

Capítulo 5

Levantamento de Dados por LiDAR

Autores do Capítulo

ESPAÇO/UFRJ

Profa. Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz

Me. Gabriel dos Santos Duarte

Dr. Rafael Silva de Barros

Coordenação Adjunta

Ma. Carla Muniz Sabino – NEGEMC/UERJ

Colaboradores

Bel. Adriel Gonçalves Carneiro

Bel. Breno Henrique

Ma. Carla Muniz Sabino

Me. Felipe Gonçalves Amaral

Dra. Paula Maria Moura de Almeida

Coordenação Científica do Projeto Costa Norte

Profa. Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz –
ESPAÇO/UFRJ

Prof. Dr. Filipe de Oliveira Chaves -
NEGEMC/UERJ

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini –
PROOCEANO

Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad –
LAMCE/UFRJ

Prof. Dr. Marcelo Rollnic – LAPMAR/UFPA

Prof. Dr. Mário Luiz Gomes Soares -
NEGEMC/UERJ

Coordenação Geral do Projeto

Ma. Maria Eduarda Pessoa - ENAUTA

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini –
PROOCEANO

Bela. Anne Goni Guedes - ENAUTA

Bela. Dyellen Soares Queiroz – ENAUTA

Coordenação de Comunicação do Projeto

Frederico Luna Rinaldi - PROOCEANO

Rebeca Kiperman – ENAUTA

Citação Sugerida

CRUZ, C.B.M., DUARTE, G.S., BARROS, R.S. “Levantamento de Dados por LiDAR”, Capítulo 5. Em: Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuários e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira. v.2. Rio de Janeiro (BR), 2020.

Sumário

5.	LEVANTAMENTO DE DADOS POR LiDAR	513
5.1.	Introdução.....	513
5.2.	Objetivos	518
5.3.	Breve Histórico.....	518
5.4.	Metodologia.....	520
5.4.1.	Aquisição dos Dados.....	520
5.4.2.	Análise da Qualidade dos Produtos	524
5.4.3.	Processamento dos Produtos Finais LiDAR.....	528
5.5.	Caracterização dos Produtos Gerados	530
5.5.1.	Produtos LiDAR para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA)	533
5.5.2.	Produtos LiDAR para a baía de Turiaçu (MA).....	540
5.5.3.	Produtos LiDAR para o sistema costeiro de Soure (PA)	545
5.5.4.	Produtos LiDAR para o sistema costeiro de Sucuriçu (AP).....	550
5.6.	Considerações sobre os resultados obtidos.....	554
5.7.	Referências	555

Índice de Figuras

Figura 5-1: Sistema a laser em modo perfil (ZANDONÁ, 2006).	514
Figura 5-2: Componentes do sistema LiDAR tipo scanner (GIONGO et al., 2010).	514
Figura 5-3: Representação do Modelo Digital de Terreno (MDT) e do Modelo Digital de Superfície (MDS) (SANTOS et al., 2015).	515
Figura 5-4: Exemplo de classificação da estrutura vertical da floresta, onde áreas com baixa variância em altura de árvores aparecem na cor verde claro (ZIMBLE et al., 2003).	517
Figura 5-5: Perfil de floresta de mangue gerado a partir de um MDC (ZHANG, 2008).	518
Figura 5-6: Fluxograma das atividades envolvidas no levantamento de dados por LiDAR e disponibilização dos dados.	519
Figura 5-7 – Planos de sobrevoo para as áreas de estudo estuário de São Caetano de Odivelas (PA) e baía de Turiaçu (MA).	521
Figura 5-8 – Planos de sobrevoo para as áreas de estudo sistema costeiro de Soure (PA) e sistema costeiro de Sucuriçu (AP).	522
Figura 5-9: Triângulos no MDT resultantes de uma interpolação de poucos pontos da nuvem referentes ao terreno.	525
Figura 5-10 – (A) MDT gerado no voo com 50% de sobreposição, ressaltando a presença dos “triângulos”. (B) MDT gerado no voo com 100% de sobreposição, sem “triângulos” perceptíveis.	526
Figura 5-11: Exemplo de faixa sem dados (vazios) nos limites entre recortes.	527
Figura 5-12: MDT do estuário de São Caetano de Odivelas: dados originais à esquerda, divididos em 55 modelos e o resultado do mosaico em um único recorte, à direita.	529
Figura 5-13 – Exemplo de MDT original, com resolução espacial 0,5 m e MDT com reamostragem para resolução espacial de 10 m.	529
Figura 5-14: MDS do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).	534
Figura 5-15: MDT do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).	535
Figura 5-16: Exemplos de trechos da Nuvem de Pontos gerada com a aquisição de dados por LiDAR no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) em diferentes perspectivas.	536
Figura 5-17: MDC do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) e localização dos perfis transversais para análise de resultados do MDS e MDT.	537
Figura 5-18: Perfil Transversal 1 no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) - Terreno com pouca variação de altitude (observado pela variação da linha do MDT de até 2 m) e árvores entre 14 e 28 metros de altura (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).	538
Figura 5-19: Perfil Transversal 2 no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) - Vegetação e Terreno não seguem o mesmo padrão de variação de elevação. Árvores variando entre 2 e 22 metros (observado pelas diferenças entre as linhas do MDS e do MDT), às distâncias de aproximadamente 2.000 m e 1.700 m, respectivamente.	539
Figura 5-20: Perfil Transversal 3 no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) - metade do perfil com predominância de terreno com altitude próxima dos 2 metros (até a distância de aproximadamente 2.000 m) e a outra metade chegando aos 14 metros (à distância de aproximadamente 2.500 m), observado pela variação da linha do MDT. Árvores com altura variada, entre 2 e 22 metros (observado pelas diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).	539
Figura 5-21: MDS da baía de Turiaçu (MA).	540

Figura 5-22: MDT da baía de Turiaçu (MA).....	541
Figura 5-23: Exemplos de trechos da Nuvem de Pontos gerada com a aquisição de dados por LiDAR na baía de Turiaçu (MA) em diferentes perspectivas.....	542
Figura 5-24: MDC da baía de Turiaçu (MA) e localização dos perfis transversais para análise de resultados do MDS e MDT.	543
Figura 5-25: Perfil Transversal 1 na baía de Turiaçu (MA) - Terreno com variação de altitude entre 0 e 6 metros (observado pela variação da linha do MDT) e árvores variando de 2 a 12 metros de altura (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).	544
Figura 5-26: Perfil Transversal 2 na baía de Turiaçu (MA) – à distância de 0 a 4,5 km, altitudes próximas a 3 ou 4 metros. A partir disso, encontram-se locais com até 50 metros de altitude (observado pela variação da linha do MDT). Árvores com altura variada até 20 metros (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).	545
Figura 5-27: MDS do sistema costeiro de Soure (PA).	546
Figura 5-28: MDT do sistema costeiro de Soure (PA).	547
Figura 5-29: Exemplos de trechos da Nuvem de Pontos gerada com a aquisição de dados por LiDAR no sistema costeiro de Soure (PA) em diferentes perspectivas	548
Figura 5-30: MDC do sistema costeiro de Soure (PA) e localização dos perfis transversais para análise de resultados do MDS e MDT.....	549
Figura 5-31: Perfil Transversal 1 no sistema costeiro de Soure (PA) - Terreno com pouca variação de altitude (observado pela variação da linha do MDT) e árvores entre 2 e 20 metros de altura (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).....	550
Figura 5-32: Perfil Transversal 2 no sistema costeiro de Soure (PA) - Terreno com pouca variação de altitude (observado pela variação da linha do MDT de aproximadamente 2,5 metros), e árvores variando bastante até quase 35 metros de altura (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).....	550
Figura 5-33: MDS do sistema costeiro de Sucuriçu (AP).....	551
Figura 5-34: MDT do sistema costeiro de Sucuriçu (AP).	551
Figura 5-35: Exemplos de trechos da Nuvem de Pontos gerada com a aquisição de dados por LiDAR no sistema costeiro de Sucuriçu (AP) em diferentes perspectivas.	552
Figura 5-36: MDC do sistema costeiro de Sucuriçu (AP) e localização dos perfis transversais para análise de resultados do MDS e MDT.....	552
Figura 5-37: Perfil Transversal 1 no sistema costeiro de Sucuriçu (AP) - Terreno com pouca variação de altitude, entre 2 e 4 metros (observado pela variação da linha do MDT), e árvores variando bastante em altura, entre quase 0 e 25 metros (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).	553
Figura 5-38: Perfil Transversal 2 no sistema costeiro de Sucuriçu (AP) - Terreno com altitude próxima dos 2 metros, com leve subida para os 3 metros no trecho final do perfil (observado pela variação da linha do MDT). Árvores com altitudes variadas, de poucos metros até 27 metros (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).....	554

Índice de Tabelas

Tabela 5-1 - Informações relativas aos sobrevoos em cada área	522
Tabela 5-2 - Características de sobrevoos por área de levantamento	527
Tabela 5-3 - Valores Mínimo, Máximo, Média e Desvio Padrão de altitudes no MDT referente a cada área de estudo.	530
Tabela 5-4 - Valores Mínimo, Máximo, Média e Desvio Padrão de altura da floresta de mangue no MDC referente a cada área de estudo.	531
Tabela 5-5 - Totais de pontos para cada área coberta pelo Levantamento LiDAR	531
Tabela 5-6 - Tabela 6: Densidade dos pontos de terreno para cada área coberta pelo Levantamento LiDAR	532

Lista de Abreviações e Siglas

GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDC	Modelo Digital de Altura de Copas
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
SCO	Estuário de São Caetano de Odivelas (PA)
SOU	Sistema Costeiro de Soure (PA)
SUC	Sistema Costeiro de Sucuriju (AP)
TUR	Baía de Turiaçu (MA)
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>

5. LEVANTAMENTO DE DADOS POR LiDAR

5.1. Introdução

Atualmente existem disponíveis inúmeros sensores com diferentes resoluções que podem ser aplicados a demandas de mapeamento, monitoramento e mensuração. Dentre os diferentes focos de mapeamento, os estudos da vegetação recebem especial atenção na bibliografia desde os primórdios do uso de produtos de sensoriamento remoto. Mas, como determinar a melhor solução para cada caso? Xie et al. (2008) argumentam que a escolha do melhor sensor a ser utilizado deve considerar os seguintes fatores: (a) o objetivo do mapeamento; (b) o custo das imagens; (c) as condições climáticas e (d) questões técnicas relacionadas à interpretação das imagens. Se o objetivo do mapeamento inclui ainda a identificação de espécies vegetais, é comum que se considere a utilização de imagens de alta resolução espacial (DLUGOSZ et al., 2005).

Um aspecto negativo do uso de imagens de alta resolução, em geral, é que seu custo é elevado, o que pode limitar o tamanho da área a ser mapeada e questões temporais para observação, quando normalmente mais de uma data é necessária. Assim, se o objetivo é o monitoramento regional da cobertura vegetal, é comum que seja limitado ao uso de imagens óticas de satélite gratuitas e de média resolução (KERR e OSTROVSKY, 2003).

Dentre as diferentes áreas do conhecimento usuárias do Sensoriamento Remoto, a Ecologia da Paisagem é uma que tem se beneficiado muito desta técnica, principalmente nos estudos voltados para a classificação e caracterização da vegetação (YOUNG et al., 1993; GROOM et al., 2006). A análise dos arranjos e da estrutura dos ecossistemas que compõem a paisagem é realizada através de informações ambientais espacialmente distribuídas, necessariamente adquiridas em variadas escalas (SILVA, 2004). Sensores de meso resolução, como os do Landsat e MODIS, são capazes de determinar a estrutura horizontal da paisagem, mas não possibilitam obter informações da estrutura vertical da vegetação. Por outro lado, sensores ativos como alguns tipos de RADAR e o LiDAR possibilitam a quantificação das dimensões verticais e volumétricas da vegetação, facilitando que se estime a sua estrutura tridimensional em larga escala, gerando informações importantes para os estudos relacionados à biodiversidade e habitat (LEFSKY et al., 2002; BERGEN et al., 2009). Por outro lado, a determinação de modelos digitais do terreno, com grande detalhe e exatidão, não é trivial, principalmente para áreas de maior extensão. *Dados digitais* representativos da topografia de detalhe são importantes elementos em modelagens diversas, que demandam a compreensão da variação altimétrica e da declividade.

