotropical Forests. **Biotropica** v.19, n.3, p. 216-227, 1987.
- GORGENS, E.B.; SILVA, A.G.P.; RODRIGUEZ, L.C.E. **Lidar: aplicações florestais**. 1 Ed., Curitiba, PR. CRV, 2014.
- GROOM, G., MUCHER, C.A., IHSE, M., WRBKA, T. Remote Sensing in landscape ecology: experiences and perspectives in a European context. **Landscape Ecology**, v.21, p.391-408, 2006.
- GRUB, P.J., LLOYD, J.R., PENNINGTON, T.D. e WHITMORE, T.C. A comparison of montane and lowland rain forest in Ecuador. I. The forest structure, physiognomy and floristics. **Journal of Ecology**, v.51, p.567-601, 1963.
- GIONGO, M.; KOEHLER, H.S.; MACHADO, S.A.; KIRCHNER, F.F. & MARCHETTI, M. LIDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.
- GOODWIN, N.R.; COOPS, N.C.; CULVENOR, D.S. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. **Remote Sensing of Environment**, v.103, p.140-152, 2006.
- GUEDES-BRUNI, Rejan R. et al. Composição florística e estrutura de dossel em trecho de floresta ombrófila densa atlântica sobre morrote mamelonar na Reserva Biológica de Poço das Antas, Silva Jardim, Rio de Janeiro, Brasil. **Rodriguésia**, p. 429-442, 2006.
- HEINSDIJK, Dammis et al. **A floresta do norte do Espírito Santo**. Ministério da Agricultura. Setor de Inventários Florestais, 1965.
- HODGSON, M. E.; JENSEN, J.; RABER, G.; TULLIS, J.; DAVIS, B. A.; THOMPSON, G.; SCHUCKMAN, K. Evaluation of lidar-derived elevation and terrain slope in leaf-off conditions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 71, n. 7, p. 817-823, 2005.
- HODGSON, M. E.; BRESNAHAN, P. Accuracy of airborne LiDAR-derived elevation: empirical assessment and error budget. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 70, n. 3, p. 331-339, 2004.
- ICMBIO. 2008. Plano de manejo. Parque Nacional da Tijuca. Disponível em <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/parna_tijuca_pm.pdf>. Acesso em 20 de novembro de 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Série: Manuais Técnicos em Geociências. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- INSTITUTO PEREIRA PASSOS (IPP)/Prefeitura do Rio de Janeiro. Armazém de Dados. Disponível em:www.armazemdedados.rio.rj.gov.br. Acesso: setembro de 2017.
- JAKUBOWSKI, M. K.; GUO, Q.; KELLY M. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 245-253, 2013
- JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução Epiphany J.C.N. (coordenador) ... [et al.]. –São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