O LiDAR, do inglês, *Light Detection and Ranging*, é uma tecnologia óptica de Sensoriamento Remoto cujo princípio se baseia na emissão e recepção de um feixe de laser a partir de uma plataforma (aérea, terrestre ou orbital) até a superfície terrestre. Esses feixes, ao encontrarem a superfície, são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno), provocando um retroespalhamento de energia que será captada pelo sensor, sendo possível calcular a distância entre o sensor e o alvo situado na superfície terrestre. Com isso, é gerada uma nuvem de pontos tridimensionais cujos dados necessitam ser processados posteriormente.

O laser óptico começou a ser utilizado em Sensoriamento Remoto na década de 60. Inicialmente, ficava atrelado a plataformas espaciais objetivando o monitoramento atmosférico e oceanográfico (GIONGO et al., 2010). Aplicações direcionadas ao mapeamento da superfície terrestre com o uso do LiDAR associado a plataformas aéreas, só tiveram início na década de 70, embora os primeiros sistemas operassem somente

no modo *profile*, ou de perfil, cujo resultado era muito mais simples (Figura 5-1). Neste modo, só é possível obter um perfil do terreno e das estruturas verticais existentes abaixo da aeronave, durante o sobrevoo. Somente a partir dos anos 90, os sensores tipo *profile* foram substituídos pelos *scanners* (ZANDONÁ, 2006).

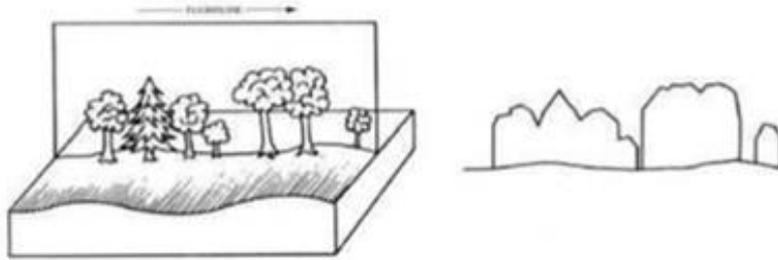


Figura 5-1: Sistema a laser em modo perfil (ZANDONÁ, 2006).

Os instrumentos LiDAR do tipo *scanner* consistem em um sistema de controle e um transmissor e receptor (Figura 5-2). Em se tratando de um instrumento localizado numa aeronave, conforme ela se move ao longo da linha de sobrevoo, pulsos de laser são direcionados ao terreno por um espelho com varredura perpendicular à trajetória (JENSEN, 2009). O resultado obtido deixa de ser uma linha e passa a ser uma faixa, possibilitando a abrangência necessária à geração de mapeamentos.

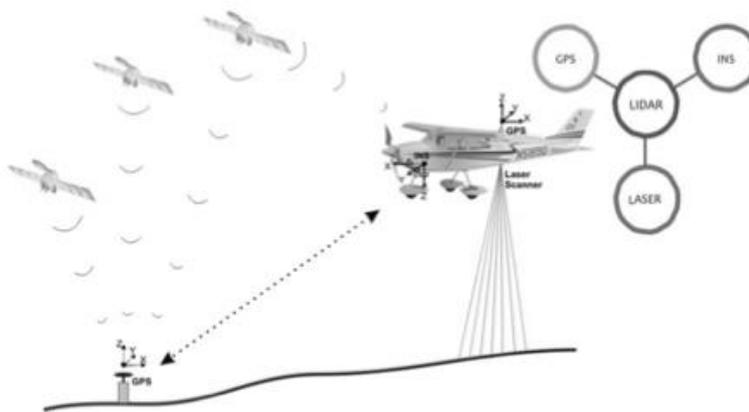


Figura 5-2: Componentes do sistema LiDAR tipo scanner (GIONGO et al., 2010).

Os dados provenientes do LiDAR têm atendido, cada vez mais, a áreas diferentes de aplicação. Dentre estas aplicações, cita-se o planejamento costeiro, avaliação de risco de inundações, telecomunicações e redes de transmissão de energia, florestas, agricultura, petróleo, transporte, planejamento urbano, arqueologia e mineração. A utilização deste sistema em diferentes áreas se deve principalmente ao diferencial na obtenção de informações tridimensionais da superfície terrestre (GIONGO et al., 2010).

Entre os produtos mais comuns derivados do LiDAR estão os 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), que são subdivididos em MDS (Modelo Digital de Superfície), quando contém informações de todas as feições da paisagem, e MDT (Modelo Digital do Terreno), quando contém informações de elevação da superfície desnuda da Terra (Figura 5-3).

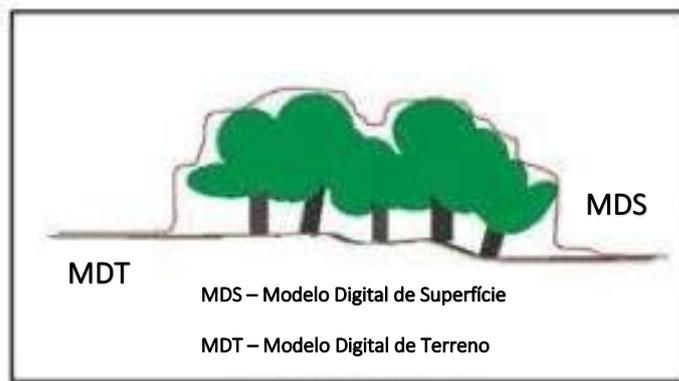


Figura 5-3: Representação do Modelo Digital de Terreno (MDT) e do Modelo Digital de Superfície (MDS) (SANTOS et al., 2015).

Para Liu (2008), o LiDAR é uma das tecnologias mais eficazes e confiáveis de coleta de dados do terreno. Métodos tradicionais como os levantamentos de campo e a fotogrametria provêm dados de grande acurácia, mas consomem muito tempo, tanto em campo como em laboratório, o que eleva os custos de seus produtos. A adoção desses métodos esbarra ainda na dificuldade de penetração em áreas de florestas densas e de difícil acesso, além do fato de que dificilmente geram produtos com o mesmo nível de detalhamento e exatidão em áreas de maior extensão. O LiDAR, em função da sua capacidade de penetração no dossel, possibilita, desta forma, a geração de MDTs que superam as limitações da fotogrametria em áreas florestadas, mesmo considerando a necessidade de edição da classificação ou filtragem da nuvem de pontos obtida no levantamento. No entanto, o processamento eficaz dos dados LiDAR brutos objetivando a geração de um MDT de alta qualidade ainda é um grande desafio, sendo a filtragem da nuvem de pontos uma das etapas mais difíceis e críticas desse processo. Entre esses desafios estão a classificação dos retornos do feixe (primeiro, intermediários e último), a escolha dos algoritmos de interpolação, o tamanho do *pixel* final e a redução dos dados para um processamento mais rápido.

Em síntese, o pós-processamento dos dados LiDAR é focado na associação da posição, orientação e informações sobre distância, para que os dados possuam coordenadas definidas. Além disso, a nuvem de pontos também sofre um processamento para que sejam identificados cada um dos retornos referentes a um pulso. Após o pós-processamento dos dados ocorre, através da técnica de interpolação, a geração das matrizes dos modelos: MDS, referente ao primeiro retorno; e MDT, referente ao último retorno. O MDS contempla a região escaneada considerando obstáculos como copa das árvores ou edifícios, ao passo que o MDT desconsidera essa cobertura, retornando apenas o mapeamento topográfico do terreno. Os modelos gerados são representados por meio de saídas gráficas especializadas na estrutura matricial e representados em uma escala de cores que permite a interpretação direta da topografia e altimetria na área do levantamento. É comum ainda que se gere um outro modelo, o MDC (Modelo Digital de Altura de Copas) que é resultado da subtração dos valores de MDT dos valores de MDS e que representa a altura (e não altitudes) dos elementos sobre a superfície terrestre, como as árvores.

Com estas funcionalidades, os dados LiDAR possibilitam grandes potencialidades para o uso do Sensoriamento Remoto nos estudos da vegetação, principalmente pela possibilidade de obtenção de informações sobre a estrutura vertical. Parte destas potencialidades ainda merecem mais investigações sobre os demais retornos obtidos pela nuvem 3D, dado que atualmente os retornos mais explorados são o primeiro (MDS) e o último (MDT). Os retornos intermediários podem auxiliar na compreensão da caracterização interna da floresta.

No caso de áreas de florestas de mangue, a complexidade de investigação é ainda maior, considerando a dificuldade de acesso (principalmente para as áreas de floresta de mangue da Margem Equatorial Brasileira), o alto teor de alagamento no solo e a presença de raízes aéreas muito altas (caso das árvores *Rhizophora*). Quando as áreas apresentam alta densidade, tanto no fechamento de copas quanto de sub-bosque, as chances de penetração do feixe na floresta são reduzidas, gerando uma quantidade menor de pontos no último retorno. Isto implicará numa maior incerteza para a geração do MDT que, por esta razão, normalmente, é representado em resolução mais baixa que o MDS. Estas áreas ainda apresentam complexidade extra para o planejamento de sobrevoo por exigirem uma superposição maior entre as faixas de aquisição de dados pelo fato dessas áreas terem uma variação topográfica pequena, e pela necessidade de acompanhamento das condições de maré que podem interferir muito nos resultados, dado que áreas alagadas não possibilitam o retorno do feixe de luz, reduzindo ainda mais a quantidade de pontos com dado de altura do solo gerados no pós-processamento.

Apesar de muitas das aplicações práticas dos dados LiDAR se limitarem à geração de modelos digitais de elevação, o seu potencial para a obtenção de informações mapeáveis sobre a estrutura horizontal (percentual do fechamento de copas) e vertical (distribuição da altura das árvores) da floresta tem sido cada vez mais utilizado (ZIMBLE et al, 2003). Para tal, é necessário definir uma organização tridimensional dos objetos que compõem a floresta de forma representativa e condizente com a realidade observada em campo. A migração entre a escala dos dados levantados em campo e a escala de paisagem, representada nos mapas, é um desafio necessário de ser enfrentado para o diagnóstico e monitoramento de maiores extensões de áreas. Zimble et al. (op.cit) ainda informam que possíveis diferenças entre medidas de altura obtidas em campo e através do LiDAR não são consideradas significativas.

Estudos embasados em métricas, como a variância da altura de árvores, têm buscado a classificação das configurações da estrutura vertical da floresta e ainda uma associação com a discriminação de espécies. Brandtberg et al. (2002) examinaram o potencial de algumas variáveis, como o desvio padrão, em análises lineares e encontraram limiares preliminares para a classificação de florestas decíduas.

A proposta de Zimble et al. (2003) se baseia na possibilidade do uso da variância da altura de árvores na separação de duas classes de estrutura vertical da floresta objetivando o mapeamento em escala de paisagem: uma mais homogênea, com baixíssima variação de altura (que ele denomina por *single-story*) e uma mais heterogênea, que apresenta maior variação de altura e, possivelmente, idade dos indivíduos (que ele denomina *multistory*). A Figura 5-4 apresenta um exemplo de classificação da estrutura vertical de uma área florestada.

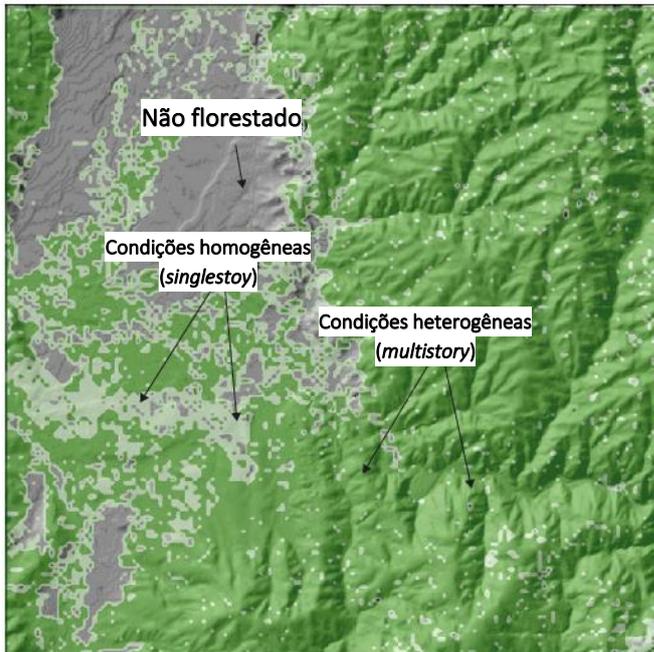


Figura 5-4: Exemplo de classificação da estrutura vertical da floresta, onde áreas com baixa variância em altura de árvores aparecem na cor verde claro (ZIMBLE et al., 2003).