- KERR, J. T.; OSTROVSKY, M. From space to species: ecological applications of remote sensing. **Trends in Ecology and Evolution**, n. 18, p. 299-305, 2003.
- KURTZ, B. C., ARAÚJO, D. S. D. de. Composição florística e estrutura do componente arbóreo de um trecho de Mata Atlântica na Estação Ecológica Estadual do Paraíso, Cachoeiras de Macacu, Rio de Janeiro, Brasil. **Rodriguésia**, v. 51, p. 69-112, 2000.
- LAETA, T., SILVA, L.F.C.F.; FERNANDES, M.C. Observação do impacto do uso de área projetada no índice de Reserva Legal no Maciço da Tijuca. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 1, 2016.
- LANG, S.; TIEDE, D.; MAIER, B., BLASCHKE, T. 3D Forest Structure analysis from optical from LIDAR data. **Ambiência**, Edição Especial 1, v. 2, p. 95-110, 2006.
- LASKA, Mark S. Structure of understory shrub assemblages in adjacent secondary and old growth tropical wet forests, Costa Rica. **Biotropica**, v.29, n.1, p.29-37, 1997.
- LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; PARKER, G.G., HARDING, D.J. Lidar Remote Sensing for Ecosystem studies. **BioScience**, v. 52, n. 1, p. 19-30, 2002.
- LEITOLD, V.; KELLER, M.; MORTON, D.C., SHIMABUKURO, Y.E. Landscape-scale variation in forest structure and biomass along an elevation gradient in the Atlantic Forest of the Serra do Mar, Brazil. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, João Pessoa, p. 1192-1199, 2015.
- LEITOLD, V.; KELLER, M.; MORTON, D.C.; COOK, B.D.; SHIMABUKURO, Y.E. Airborne lidar-based estimates of tropical forest structure in complex terrain: opportunities and trade-offs for REDD+. **Carbon balance and management**, v. 10, n. 1, p. 3, 2015. (a)
- LEITOLD, V.; KELLER, M.; MORTON, D.C. & SHIMABUKURO, Y.E. Landscape-scale variation in forest structure and biomass along an elevation gradient in the Atlantic Forest of the Serra do Mar, Brazil. In: **Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, João Pessoa, PB. INPE, p.1192-1199, 2015.
- LEITOLD, V.; MORTON, D.C.; LONGO, M.; SANTOS, M.N.; KELLER, M. & SCARANELLO, M. El Niño drought increased canopy turnover in Amazon forests. **New Phytologist**, v.213, n.3, p.959-971, 2018.
- LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.; ST-ONGE, B. & FLOOD, M. LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography**, v. 27, n.1, P.88-106, 2003.
- LIMA, Francisco Gabriel Ferreira et al. Avaliação de Métodos de Interpolação na Geração de Modelos Digitais de Elevação de Precisão em Zonas Costeiras de Alta Dinâmica Sedimentar. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 3, 2016.
- LIU, X. Airbone LiDAR for DEM generation: some critical issues. **Progress in Physical Geography**, v. 32, n.1, p. 31-49, 2008.
- LOPES, W. P., SILVA, A. F., SOUZA, A. L., NETO, J. A. A. M. Estrutura fitossociológica de um trecho de vegetação arbórea no Parque Estadual do Rio Doce – Minas Gerais, Brasil. **Acta Botanica Brasílica**, v. 16, n. 4, p. 443-456, 2002.
- MACEDO, R.C.; SANTOS, J.R.; SOARES, J.V. Validação de modelo digital de terreno em área florestal com relevo ondulado, gerado a partir de dados LiDAR. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.65, p.695-702, 2013.
- MATTOS, C.C.L.V. Mesoclima da cidade do Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente** (Série Técnica, p.1-22, 2006.
- MATOS, J.J.B.S. Composição florística de espécies arbóreo-arbustivas em trecho de borda situado no Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro, Brasil. **Dissertação de Mestrado**. UFFRJ, p.77, 2007.
- MCGAUGHEY, R. J. FUSION manual, version 2.90. **USDA Forest Service**, 2016.
- METZGER, Jean Paul. Estrutura da paisagem e fragmentação: análise bibliográfica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 71, n. 3, p. 445-463, 1999.
- MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações**. São José dos Campos, INPE, 2001.
- MORO, M.F.; MARTINS, F.R. Métodos de levantamento do componente arbóreo-arbustivo. In: FELFILE, J.M. et al. (Eds.). **Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de casos**. Viçosa, Editora UFV, 556 p., 2011
- NASCIMENTO, Henrique EM; LAURANCE, William F. Total aboveground biomass in central Amazonian rainforests: a landscape-scale study. **Forest ecology and management**, v. 168, n. 1-3, p. 311-321, 2002.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**, 2 edição. São Paulo, 2002.