Esses estudos também são aplicados às florestas de mangue, principalmente por sua característica de maior dinâmica. Os manguezais, porém, são alvos mais recentes nos estudos relacionados ao uso do LiDAR para compreensão das estruturas horizontal e vertical da floresta. Zhang (2008) utilizou os diferentes modelos digitais de elevação provenientes do LiDAR para estimar não só o percentual de clareiras detectadas na floresta, como também a sua dinâmica em uma área de manguezal no Parque Nacional dos Everglades, de modo a contribuir para a compreensão de vários estágios de sua evolução. Ele defende que os dados LiDAR são mais indicados para estas leituras, quando comparados a outros produtos de Sensoriamento Remoto, pelo fato destes últimos não conseguirem identificar com precisão as bases das árvores no entorno das clareiras. Brokaw (1982) propôs uma definição mais restrita - mas adequada ao uso de Sensoriamento Remoto -, para estas áreas de clareiras (gap), como sendo buracos na floresta que se estendem por todos os níveis até uma altura média de 2 m acima do solo. A Figura 5-5 apresenta um perfil transversal gerado através de um MDC com 1 m de resolução espacial, no qual é possível ver o comportamento de uma área aberta na floresta de mangue.

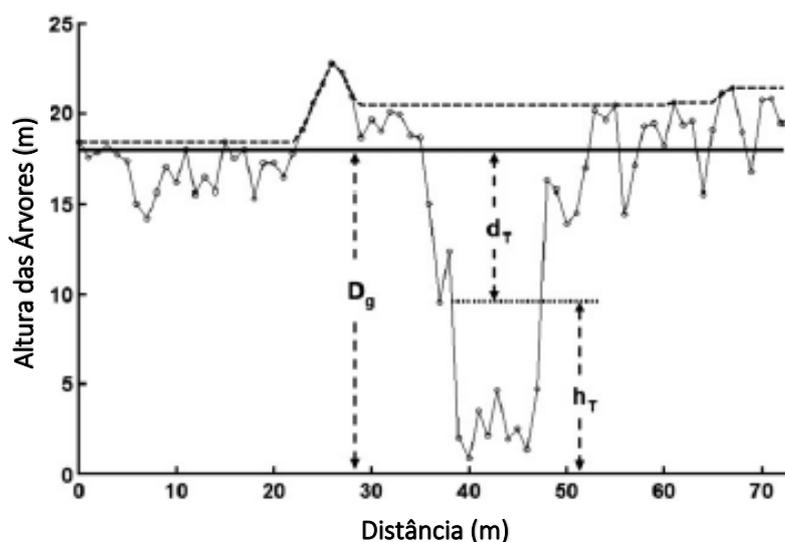


Figura 5-5: Perfil de floresta de mangue gerado a partir de um MDC (ZHANG, 2008).

Apesar das potencialidades, cada vez mais estudadas, dos dados provenientes do LiDAR em estudos florestais, ainda se observam poucas iniciativas de investigação em áreas de manguezal, principalmente no Brasil, devido aos altos custos associados a estes levantamentos.

5.2. Objetivos

Os objetivos associados ao uso do LiDAR no Projeto Costa Norte foram:

- Definir a topografia das áreas de florestas de mangue, em apoio às modelagens hidrodinâmicas estuarinas (ver Capítulo 7).
- Determinar a altura das árvores, através do Modelo Digital de Altura de Copas (MDC), considerada como um dos parâmetros de estrutura da vegetação em apoio ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue (ver Capítulo 10).

5.3. Breve Histórico

Os levantamentos de informações para contratação de dados de topografia por LiDAR para este Projeto se iniciaram ainda em 2017, com consultas a diversas empresas para levantamento por avião, helicóptero e RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). Por razões relacionadas a custo, exatidão e abrangência, foi decidido que o levantamento seria feito a partir de avião. No primeiro semestre de 2018, foi publicado o Edital para seleção e contratação da empresa para fornecer os dados LiDAR, sendo vencedora a empresa Fototerra Atividades de Aerolevantamentos Ltda. A aquisição dos dados deveria começar ainda no segundo semestre de 2018, mas devido a problemas operacionais e diante do fato de que a empresa estava recebendo um novo equipamento que permitiria o aumento da exatidão dos produtos finais, os voos para aquisição dos dados LiDAR aconteceram efetivamente em 2019. A primeira área que teve aquisição dos dados LiDAR foi o estuário de São Caetano de Odíveas, no Pará, em fevereiro de 2019. Toda campanha para levantamento dos dados teve o acompanhamento presencial de profissionais do Projeto Costa Norte.

As campanhas de levantamento tiveram muitas dificuldades para realização dos voos por causa de mau tempo. Por exemplo, no estuário de São Caetano de Odivelas, em fevereiro de 2019, não foi possível concluir o levantamento de toda a área devido ao mal tempo – alta nebulosidade e pluviosidade – e na baía de Turiaçu, no segundo semestre de 2019, quando a equipe ficou 15 dias em campo, de prontidão, sem poder executar o voo por conta das chuvas constantes.

Além disso, após o primeiro voo parcial no estuário de São Caetano de Odivelas, a avaliação de qualidade dos dados comprovou problemas nos produtos gerados, obrigando a realização de novo voo e processamento dos dados. Em função deste problema com os dados, a metodologia precisou ser reajustada – o que será apresentado no item seguinte – e, para isso, novas reuniões foram feitas entre a equipe de Sensoriamento Remoto da UFRJ, membros da UERJ e da empresa contratada. Após a Identificação das causas do problema e do ajuste da metodologia, os voos foram retomados, refazendo-se o levantamento do estuário de São Caetano de Odivelas, em junho de 2019, e a avaliação da exatidão dos produtos. Com a aprovação destes, foram realizados os levantamentos nas demais áreas (Baía de Turiaçu, sistemas costeiros de Soure e de Sucuriju), usando a mesma metodologia, entre setembro e novembro de 2019. Depois das entregas dos dados LiDAR de cada área foram feitas avaliações de qualidade para, em seguida, os dados serem utilizados pelas demais equipes do Projeto.

A Figura 5-6 apresenta um fluxograma que resume o histórico das atividades relacionadas ao levantamento de dados por LiDAR, desde a contratação da empresa, definição e ajustes na metodologia de aquisição dos dados, a avaliação da qualidade dos resultados pela Equipe de Sensoriamento Remoto até a disponibilização dos dados para as diferentes equipes do Projeto. No item seguinte – Metodologia – é descrito com mais detalhes as diversas fases desde o levantamento dos dados pela empresa contratada, passando pela avaliação de qualidade até a disponibilização dos dados para as demais equipes do Projeto.

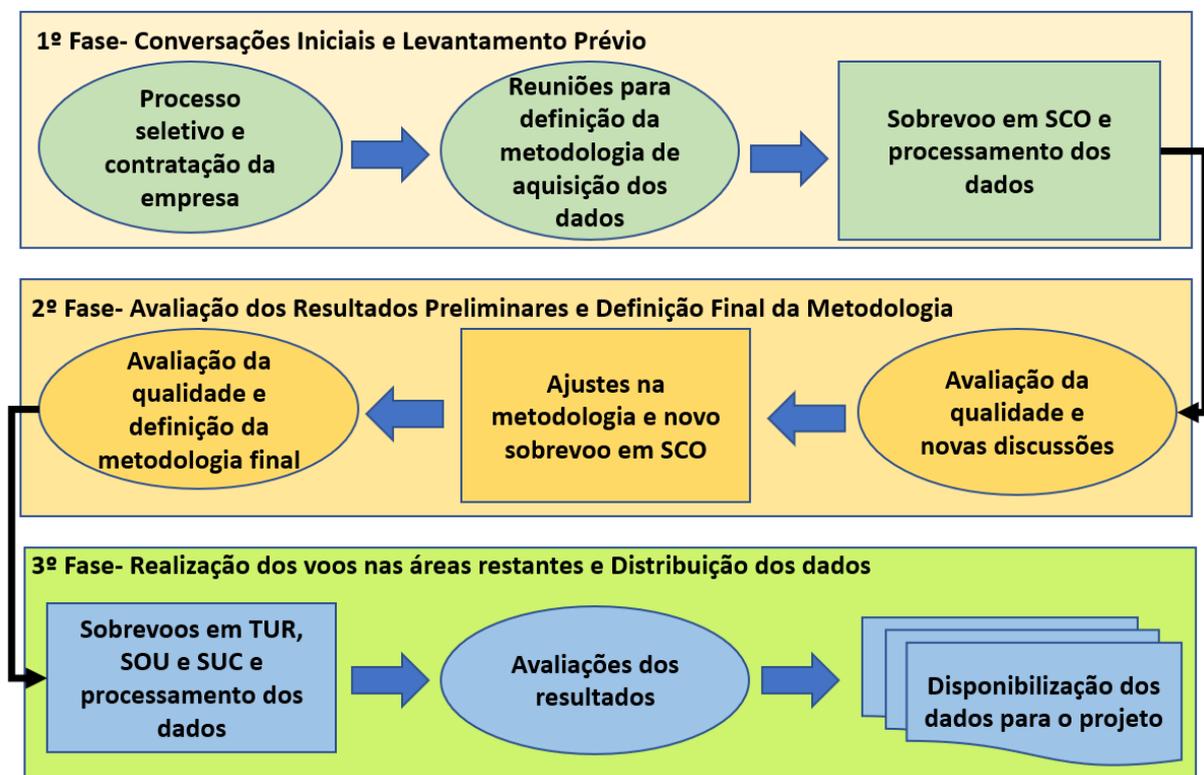


Figura 5-6: Fluxograma das atividades envolvidas no levantamento de dados por LiDAR e disponibilização dos dados.

5.4. Metodologia

As etapas metodológicas envolveram (i) a aquisição de dados, (ii) a análise da qualidade dos produtos gerados a partir da nuvem de pontos e (iii) o processamento desses produtos para utilização pelas diferentes equipes do Projeto Costa Norte.

5.4.1. Aquisição dos Dados

Conforme apresentado anteriormente, o trabalho relativo ao levantamento topográfico se iniciou com a pesquisa sobre os melhores métodos para obtenção de dados para a finalidade prevista nesse Projeto - representação da topografia e da estrutura da vegetação, ambos com grande detalhamento, para fins de mapeamento, modelagem e identificação da vulnerabilidade das florestas de mangue - numa área tão extensa e com tantas restrições para acesso. Essa tarefa envolveu um grande desafio, pois não há uma solução consagrada na literatura. Cada escolha apresentava vantagens e desvantagens que foram consideradas para que se atingisse os objetivos. Assim definiu-se que a opção com melhor relação entre custo e benefício seria o levantamento por LiDAR, embarcado em um avião. A contratação deste tipo de serviço precisou ser feita através de licitação, selecionando-se a empresa Fototerra.

O levantamento dos dados por LiDAR foi alvo de muitas reuniões presenciais e por videoconferência entre membros das equipes técnicas de pesquisa e da contratada. O objetivo destas reuniões era a especificação da metodologia de levantamento. Uma das preocupações era definir os melhores momentos em termos de variação da maré para a realização dos voos para aquisição dos dados LiDAR. As equipes de oceanografia definiram os melhores horários para realização dos voos, a fim de que a aquisição dos dados se desse durante as marés mais baixas, o que deixaria a maior área possível de terreno exposta, sem água. Baseado nos dados existentes até então foi estabelecido que o momento que teria mais terreno exposto seria durante as menores mínimas de maré, ou seja, no período de Sízígia. Assim foram estabelecidas janelas de voos com horários definidos para início e fim da aquisição. Foi acertado, também, que no estuário de São Caetano de Odivelas seria a primeira área a ser voada. Em todas as tentativas de voo no estuário de São Caetano de Odivelas, na baía de Turiaçu e no sistema costeiro de Soure – tanto naquelas que tiveram sucesso quanto nas diversas tentativas que foram frustradas pelas condições atmosféricas – um membro da equipe da UERJ acompanhou a empresa numa fiscalização para garantir que os voos ocorressem dentro das condições/horários especificados. Após aprovação dos primeiros dados (Nuvem de pontos) e produtos (MDT – Modelo Digital de Terreno - e MDS – Modelo Digital de Superfície), seriam realizados os voos para aquisição de dados nas áreas da baía de Turiaçu e para os sistemas costeiros de Soure e de Sucuriju. Foi acertado que todos os produtos seriam entregues em duas referências altimétricas: altitudes ortométricas e altitudes elipsoidais.

A cada entrega os produtos passavam por avaliação de sua qualidade. A análise dos produtos entregues após o primeiro voo mostrou que os produtos não apresentavam o detalhamento e exatidão planialtimétrica requeridos – conforme será relatado no próximo item. Sendo assim foram feitas novas reuniões entre a equipe de Sensoriamento Remoto da UFRJ (Espaço), a Fototerra e a equipe de Oceanografia da UERJ (NEMA) para identificação das causas do problema e sua correção. Chegou-se ao entendimento que era preciso aumentar a sobreposição entre as faixas de voo que, inicialmente, eram de 50%. Desta forma, toda a área do estuário de São Caetano de Odivelas foi voada novamente com sobreposição de 100% e o voo passaria a ser feito durante as marés de Quadratura, pois foi observado que nas marés máximas de sízígia ocorreu retenção de água nas partes mais altas, sem que houvesse drenagem total na maré mínima seguinte. O voo com essa sobreposição de 100%, porém, mostrou-se inviável pelo maior custo e por causa do tempo necessário para sua conclusão, considerando-se o tempo restante do

Projeto. Após aprovação da qualidade dos produtos gerados com essa nova configuração e pesando a questão do custo e tempo, foi decidido que os voos das próximas áreas seriam feitos com sobreposição de 75%, mantendo-se a característica de voo durante Quadratura. A cada entrega de produtos pela empresa era feita avaliação da sua qualidade antes do seu uso pelas equipes de modelagem e mapeamento.

Para facilitar a logística de levantamento e pré-processamento dos dados, a empresa contratada dividiu as áreas em diferentes planos de sobrevoo para que pudessem realizar o trabalho de forma independente em diferentes partes, enviando os dados referentes a cada plano de voo assim que fossem finalizados. A Figura 5-7 e Figura 5-8 apresentam os planos de sobrevoo definidos para cada uma das áreas de estudo.

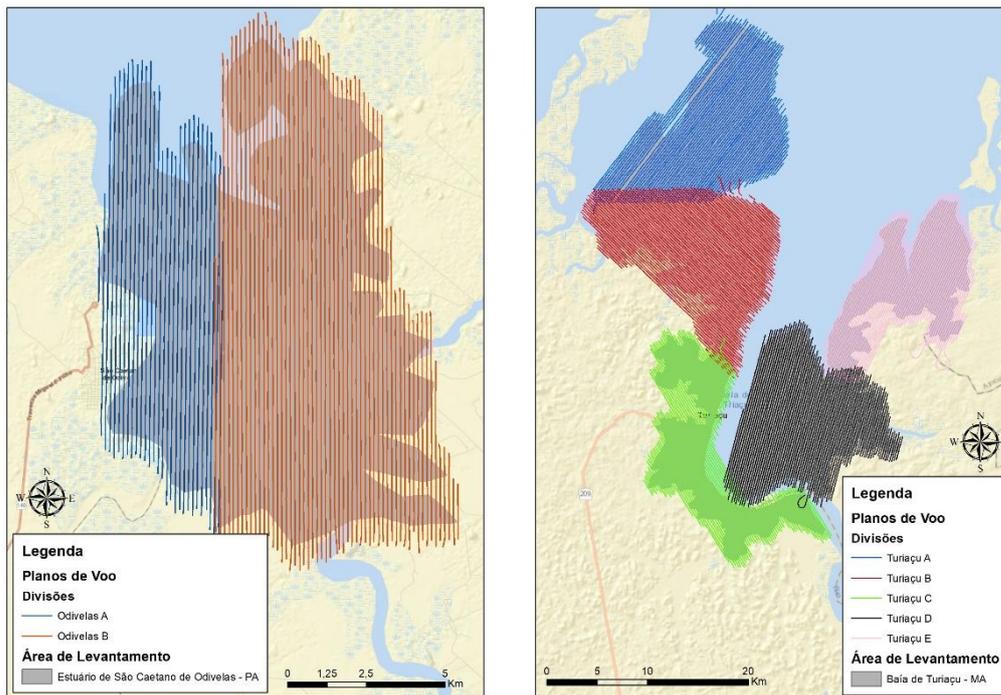


Figura 5-7 – Planos de sobrevoo para as áreas de estudo estuário de São Caetano de Odivelas (PA) e baía de Turiaçu (MA).

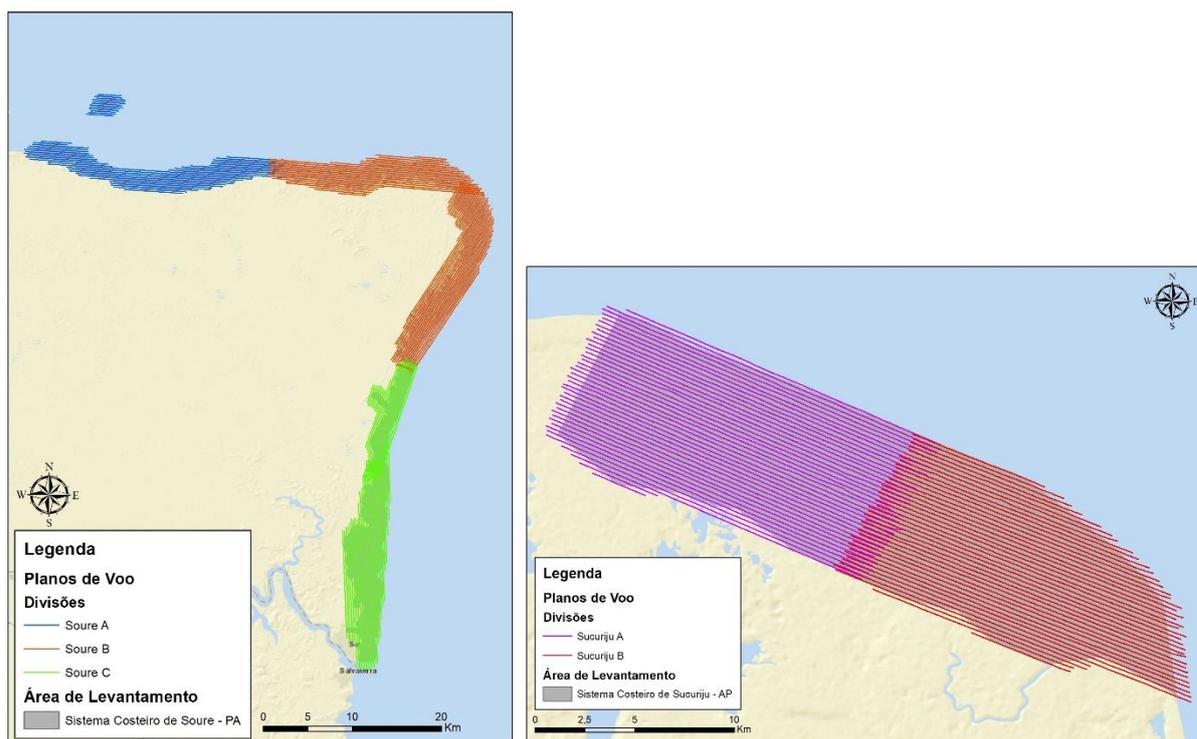


Figura 5-8 – Planos de sobrevoo para as áreas de estudo sistema costeiro de Soure (PA) e sistema costeiro de Sucuriçu (AP).

As quatro áreas de estudo têm formas e extensões variadas, demandando diferentes esforços para aquisição e posterior processamento dos dados. A Tabela 5-1 resume essas informações, apresentando aquelas pertinentes aos diversos sobrevoos realizados em cada área de estudo.

Tabela 5-1: Informações relativas aos sobrevoos em cada área

Área	Plano de sobrevoo	Datas de realização dos sobrevoos	Horário local dos Voos Realizados	Distância percorrida (Km)	Tempo total de sobrevoo (h)	Altitude Média (m)
SCO	Odivelas A Odivelas B	22/06/2019 - 26/06/2019	05h-08h 17h-19h	975,9	7,9	600
TUR	Turiaçu A Turiaçu B Turiaçu C Turiaçu D Turiaçu E	18/09/2019 - 26/09/2019 04/10/2019 - 15/10/2019	02h-03h 05h-22h	4.185,7	34	600
SOU	Soure A Soure B Soure C	20/10/2019 - 24/10/2019 17/11/2019 - 23/11/2019	00h-02h 06h-14h 20h-21h	1.716,6	14,1	600
SUC	Sucuriçu A Sucuriçu B	24/11/2019 - 28/11/2019	01h-03h 13h-17h	1.218,8	8,9	600

Os dados da Tabela 5-1 mostram que cada área demandou diferentes tempos de voos, realizados em horários também diversos. A altitude foi a mesma em cada um dos planos de voo.

Para a aquisição dos dados foi utilizado um conjunto amplo de equipamentos e sistemas embarcados no avião da empresa a fim de garantir a maior exatidão possível na determinação da localização e atitude da aeronave em cada instante do voo. Essas são pré-condições para se obter, ao final, dados com a exatidão demandada para o Projeto. Os seguintes equipamentos e programas foram utilizados durante o levantamento e, posterior, processamento dos dados LiDAR usados neste Projeto:

Equipamentos:

- Receptores de sinais GNSS Geodésicos da marca Magellan, modelo ProMark-500 para coleta de dados dos pontos em campo
- Aeronave CESSNA 206 (S/N 206 0053)
- Sistema LiDAR Harrier68i (Composto de Laser, IMU, GNSS, computador e navegador)

Softwares:

- Harrier Config
- Tracker32 3.03 (SnapXYZ, SnapPlan, SnapPlot, SnaBase e SnapShot)
- Rianalyze v5.5.5
- Pospac MMS 5.4
- LPMaster 1.0
- Applications Master 5.4 (INPHO)
- ArcInpho
- ArcGIS
- Autcad Map
- Global Mapper.

Depois de concluída a fase de levantamento dos dados em campo, a empresa processava os dados em gabinete antes da entrega para a equipe de sensoriamento remoto da UFRJ.

De forma resumida o processamento dos dados LiDAR envolve as etapas descritas a seguir.

A execução do perfilamento produz 02 tipos de dados brutos: IMU + GNSS (dados referentes à atitude e posicionamento da aeronave) e *.sdf (dados brutos do perfilamento). O primeiro tratamento a ser realizado com os dados brutos do perfilamento consiste em realizar uma conversão do arquivo *.sdf para *.sdc. Esta conversão é realizada utilizando o software Rianalyze.

O tratamento dos dados de IMU + GNSS são realizados utilizando o software PosPac e, ao final, obtém-se um arquivo denominado SBET.out, que contém todas as informações de atitude da aeronave e também a posição de cada faixa, referenciada ao sistema de referência WGS84 - que nesta escala de detalhes equivale ao SIRGAS2000.

Uma vez possuindo os arquivos SBET.out para cada dia de sobrevoo e o arquivo *.sdc para cada faixa de sobrevoo, inicia-se o processamento dos dados (supracitados) de modo a obter o MDS, o MDT e a Nuvem de Pontos. O primeiro processamento, utilizando estes dados, é executado por meio do software LPMaster, que realiza a orientação dos dados de perfilamento, para cada faixa de sobrevoo, conforme informações contidas no arquivo SBET.out. Ao final deste processo, realiza-se o “export” de cada faixa de sobrevoo, devidamente orientada e referenciada, para o formato *.las. A Nuvem de Pontos referenciada, obtida por meio do software LPMaster é levada para o software INPHO onde são realizados os seguintes procedimentos com os dados:

- Divisão de toda área de interesse em *Tiles*, com tamanho de 500mx500m, de modo a facilitar o processamento e possíveis edições;
- Classificação e obtenção da Nuvem de Pontos recortada em *Tiles* no formato *.las;
- Geração do Modelo digital de superfície (MDS), no formato *.asc;
- Filtragem dos objetos localizados acima do solo, de modo a obter o modelo digital de terreno (MDT), no formato *.asc.