- OLIVEIRA, L.T. **Aplicação do LIDAR em florestas plantadas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras, MG, 2011.
- OLIVEIRA, R.R. ZAÚ, A.S.; LIMA, D.F.; SILVA, M.B.R., VIANNA, M.C. Dinâmica ecológica de encostas no Maciço da Tijuca - RJ. **Oecologia Brasiliensis** v.1, p. 523-541, 1995.
- OLIVEIRA, R.R. Ação antrópica e resultantes sobre a estrutura e composição da Mata Atlântica na Ilha Grande, RJ. **Rodriguesia**, v.53, n.82, p.33-58, 2002.
- OTAVIANO, J.C.R. Estimativa de estoque de carbono e produção de biomassa na Reserva Ecológica Estadual da Juatinga, Paraty, Rj. **Dissertação de Mestrado**. Escola Nacional de Botânica Tropical, 44 p., 2018.
- PACHECO, A.P.; CENTENO, J.A.S.; ASSUNÇÃO, M.G.T., BOTELHO, M.F. Classificação de pontos LiDAR para a geração do MDT. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n 3, p. 417-438, 2011.
- PEIXOTO, A.L., ROSA, M.M.T., JOELS, L.C.M. Diagramas de perfil e de cobertura de um trecho da floresta de tabuleiro na Reserva Florestal de Linhares (Espírito Santo, Brasil). **Acta Botanica Brasilica**, v.9, n.2, p.177-193, 1995.
- PEIXOTO, G. L., MARTINS, S. V., SILVA, A. F., SILVA, E. Estrutura do componente arbóreo de um trecho de Floresta Atlântica na Área de Proteção Ambiental da Serra da Capoeira Grande, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 3, p. 539-547, 2004.
- PINAGÉ E.R.; KELLER, M.; dos-SANTOS, M.N.; SPINELLI-ARAUJO, L., LONGO, M. Avaliação temporal dos efeitos da exploração da madeira usando dados LiDAR. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa**, p: 834-841, 2015.
- PONZONI, F. 2001. Comportamento Espectral da Vegetação. In **Sensoriamento Remoto: Reflectância de Alvos Naturais**. Organizadores: Menezes, P.R e Madeira Netto, J. S. UNB, Brasília.
- PONZONI, F.J., SHIMABUKURO, Y.E. 2007. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. Ed. Parênteses, São José dos Campos.
- RAPAPORT, D.I.; MORTON, D.C.; LONGO, M.; KELLER, M.; DUBAYAH, R., SANTOS, M.N. Quantifying long-term changes in carbon stocks and forest structure from Amazon forest degradation. **Environmental Research Letters**, v.13, n.6, 2018. Disponível em <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac331>. Acesso em 10 de agosto de 2018.
- REINHARDT, R.D. Disparate distribution patterns between canopy and subcanopy life-forms in two temperate North American forests. **Vegetation**, v.103, p. 67-77, 1992.
- REUTEBUCH, S. E.; McGAUGHEY, R. J.; ANDERSON, H. E.; CARSON, W. W. Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 527-535, 2003.
- RICHARDS, P.W. 1952. **The Tropical Rain Forest – An Ecological Study**. Cambridge, At The University Press.
- RICHARDSON, J.J., MOSKAL, M. Strengths and limitations of assessing forest density and spatial configuration with aerial LiDAR. **Remote Sensing of Environment** n. 115, p. 2640-2651, 2011.
- RODRIGUES, R.R.; LIMA, R.A.F.; GANDOLFI, S., NAVE, A.G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**, v.142, p.1242-1251, 2009.
- RODRIGUEZ L.C.E.; POLIZEL, J.L.; FERRAZ, S.F.B.; ZONETE, M.F., FERREIRA, M.Z. Inventário florestal com tecnologia *laser* aerotransportada de plantios de *Eucalyptus* spp no Brasil. **Ambiência**, Edição Especial, v. 6, p: 67-80, 2010.
- ROSAS, R.O.; PEREIRA, J.L.G., COELHO-NETTO, A.L. Estudos dos solos de uma pequena bacia florestada, Parque Nacional da Tijuca – RJ. In: **IIIº Simpósio de Geografia Física Aplicada**, p. 34-42, 1992. et al 1992
- SANGSTER, C. Validating LiDAR—evaluating LiDAR accuracy using GPS. Lawrencetown, Nova Scotia: **Applied Geomatics Research Group, Centre of Geographic Science**, 2002.
- SATO, L.Y.; SHIMABUKURO, Y.E.; KELLER, M.; SANTOS, M.N. e CRUZ de ARAGÃO, L.E.O. Análise da relação entre dados de LiDAR e de biomassa florestal no sudoeste da Amazônia. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa, INPE, 3005-3012.
- SANTOS, R.H.L.; CARIS, E.A.P.; REIS, R.B.; KURTZ, B.C., CRUZ, C.B.M. Análise da contribuição do sensor LiDAR para determinação dos estágios sucessionais da vegetação – um estudo de caso par o Município de São Sebastião, SP, Brasil. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, João Pessoa, p: 3836-

3843, 2015.

SANTOS, A.P.; RODRIGUES, D.D.; SANTOS, N.T.; JUNIOR, J.G. Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.22, n.4, p.630-650, 2016. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000400036>. Acesso em 28 de maio de 2018.

SANTOS, E.G.; GERENTE, J.; NEGRÃO, P.; HASS, B. Avaliação de modelo digital de terreno (MDT) e declividade utilizando diferentes interpoladores a partir de dados LiDAR. In: **Anais... XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia**, Rio de Janeiro, SBC, p. 721-725, 2017.

SCHIMALLESKY, V., CENTENO, J.A.S. Avaliação da qualidade da avaliação altimétrica derivada da varredura a laser em uma região coberta por vegetação – estudo de caso. **Floresta**, v. 38, n. 4, p. 597-606, 2008.

SHEPHERD, G.J. *FitopacShell 1.6.4 Manual*, versão preliminar. Universidade Estadual de Campinas, 2006.

SILVA, A.F. Composição florística e estrutura de um trecho de mata atlântica de encosta no município de Ubatuba, São Paulo. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Estadual de Campinas, 153 p., 1980.

SILVA, A. **Ecologia de paisagem: fundamentos e aplicações**. Papel Virtual Editora, Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, C.A.; LIESENBERG, V.; KLAUBERG, C.; HUDAK, A.; LIEBERMANN, R.; RODRIGUES, L.C.E. Influência da interpolação na geração de MDTs a partir de pontos classificados LiDAR. In: **Anais... XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR. INPE, p.6105-6112, 2013.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas de Remanescentes Florestais da Mata Atlântica 2015-2016**. Disponível em: www.sosma.org.br/tag/atlas-dos-remanescente-florestais-da-mata-atlantica Acesso em: 10 jan, 2018.

SOUZA, L.G.; SOUSA, G.M.; COURA, P.H.F., FERNANDES, M.C. Avaliação de modelos digitais de elevação para estudos geocológicos no Maço da Pedra Branca, Rio de Janeiro, Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v.32, p. 21-33, 2009.

SCHIMALESKY, V.; CENTENO, J.A.S. Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a laser em uma região coberta por vegetação: estudo de caso. **Floresta**, v. 38, n. 4, 2008.

SKOWRONSKI, N.S.; CLARK, K.L., DUVENECK, M., HOM, J. Three-dimensional canopy fuel loading predicted using upward and downward sensing LiDAR systems. **Remote Sensing of Environment** n.115, p. 703–714, 2011.

SOLÓRZANO, A.; GUEDES-BRUNI, R.R.; OLIVEIRA, R.R. Composição florística e estrutura de um trecho de floresta ombrófila densa Atlântica com uso pretérito de produção de banana, no Parque Estadual da Pedra Branca, Rio de Janeiro, RJ. **Revista Árvore**, v.36, n.3, p.451-462, 2012.

TAROLLI, P. High-resolution topography for understanding Earth surface process: Opportunities and challenges. **Geomorphology**, v.216, p.295-312, 2014.

TIEPOLO, G.; CALMON, M.; FERRETTI, A.R. Measuring and monitoring carbon stocks at the Guaraqueçaba climate action project, Paraná, Brazil. In: **Proceedings of the International Symposium on Forest Carbon Sequestration and Monitoring**. Taipei: Taiwan Forestry Research Institute, p. 11-15, 2002.

TONHASCA JR. A. 2004. Os serviços ecológicos da Mata Atlântica. **Ciência Hoje**, v.35, n. 2 (205): 64-67.

VAUHKONEN, J.; ENE L.; GUPTA S.; HEINZEL J.; HOLMGREN J.; PITKÄNEN J.; SOLBERG S.; WANG Y.; WEINACKER H.; HAUGLIN K.M.; VEGARD L.; PACKALÉN P.; GOBAKKEN T.; KOCH B.; NÆSSET E.; TOKOLA T., MALTAMO M. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. **Forestry**, v. 85, n. 1, p. 27-40, 2012.