Concluída estas tarefas os produtos (MDS, MDT e Nuvem de Pontos) eram repassados pela empresa contratada para o Laboratório Espaço de Sensoriamento Remoto e Estudos Ambientais da UFRJ para avaliação da qualidade, integração dos diferentes recortes das áreas voadas e posterior repasse para as demais equipes do Projeto.

5.4.2. Análise da Qualidade dos Produtos

Após a entrega dos primeiros resultados referente ao primeiro voo sobre a área do estuário de São Caetano de Odivelas, foram feitas inspeções relacionadas à completude e coerência dos dados, bem como avaliações qualitativas e quantitativas relacionadas à exatidão geométrica dos dados.

Os produtos entregues pela empresa contratada foram: o MDS (Modelo Digital de Superfície), o MDT (Modelo Digital de Terreno) e a Nuvem de Pontos e os resultados dos testes revelaram algumas inconsistências que precisaram ser corrigidas para aqueles primeiros produtos relativos ao estuário de São Caetano de Odivelas.

Na análise dos produtos, foi identificada a ocorrência de “triângulos” inesperados no MDT (Figura 5-9), resultantes da interpolação entre pontos que estavam muito distantes. Esse padrão indica que poucos pulsos emitidos pelo LiDAR haviam atingido o solo, ou retornado do mesmo, o que significa que o total de pontos filtrados da nuvem como pertencente ao último retorno era pequeno e mal distribuído, criando irregularidades na interpolação.

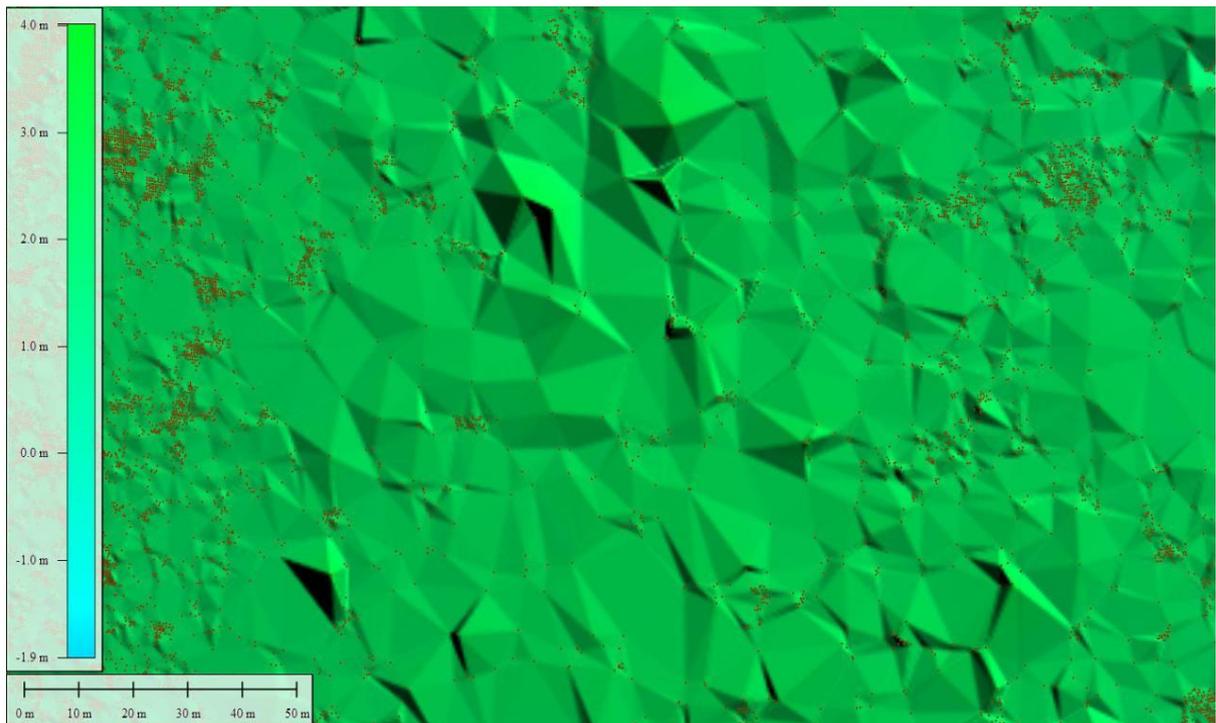


Figura 5-9: Triângulos no MDT resultantes de uma interpolação de poucos pontos da nuvem referentes ao terreno.

Dentre as avaliações quantitativas, foram realizados cálculos de densidade de pontos em diferentes áreas do MDS e do MDT, o que confirmou que nas áreas mais afastadas da linha de voo, no MDT, a densidade estava muito baixa, chegando a 0,1 ponto por metro quadrado, com média de 0,2 ponto por metro quadrado. Esses valores são insuficientes para o detalhamento requerido. O MDS, por se tratar do modelo de superfície, gerado a partir dos pulsos refletidos pelas copas das árvores, apresentava uma densidade bem maior, sempre acima de 6 pontos por metro quadrado. Desta forma comprovou-se que o produto estava fora das especificações.

A empresa reconheceu o problema e concordou em realizar novo sobrevoo na área, seguindo outra configuração de voo e em outra condição de maré – a de Quadratura. Como seria um voo definitivo, optou-se por fazer mais um teste: além do aumento da sobreposição entre as faixas, o ângulo de abertura do equipamento LiDAR durante a emissão dos pulsos também seria variado. O segundo voo no estuário de São Caetano de Odivelas foi realizado em junho de 2019 e realizou o levantamento de toda a área.

Os novos dados foram processados e os produtos, entregues para avaliação. Com o levantamento realizado com sobreposição de 100% das faixas de voo, a densidade média de pontos no terreno passou a ser 1,33 pontos por metro quadrado. Com isso, a percepção dos triângulos foi praticamente eliminada, como pode ser observado na Figura 5-10. A variação no ângulo de abertura do equipamento LiDAR não influenciou tanto quanto o aumento da sobreposição das faixas de voo.

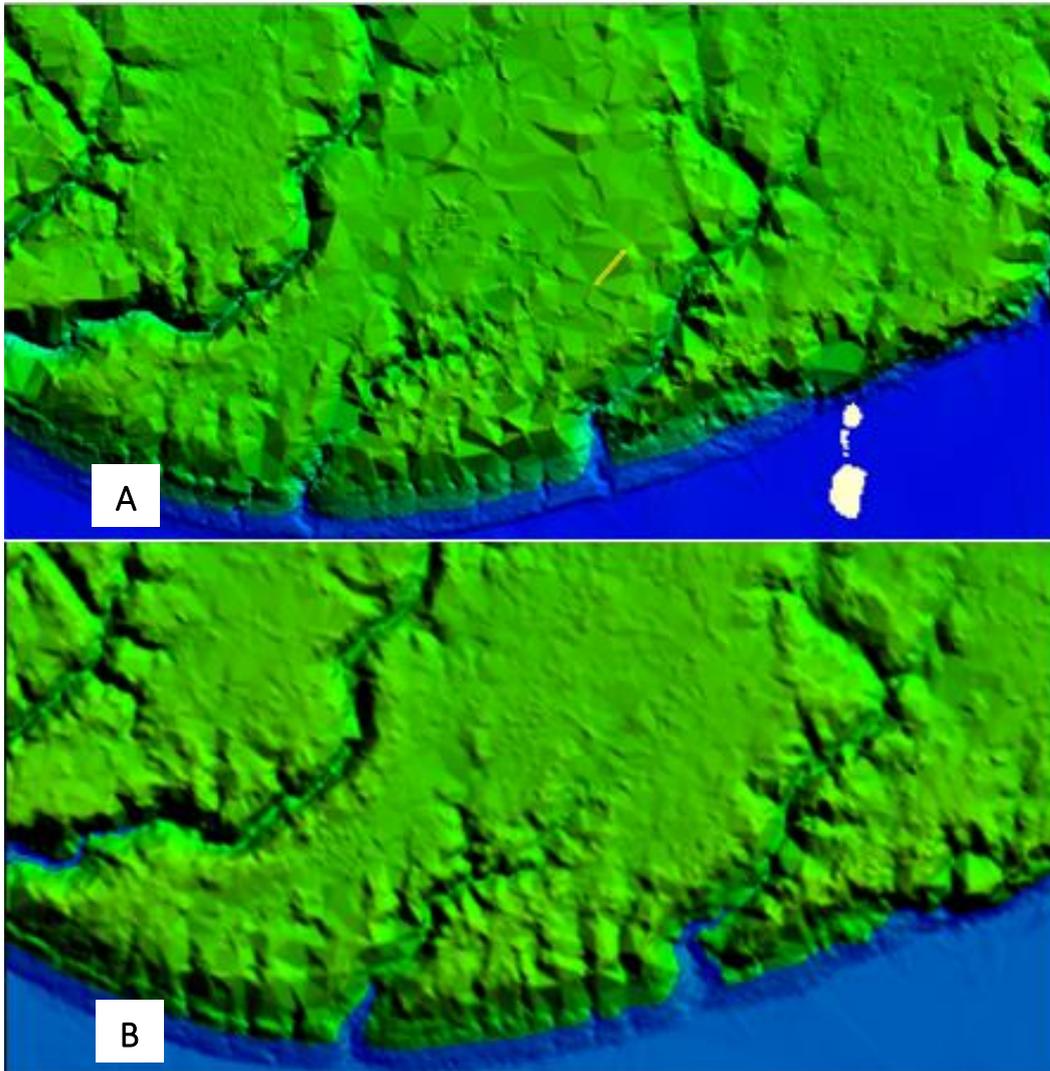


Figura 5-10 – (A) MDT gerado no voo com 50% de sobreposição, ressaltando a presença dos “triângulos”. (B) MDT gerado no voo com 100% de sobreposição, sem “triângulos” perceptíveis.

Entretanto, apesar da aprovação da qualidade dos últimos produtos entregues referentes a área de estudo do estuário de São Caetano de Odívelas, a empresa contratada argumentou ser inviável voar as 3 áreas restantes (Baía de Turiaçu e sistemas costeiros de Soure e de Sucuriçu) com sobreposição de 100%. As razões foram o prazo restante para o Projeto e as especificações das janelas de voo atreladas às condições de maré e particularidades climáticas da região – alta pluviosidade e nebulosidade, mesmo em período seco. Assim, acordou-se que as outras três áreas seriam voadas em maré de Quadratura, com sobreposição de 75% e com uma janela de voo maior – ampliando os horários de início e término dos voos em torno do horário da baixa-mar. A ampliação das janelas de sobrevoo em relação aos horários de baixa-mar foi possível por não se observar, em período seco, forte impacto da condição de baixa-mar nos resultados dos modelos digitais do terreno.

Toda a nuvem de pontos, junto com os respectivos MDS e MDT, foram processados e entregues para análise. Os dados foram reavaliados e, apesar de não haver triângulos como anteriormente, e do MDS e MDT estarem homogêneos em termos de densidade de pontos, foram observados alguns “vazios”, pequenas áreas sem dados, próximos das bordas dos recortes (Figura 5-11). Esses problemas foram considerados simples de resolver, pois eram relativos ao processo de divisão da área em blocos feitos pela

empresa para facilitar a logística do processamento dos dados. Desta forma, a empresa foi novamente solicitada a fazer os ajustes. Após a entrega dos produtos ajustados e de sua aprovação, os dados foram preparados para serem utilizados tanto pela equipe de Sensoriamento Remoto responsável pelo mapeamento quanto pela equipe de Modelagem Hidrodinâmica Estuarina.

Todas as 3 áreas restantes foram voadas de acordo com os novos parâmetros estabelecidos, conforme mostra a Tabela 5-2, que apresenta um resumo das características dos sobrevoos para as 4 áreas, mostrando o espaçamento entre as linhas de voo de 140 metros no estuário de São Caetano de Odivelas e de 210 metros nas demais áreas, mas com maré de Quadratura para todas as áreas.