VÉGA, C., DURRIEU S. Multi-level filtering segmentation to measure individual tree parameters based on Lidar data: Application to a mountainous forest with heterogeneous stands. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.13, p. 646–656, 2011.

VEIGA, L.A.K.; ZANETTI, M.A.Z.; FAGGION, P.L. **Fundamento de Topografia**. Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, UFPR, Apostila Digital, 205 p. 2007.

VIEIRA, H. B. G. & GENRO, R. S. Inferência estatística para validação de documentos cartográficos obtidos com sensores remotos orbitais ou aerotransportados, em áreas de operação da Petrobras. In: **Anais...XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, PR. INPE, p.2339-2346, 2011.

WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E.; GERBERMANN, A.H. Vegetation indices in crop assessments. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, n. 2-3, p. 105-119, 1991.

- WEHR, A., Lohr, U. Airbone laser scanning – an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.54, n.2-3, p.62-82, 1999.
- XIE, Y.; SHA, Z. & YU, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review.
- YOCCOZ, N.G.; NICHOLS, J.D., BOULINIER, T. Monitoring of biological diversity in space and time. **Trends in Ecology and Evolutions**, v.16, n. 8, p. 446-453, 2001.
- YOUNG, R.H.; GREEN, D.R., COUSINS, S. 1993. **Landscape ecology and geographic information systems**. Taylor & Francis, New York.
- ZANDONA, D.F.; MULLER, M.; MARTINS, M.A.R. Avaliação da precisão altimétrica do mapeamento digital a laser em áreas de cobertura vegetal densa. In: **Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, GO. INPE, p.757-762, 2005.
- ZANDONA, D.F. 2006. **Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendométricas**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 92p.
- ZANDONA, D.F.; LINGNAU, C., NAKAJINA, N.Y. Varredura a laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendométricas. 2008. **Scientia Florestalis**, v.36, n.80, p. 295-306, 2008.
- ZAÚ, A.S. 2010. Composição, estrutura e efeitos de borda lineares na comunidade arbustiva arbórea de um remanescente urbano de Mata Atlântica, no sudeste do Brasil. **Tese de Doutorado**. Escola Nacional de Botânica Tropical, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 229 p.
- ZIMBLE, D.A.; EVANS, D.L.; CARLSON, G.C.; PARKER, R.C.; GRADO, S.C., GERARD, P.D. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v.87, p. 171-182. 2003.

ANEXO 1 – Decreto N^o 89.817, de 20 de junho de 1984

DECRETO N^o 89.817, DE 20 DE JUNHO DE 1984.

Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas
Técnicas da Cartografia Nacional.

CAPÍTULO II
ESPECIFICAÇÕES GERAIS
SEÇÃO I

Classificação de uma Carta quanto à Exatidão.

Art 8º - As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - - PEC, seguinte o critério abaixo indicado:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico - estabelecido.

2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico - estabelecido.

§ 1º - Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

§ 2º - A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão - PEC = 1,6449 EP.

§ 3º - O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§ 4º - Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

ANEXO 2 – Valores Referentes ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) (Boletim do Exército, 2016)

PEC-PCD (3)	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
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	50,00	33,33
C	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
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

ANEXO 3 – Tabelas detalhadas para avaliação dos modelos segundo metodologia proposta por Vieira e Genro (2013).

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 para MDT com grid de 0,4 m gerado a partir do método *TINsurfacecreate* no *software* Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,33 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,20 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,33±0,33 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,59 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta \bar{H}}$ 0,32 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ 0,04
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H 1,64

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013; MDT com grid de 0,4m gerado a partir do método *Gridsurfacecreate* no *software* Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS

$$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2}{N}}$$

$RMSE_{\Delta H}$
 0,86 m

Estimativa do desvio-padrão da população de erros

$$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (|\Delta X|_i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$$

$S_{RMSE_{\Delta H}}$
 0,52 m

Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}})$$

Altimetria
 0,86±0,86 m

Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)

$$t_{90\%,N-1}^{\theta}(\text{acumulada}) \quad 1,29$$

$$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}})$$

Altimetria
 1,53 m

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos

$$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$S_{\Delta \bar{H}}$
 0,85 m