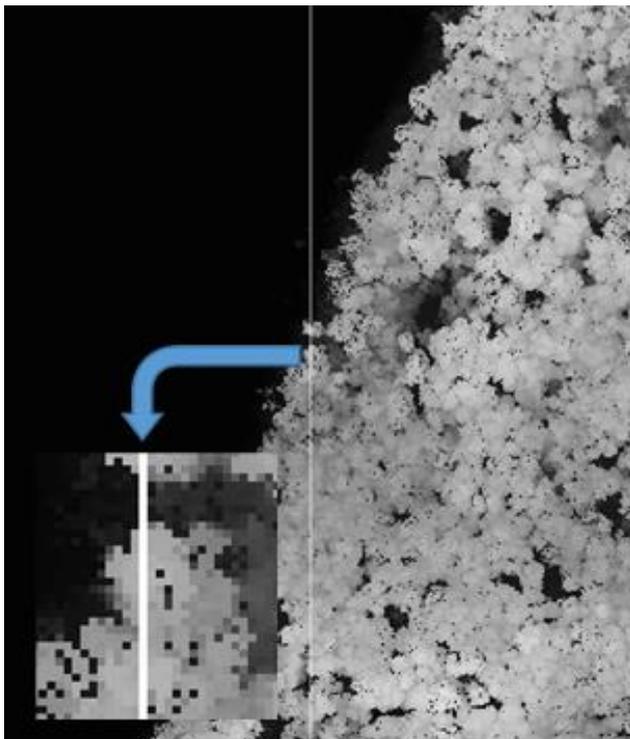


Figura 5-11: Exemplo de faixa sem dados (vazios) nos limites entre recortes.

Tabela 5-2: Características de sobrevoos por área de levantamento

Área	Planos de sobrevoos	Área voada (Km ²)	Sobreposição	Espaçamento entre linhas de sobrevoos (m)	Maré	Sensor	Abertura do Sensor
SCO	Odivelas A Odivelas B	116,3	100%	140	Quadratura	RIEGL	45º
SOU	Soure A Soure B Soure C	255	75%	210	Quadratura	RIEGL	45º
SUC	Sucuriju A Sucuriju B	236,2	75%	210	Quadratura	RIEGL	45º
TUR	Turiaçu A Turiaçu B Turiaçu C Turiaçu D Turiaçu E	743,6	75%	210	Quadratura	RIEGL	45º

É preciso destacar que a detecção dos problemas aqui relatados só foi possível por causa da constante preocupação com a qualidade, que é uma etapa custosa tanto em termos de pessoal, quanto de equipamentos e de tempo. A cada problema detectado um reprocessamento é demandado – além das reuniões e do novo voo que foi necessário ser refeito no estuário de São Caetano de Odivelas. Mas sem a preocupação com a qualidade não se teria alcançado o detalhamento e exatidão que se alcançou e que eram necessários para atingir bons resultados

5.4.3. Processamento dos Produtos Finais LiDAR

A empresa contratada, ao final das etapas de levantamento e processamento das nuvens de pontos, entregou os produtos referentes às 4 áreas em recortes para cada um dos planos de sobrevoo voados, formando 12 grandes conjuntos de dados, um para cada plano de sobrevoo. Cada conjunto era composto por MDS (Modelo Digital de Superfície), MDT (Modelo Digital de Terreno) e Nuvem de pontos, tanto com as altitudes ortométricas (referenciadas ao Datum Vertical de Imbituba – referência oficial do país) quanto elipsoidais (referenciadas ao elipsoide SIRGAS 2000).

Devido ao grande tamanho dos arquivos para envio, a empresa dividiu cada bloco em inúmeros recortes (*rasters*). Assim, para melhor atender aos objetivos do Projeto, foi preciso integrar os recortes de cada bloco para compor um único modelo topográfico para cada área de estudo, por meio de um mosaico.

Esta tarefa foi realizada utilizando o módulo “*Mosaic to New Raster*” do programa ArcMap/ArcGIS para ter toda a área completa em um único arquivo. O arquivo final foi gerado com a mesma resolução dos dados originais: 0,5 metro de pixel e 32 bits. Esse procedimento foi realizado tanto para o MDT quanto para o MDS em suas versões de altitudes ortométricas. A Figura 5-12 ilustra o resultado deste procedimento para o estuário de São Caetano de Odivelas, que foi entregue, originalmente, em 55 recortes e, após processamento, tornou-se um único modelo para a área toda.

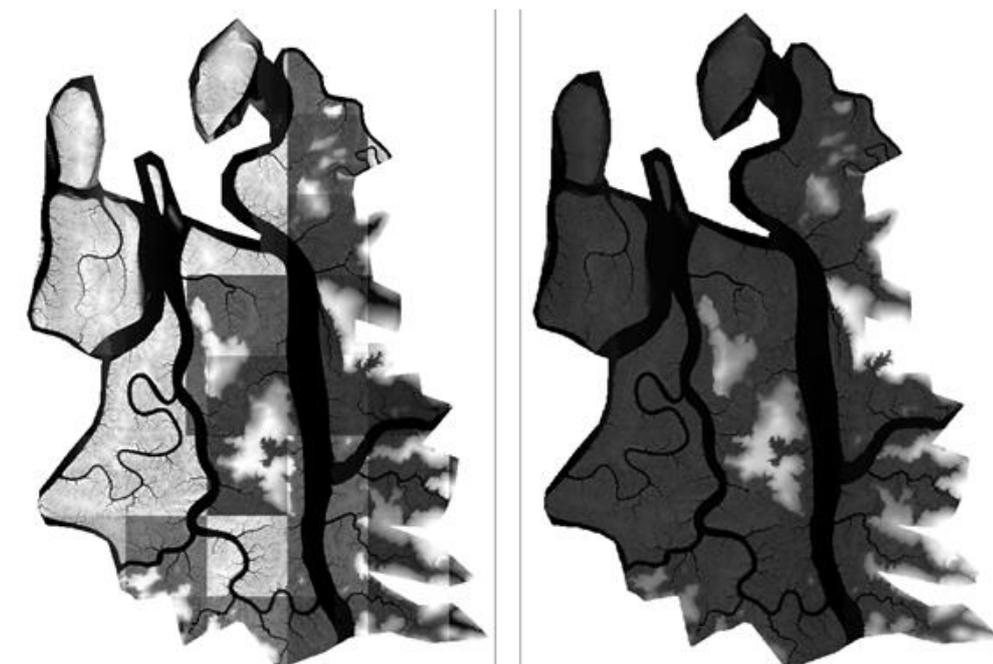


Figura 5-12: MDT do estuário de São Caetano de Odivelas: dados originais à esquerda, divididos em 55 modelos e o resultado do mosaico em um único recorte, à direita.

Para atender à demanda específica das equipes de Modelagem Hidrodinâmica Estuarina (para detalhes da aplicação do MDT por LiDAR nos modelos hidrodinâmicos, ver Capítulo 7), a resolução espacial do mosaico do MDT foi reamostrado para 10 metros (Figura 5-13), em substituição ao original em 0,5 metro. Isso significa que a informação que antes existia para cada 0,5 metro no terreno passou a ser a cada 10 metros.

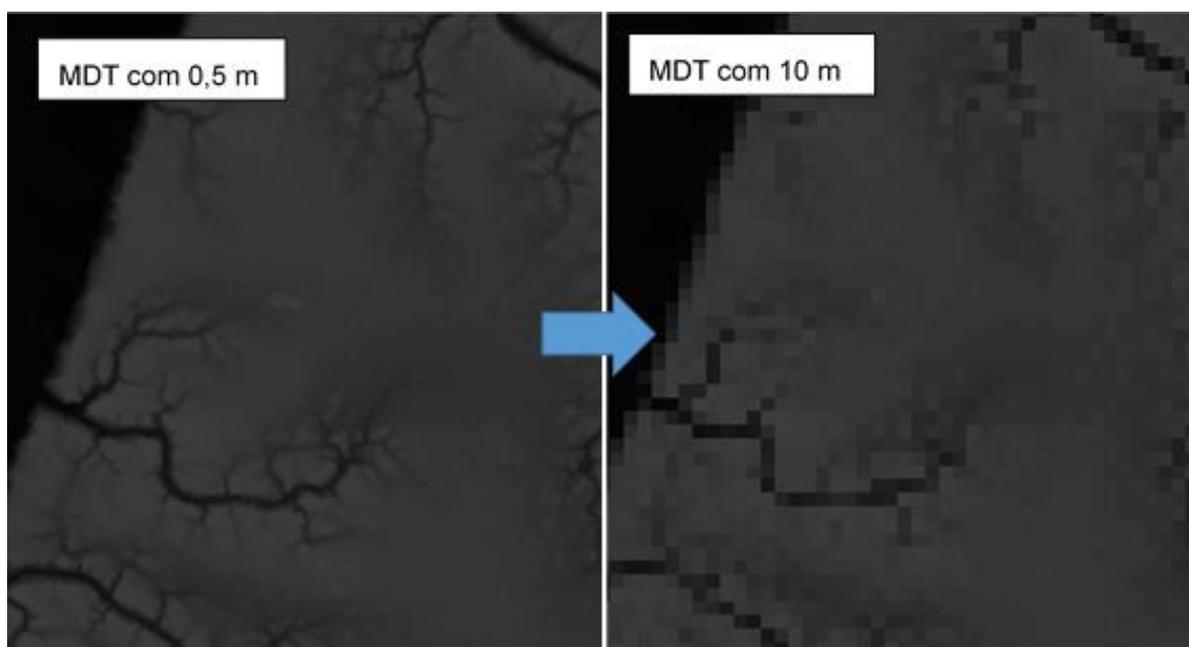


Figura 5-13 – Exemplo de MDT original, com resolução espacial 0,5 m e MDT com nova amostragem para resolução espacial de 10 m.

Todos os procedimentos foram realizados de forma sistemática para cada área mapeada. De uma forma geral, os produtos foram integrados em mosaicos, novamente amostrados e avaliados com relação a sua coerência, integridade e completude. Estando os resultados e produtos de acordo com o esperado, gerava-se o Modelo Digital de Altura de Copas (MDC) para cada área.

O MDC foi um produto gerado pela equipe de Sensoriamento Remoto a partir dos produtos MDS e MDT. Ele é resultado da subtração do MDS pelo MDT ($MDC = MDS - MDT$) e é um produto de grande relevância no mapeamento da área de estudo, indicando a distribuição da altura das árvores, sendo uma variável adotada como representativa da estrutura vertical da floresta em escala de paisagem. O MDC integrado ao mapa temático de Espécies de Mangue, gerado no âmbito deste Projeto, deu origem ao mapa de Fitofisionomias (ver Capítulo 10).

5.5. Caracterização dos Produtos Gerados

O conjunto de produtos gerados abrange o MDS (Modelo Digital de Superfície), o MDT (Modelo Digital de Terreno), a Nuvem de Pontos e o MDC (Modelo Digital de Altura de Copas) para cada área de estudo.

Calculou-se os valores mínimo, máximo, média e desvio padrão a partir dos dados representados nos modelos MDT e MDC de cada área. Estes valores são úteis para se conhecer o comportamento dos dados em cada uma das áreas, sendo possível reconhecer uma maior homogeneidade ou heterogeneidade na altitude do terreno e na altura das árvores em cada área. Para o MDT, considerou-se para a análise tudo que não fosse corpo hídrico, enquanto para o MDC somente foram consideradas as áreas de florestas de mangue. Esses filtros foram feitos utilizando-se o mapeamento de cobertura vegetal.

A Tabela 5-3 apresenta um resumo das estatísticas referentes às altitudes do MDT desconsiderando os corpos hídricos.

Tabela 5-3: Valores Mínimo, Máximo, Média e Desvio Padrão de altitudes no MDT referente a cada área de estudo.

Estatísticas	SCO	TUR	SOU	SUC
Mínimo (m)	-1,70	-2,95	-1,67	-2,91
Máximo (m)	16,08	50,54	16,33	5,08
Média (m)	2,71	3,18	2,20	2,82
Desvio Padrão (m)	2,28	4,09	0,62	0,71

Pela Tabela 5-3 pode-se observar que as maiores diferenças de altitude ocorrem na baía de Turiaçu, com desníveis da ordem de 50 metros. Como a média das altitudes é de 3,32 metros e o desvio padrão 4,04 metros, este valor pode ser considerado um *outlier* na distribuição. A média da baía de Turiaçu, porém, é um pouco maior que as das outras 3 áreas. Por outro lado, os dados referentes ao sistema costeiro de Sucuriju mostram os menores desníveis, com valores em torno de 5 metros, sendo a área mais plana, isto combinado com o sistema hidrológico da região favorece a ocorrência de áreas alagadas, distantes da franja.