Estimativa da média da população de resíduos

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta X}{N}$$

$\Delta \bar{H}$
 -0,16

Estatística t

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$$

H
 -2,48

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 para MDT com grid de 0,4 m gerado a partir do método TIN no *software* ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,32 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,20 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,32±0,33 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,57 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 0,31 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ 0,06
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H 2,36

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013; MDT com grid de 0,4m gerado a partir do método *Binning* no *software* ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,32 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,20 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,32±0,33 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,58 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 0,32 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ 0,06
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H 2,44

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 de MDT com grid de 1 m gerado pelo método TINsurfacecreate no software Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS

$$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}} \quad RMSE_{\Delta H}$$

0,35 m

Estimativa do desvio-padrão da população de erros

$$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (|\Delta X|_i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]} \quad S_{RMSE_{\Delta H}}$$

0,22 m

Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

0,35±0,36 m

Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)

$$t_{90\%,N-1}^{\theta}(\text{acumulada}) \quad 1,29$$

$$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

0,63 m

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos

$$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}} \quad S_{\Delta \bar{H}}$$

0,35 m

Estimativa da média da população de resíduos

$$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N} \quad \Delta \bar{H}$$

-0,03

Estatística t

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N} \quad H$$

1,25

Inferências estatísticas segundo Vieira e Genro (2013), com grid de 1 m gerado pelo método *Gridsurfacecreate* no *software* Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,50 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,28 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,50±0,47 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,86 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 0,5 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ -0,07
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H -0,03

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 de MDT com grid de 1 m gerado pelo método TIN no software ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,34 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,21 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,34±0,34 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,60 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 0,34 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ 0,07
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H 2,54

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013, com grid de 1 m gerado pelo método *Binning* no *software* ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,41 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,26 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,41±0,44 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,75 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 0,40 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ 0,06
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H 1,95

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 de MDT com grid de 2 m gerado pelo método TINsurfacecreate no software Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS

$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$
	0,44 m

Estimativa do desvio-padrão da população de erros

$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$
	0,26 m

Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros

$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541	
		Altimetria
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}})$		0,45±0,43 m

Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)

$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29	
		Altimetria
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}})$		0,77 m

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos

$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$
	0,44 m

Estimativa da média da população de resíduos

$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$
	0,03

Estatística t

$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541	
		H
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$		0,85

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 de MDT com grid de 2 m gerado pelo método *Gridsurfacecreate* no *software* Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS

$$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}} \quad RMSE_{\Delta H}$$

0,52 m

Estimativa do desvio-padrão da população de erros

$$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (|\Delta X|_i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]} \quad S_{RMSE_{\Delta H}}$$

0,29 m

Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

0,52±0,49 m

Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)

$$t_{90\%,N-1}^{\theta}(\text{acumulada}) \quad 1,29$$

$$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

0,90 m

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos

$$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}} \quad S_{\Delta \bar{H}}$$

0,52 m

Estimativa da média da população de resíduos

$$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N} \quad \Delta \bar{H}$$

0,03

Estatística *t*

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N} \quad H$$

0,68

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 de MDT com grid de 2 m gerado pelo método TIN no software ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,40 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,24 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,40±0,40 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,71 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 0,40 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ 0,09
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H 2,84

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 de MDT com grid de 2 m gerado pelo método *Binning* no *software* ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,5 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,31 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,50±0,52 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,90 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 0,50 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ -0,03
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H -0,68

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 para MDT com grid de 5 m gerado pelo método TINsurfacecreate no software Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS

$$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}} \quad RMSE_{\Delta H}$$

0,78 m

Estimativa do desvio-padrão da população de erros

$$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (|\Delta X|_i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]} \quad S_{RMSE_{\Delta H}}$$

0,51 m

Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

0,78±0,85 m

Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)

$$t_{90\%,N-1}^{\theta}(\text{acumulada}) \quad 1,29$$

$$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

1,44 m

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos

$$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}} \quad S_{\Delta \bar{H}}$$

0,78 m

Estimativa da média da população de resíduos

$$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N} \quad \Delta \bar{H}$$

-0,005

Estatística t

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N} \quad H$$

-0,08

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 para MDT com grid de 5 m gerado pelo método *Gridsurfacecreate* no software Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS

$$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}} \quad RMSE_{\Delta H}$$

0,86 m

Estimativa do desvio-padrão da população de erros

$$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (|\Delta X|_i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]} \quad S_{RMSE_{\Delta H}}$$

0,57 m

Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

0,86±0,95 m

Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)

$$t_{90\%,N-1}^{\theta}(\text{acumulada}) \quad 1,29$$

$$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

1,59 m

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos

$$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}} \quad S_{\Delta \bar{H}}$$

0,86 m

Estimativa da média da população de resíduos

$$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N} \quad \Delta \bar{H}$$

-0,08

Estatística t

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N} \quad H$$

-1,25

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 para MDT com grid de 5 m gerado pelo método TIN no software ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,69 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,43 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,69±0,71 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 1,25 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 0,70 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ 0,02
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H 0,46

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 para MDT com grid de 5 m gerado pelo método *Binning* no *software* ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 0,78 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,51 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 0,78±0,84 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 1,43 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 0,78 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ -0,03
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X} / S) \sqrt{N}$	H -0,40

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 com grid de 10 m pelo método *TINsurfacecreate* no *software* Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS	
$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 1,149 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 1,03 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 1,49 ± 1,70 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 2,81 m
ANÁLISE DE TENDÊNCIA	
Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 1,49 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ 0,06
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H 0,55

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 para MDT com 10 m de grid gerado pelo método *Gridsurface* no *software* Fusion.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS

$$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}} \quad RMSE_{\Delta H}$$

1,62 m

Estimativa do desvio-padrão da população de erros

$$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (|\Delta X|_i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]} \quad S_{RMSE_{\Delta H}}$$

1,11 m

Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

1,62 ± 1,84 m

Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)

$$t_{90\%,N-1}^{\theta}(\text{acumulada}) \quad 1,29$$

$$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta}(S_{RMSE_{\Delta X}}) \quad \text{Altimetria}$$

3,06 m

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos

$$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}} \quad S_{\Delta H}$$

1,62 m

Estimativa da média da população de resíduos

$$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N} \quad \Delta \bar{H}$$

0,20

Estatística *t*

$$t_{90\%,N-1}(\text{bicaudal}) \quad 1,6541$$

$$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N} \quad H$$

1,59

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 com grid de 10 m pelo método TIN no *software* ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS

$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 1,41 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,92 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 1,41 \pm 1,53 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 2,60 m

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta \bar{H}}$ 1,41 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ 0,06
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X} / S) \sqrt{N}$	H 0,57

Inferências estatísticas segundo Vieira & Genro, 2013 para MDT com 10 m de grid gerado pelo método *Binning* no *software* ArcGis.

ESTIMATIVA DE ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DA POPULAÇÃO DE ERROS

$RMSE_{\Delta X} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2)}{N}}$	$RMSE_{\Delta H}$ 1,42 m
Estimativa do desvio-padrão da população de erros	
$S_{RMSE_{\Delta X}} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X _i - RMSE_{\Delta X})^2}{N - 1} \right]}$	$S_{RMSE_{\Delta H}}$ 0,92 m
Intervalos de confiança da acurácia estimada da população de erros	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$RMSE_{\Delta X} \pm t_{90\%,N-1} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 1,42 ± 1,52 m
Acurácia estimada da população a partir do erro máximo provável (Analogia ao PEC)	
$t_{90\%,N-1}^{\theta}$ (acumulada)	1,29
$RMSE_{\Delta X} + t_{90\%,N-1}^{\theta} (S_{RMSE_{\Delta X}})$	Altimetria 2,60 m

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Estimativa do desvio-padrão da população de resíduos	
$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2}{N - 1}}$	$S_{\Delta H}$ 1,42 m
Estimativa da média da população de resíduos	
$\Delta \bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Delta X)}{N}$	$\Delta \bar{H}$ -0,004
Estatística t	
$t_{90\%,N-1}$ (bicaudal)	1,6541
$t_{amostral} = (\Delta \bar{X}/S)\sqrt{N}$	H -0,04