O estuário de São Caetano de Odivelas e o sistema costeiro de Soure apresentam estatísticas similares nas altitudes mínimas e máximas, entretanto o desvio padrão do sistema costeiro de Soure é o menor das 4 áreas analisadas enquanto o estuário de São Caetano de Odivelas apresenta um valor elevado.

Confrontando essas informações com a topografia percebe-se que no estuário de São Caetano de Odivelas possui predomínio de áreas planas dentro de uma faixa de valores pequenos (0-5m) com poucas localidades elevadas, enquanto que o sistema costeiro de Soure apresenta uma topografia mais irregular, onde a parte norte é mais baixa que a parte sul, e os terrenos elevados apresentam-se melhor distribuídos e em maior quantidade em toda a região.

A Tabela 5-4 apresenta as estatísticas dos resultados obtidos pelo MDC, com dados restritos às áreas classificadas como floresta de mangue no mapeamento de alta resolução.

Tabela 5-4: Valores Mínimo, Máximo, Média e Desvio Padrão de altura da floresta de mangue no MDC referente a cada área de estudo.

Estatísticas	SCO	TUR	SOU	SUC
Mínimo (m)	-0,72	-1,24	-1,08	-0,38
Máximo (m)	42,08	36,51	48,27	42,00
Média (m)	17,28	8,52	14,95	15,98
Desvio Padrão (m)	9,33	5,38	9,68	8,25

Ao analisar a vegetação através das estatísticas apresentadas na Tabela 5-4, percebe-se que as árvores mais altas também estão na baía de Turiaçu, podendo chegar a mais de 60 metros. Por outro lado, considerando a média para toda a floresta de mangue, o estuário de São Caetano de Odivelas apresenta uma estrutura com árvores mais altas. Percebe-se que, como um todo, o estuário de São Caetano de Odivelas e os sistemas costeiros de Soure e de Sucuriçu possuem padrões de tamanho similares entre si, mesmo apresentando características topográficas distintas.

É preciso destacar que os valores negativos apresentados tanto para o MDT quanto para o MDC se devem a dados espúrios relacionados a poucos pixels, geralmente localizados em massas d'água não mapeadas por limitação de escala. De qualquer forma, essas ocorrências de valores negativos se dão em uma quantidade muito pequena de pixels se comparada com a área total.

Na Tabela 5-5 são apresentadas as estatísticas descritivas da Nuvem de Pontos em relação aos pontos que chegaram ao terreno (último retorno, usados na geração do MDT) e o restante dos pontos, englobando os pontos que atingiram o topo das superfícies (usados no MDS) e os que adentraram na floresta, até o sub bosque.

Tabela 5-5: Totais de pontos para cada área coberta pelo Levantamento LiDAR.

Estatísticas	SCO	TUR	SOU	SUC	Total
Pontos de Terreno	145.592.666	2.418.422.550	909.859.691	266.963.396	3.740.838.303
Pontos de Terreno (%)	10,94%	35,50%	28,85%	11,33%	27,40%
Pontos restantes	1.184.842.997	4.393.401.241	2.244.360.605	2.089.508.722	9.912.113.565
Pontos restantes (%)	89,06%	64,50%	71,15%	88,67%	72,60%
Total de Pontos	1.330.435.663	6.811.823.791	3.154.220.296	2.356.472.118	13.652.951.868

Na Tabela 5-5, pode-se observar que a quantidade de pontos e, conseqüentemente, de informação que o sensor capta ao longo do imageamento, para cada área, são expressivos indo de mais de 1 bilhão de

pontos na menor área (estuário de São Caetano de Odivelas) até quase 7 bilhões de pontos na baía de Turiaçu. Isso demonstra como todo o processamento dos dados LiDAR foi dispendioso em questão de tempo, exigindo ainda máquinas potentes para seu tratamento.

Quando o total de pontos é destrinchado entre os que chegam ao terreno e os que retornam antes, observa-se que pouco mais de um quarto dos pontos realmente atingiram o terreno, considerando todas as áreas levantadas. Esse número variou para cada uma das áreas pois a densidade da vegetação, diversidade de espécies, tipos de solo e ocorrência de áreas alagadas, se constituem em fatores que podem facilitar ou dificultar o acesso dos feixes de laser ao terreno e seu retorno ao sensor. Isto pode ser observado no estuário de São Caetano de Odivelas e no sistema costeiro de Sucuriju, onde o último retorno foi em torno de 11% do total de pontos, enquanto a baía de Turiaçu e o sistema costeiro de Soure tiveram percentuais de retorno mais elevados. O restante dos pontos (que atingiram o topo das copas ou o sub-bosque) naturalmente foram os mais expressivos em relação ao total de pontos que retornaram ao sensor.

Entretanto, para avaliar a qualidade do MDT analisou-se a densidade de pontos que conseguiram alcançar o terreno, dado que este é um fator preponderante para a qualidade da determinação da variação topográfica. Para isso, é apresentada na Tabela 5-6 a densidade dos pontos do último retorno em cada área levantada.

Tabela 5-6: Densidade dos pontos de terreno para cada área coberta pelo Levantamento LiDAR.

Estatísticas	SCU	TUR	SOU	SUC	Total
Pontos Terreno	145.592.666	2.418.422.550	909.859.691	266.963.396	3.740.838.303
Área levantada (km ²)	109,59	716,33	237,76	229,08	1.292,75
Densidade (Pontos/m ²)	1,33	3,38	3,83	1,17	2,89

Observa-se que, para todas as quatro áreas levantadas, a média de pontos por m² se manteve acima de 1 ponto/m², atingindo a meta especificada em contrato, com uma média final de 2,89 pontos/m².

Quando comparados os retornos dos sistemas costeiros de Soure e de Sucuriju percebe-se como as características do terreno, descritas anteriormente, são fatores determinantes para o total de pontos no terreno pois, mesmo tendo uma área total muito próxima entre elas, o sistema costeiro de Soure apresentou uma densidade de pontos no terreno 3x maior que o sistema costeiro de Sucuriju. Se comparado com informações da Tabela 5-5, onde o sistema costeiro de Soure teve 2,24 bilhões de pontos restantes e o sistema costeiro de Sucuriju teve 2,09 bilhões de pontos restantes, percebe-se que a diferença significativa dos resultados do LiDAR entre as áreas se deu somente no número de pontos de terreno.

A seguir apresenta-se mapas, figuras e gráficos dos produtos gerados para cada uma das 4 áreas. Os mapas referem-se aos produtos do MDS, MDT e MDC de cada área levantada. As figuras correspondem a exemplos da Nuvem de Pontos, onde é possível ver a tridimensionalidade das árvores construídas a partir do retorno dos pontos enviados. Os perfis topográficos são apresentados com um exagero vertical próximo de 100x, o que significa que a variação das altitudes aparece de forma exagerada quando comparadas com as distâncias no terreno. Este recurso é muito comum neste tipo de representação para facilitar a visualização das diferenças verticais. As linhas na cor verde representam a variação do dossel da floresta

(MDS), enquanto as na cor cinza representam o terreno (MDT). A diferença entre as duas linhas indica a variação de altura das árvores e a localização espacial destes perfis nas áreas de estudo são indicadas nos MDC correspondentes.

5.5.1. Produtos LiDAR para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA)

A Figura 5-14, Figura 5-15 e Figura 5-16, a seguir, apresentam o MDS, MDT (integrados em um mosaico e em forma de mapa) e exemplos da Nuvem de Pontos para a área do estuário de São Caetano de Odivelas. A Figura 5-17 apresenta o MDC para esta área e a localização dos perfis transversais que serão analisados na sequência desse texto.

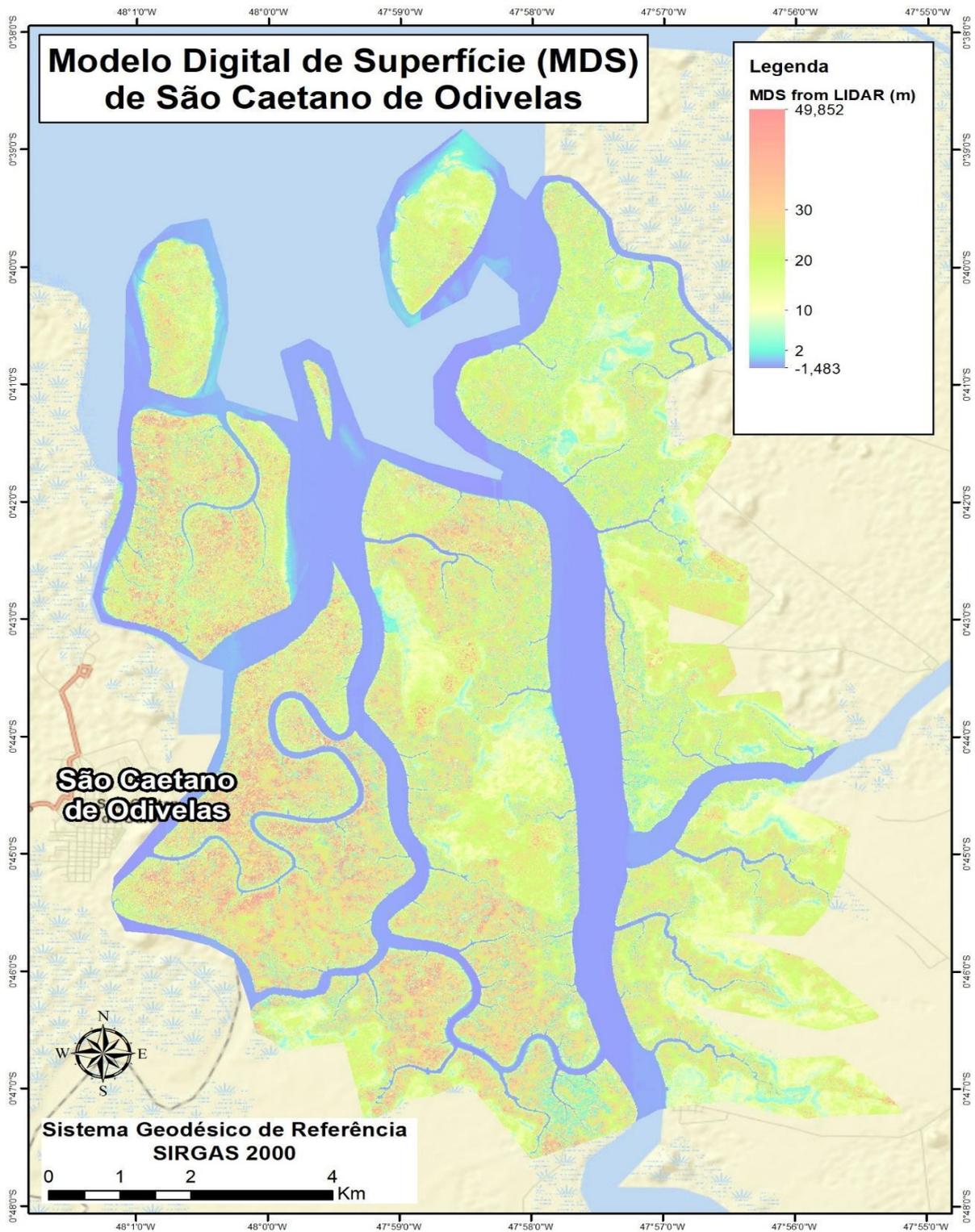


Figura 5-14: MDS do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

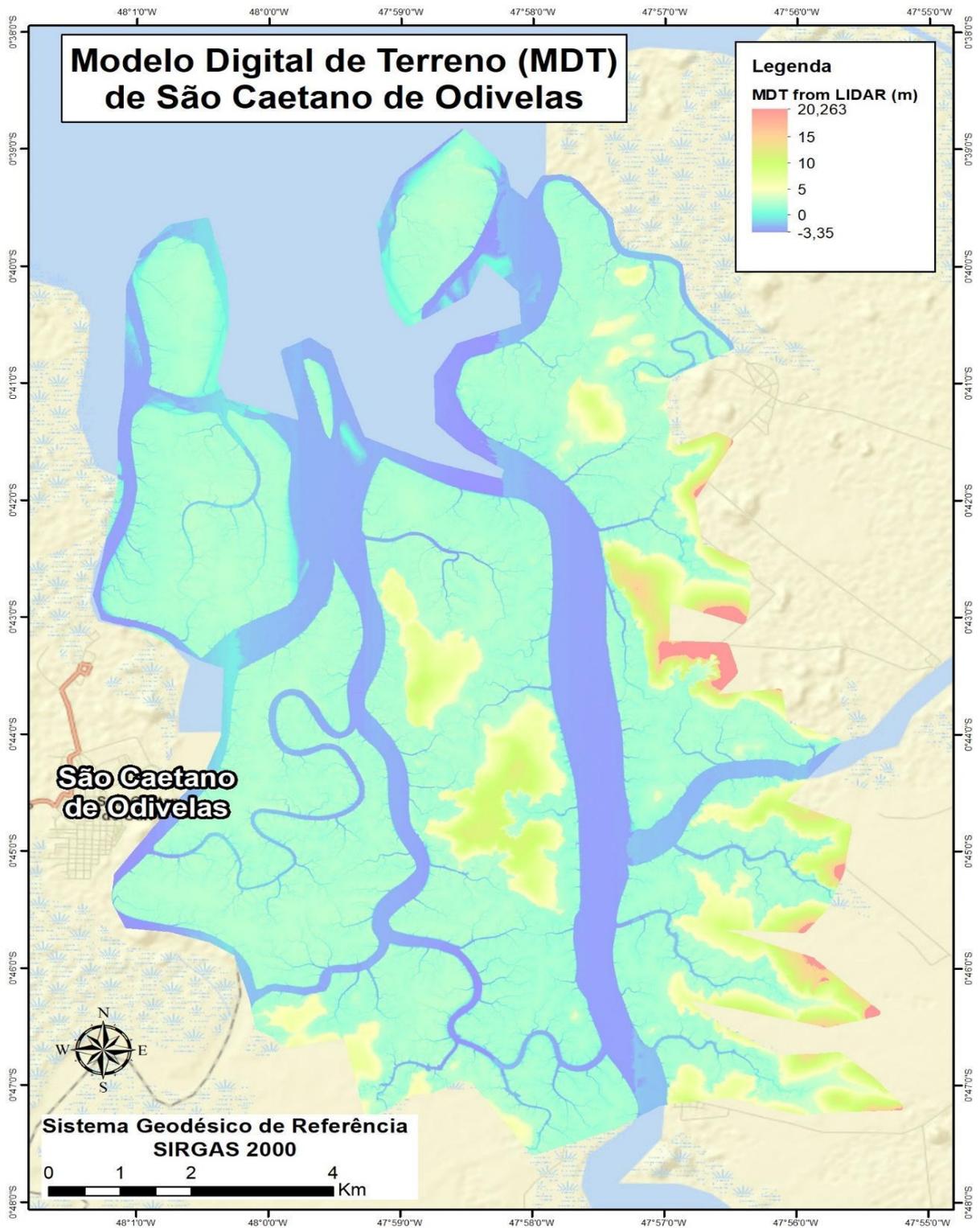


Figura 5-15: MDT do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

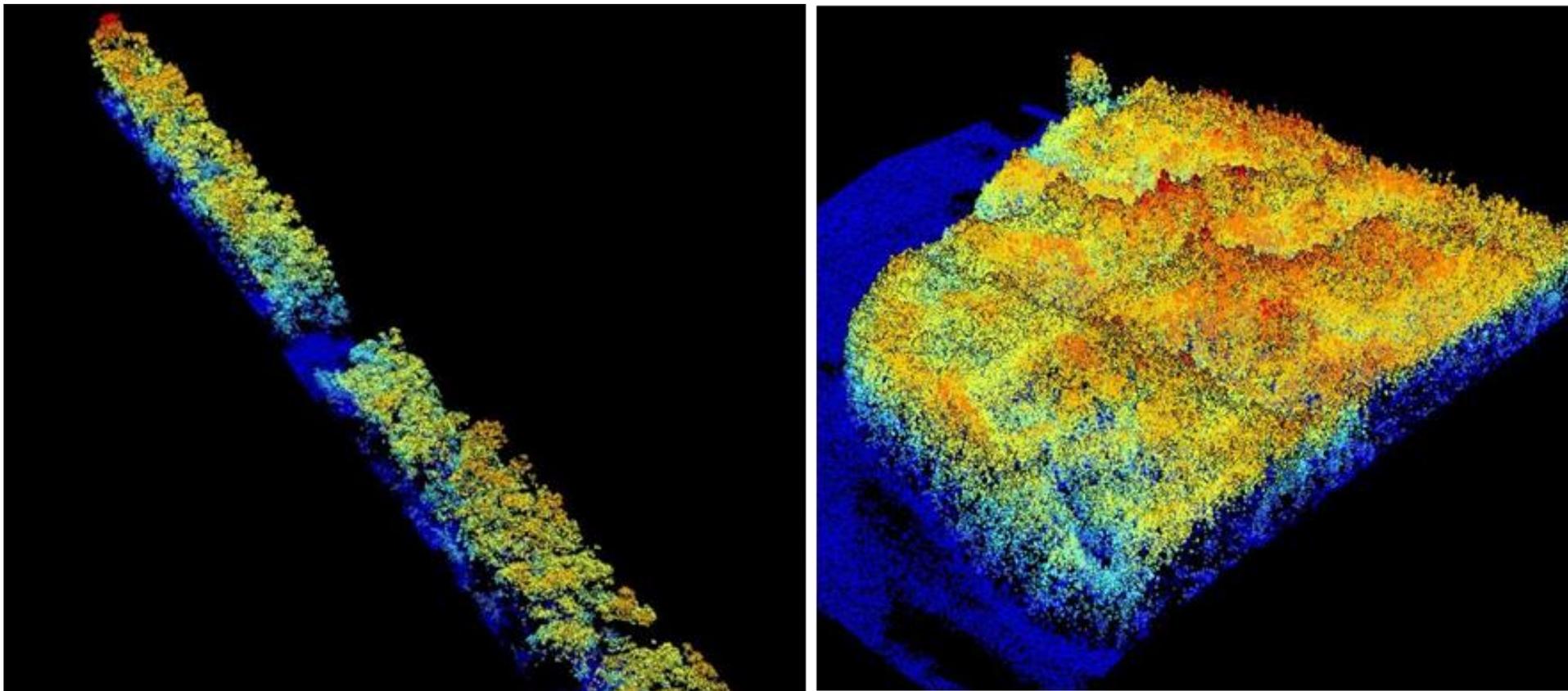


Figura 5-16: Exemplos de trechos da Nuvem de Pontos gerada com a aquisição de dados por LiDAR no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) em diferentes perspectivas.

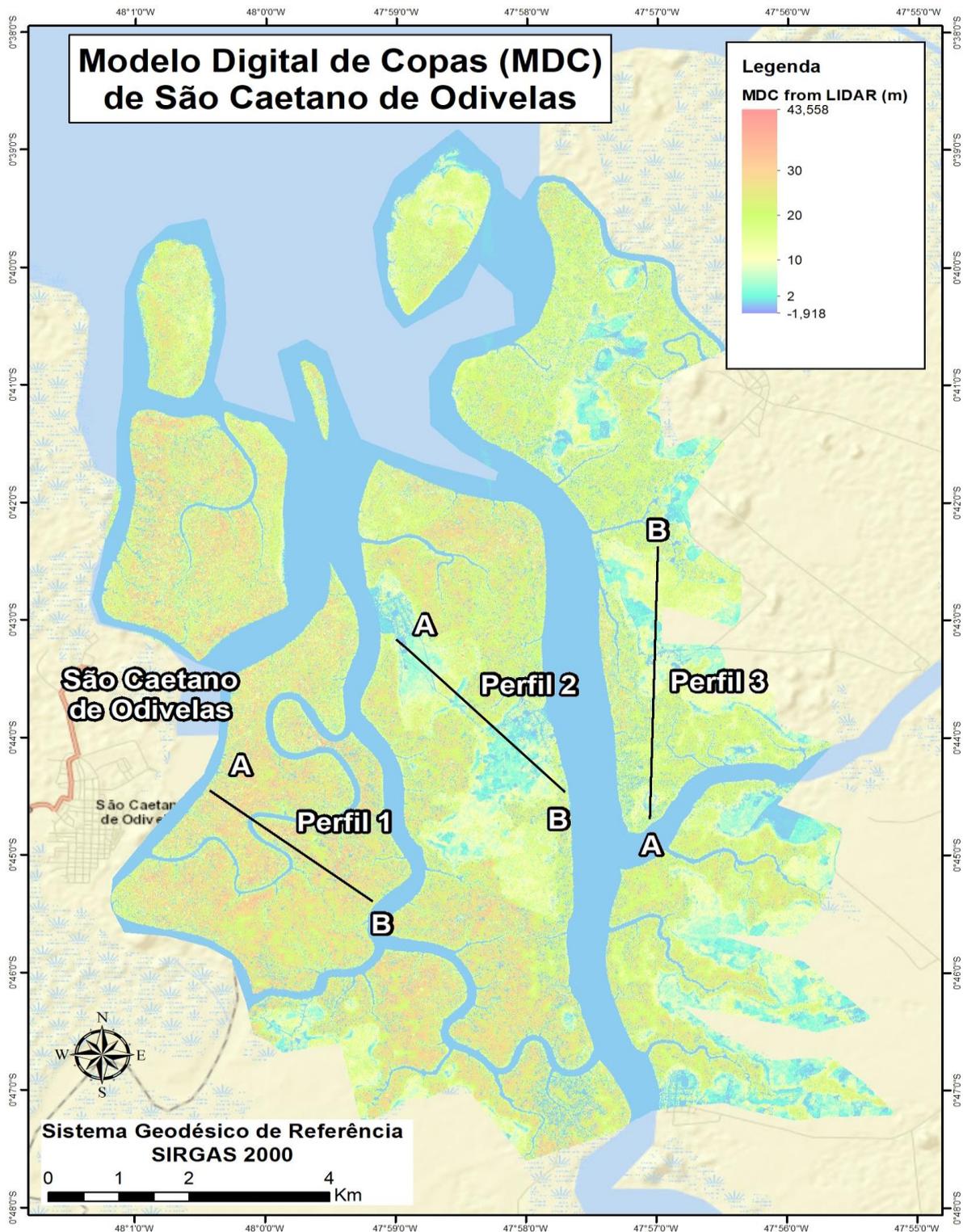


Figura 5-17: MDC do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) e localização dos perfis transversais para análise de resultados do MDS e MDT.

A Figura 5-18, Figura 5-19 e Figura 5-20, a seguir apresentam os resultados de perfis transversais traçados sobre o MDS e o MDT do estuário de São Caetano de Odivelas, cuja localização está ilustrada na Figura 5-17. Em todos os perfis – sejam do estuário de São Caetano de Odivelas, baía de Turiaçu e dos sistemas

costeiros de Soure ou de Sucuriçu – a linha do MDS (mais alta) representa o topo do dossel, enquanto a linha mais baixa representa o MDT, ou seja, o terreno. Logo, em todos os perfis, a altura das árvores é obtida subtraindo-se os valores de altitude do MDT dos valores de altitude do MDS (MDS-MDT). A variação entre a altura das árvores de determinado perfil transversal pode ser observada pelos valores mínimo e máximo do MDS, subtraído o MDT, conforme mencionado.

No Perfil 1 (Figura 5-18), a altura das árvores (mostrada pela linha que representa o MDS) apresenta pouca variação e acompanha a maior suavidade no terreno (linha representada pelo MDT). O perfil tem a orientação Noroeste-Sudeste e atravessa um corpo d'água, local onde as duas linhas são coincidentes (à distância de aproximadamente 750 m). Com exceção do trecho por onde passa o corpo d'água, em que a altitude se aproxima de zero, o terreno tem uma pequena variação de altitude próxima dos 2 metros, observável pelas altitudes mínimas e máximas, respectivamente, da linha do MDT. As árvores apresentam altura entre 14 e 28 metros neste trecho, representadas pelas altitudes mínimas e máximas, respectivamente, da linha do MDS, subtraído o MDT.

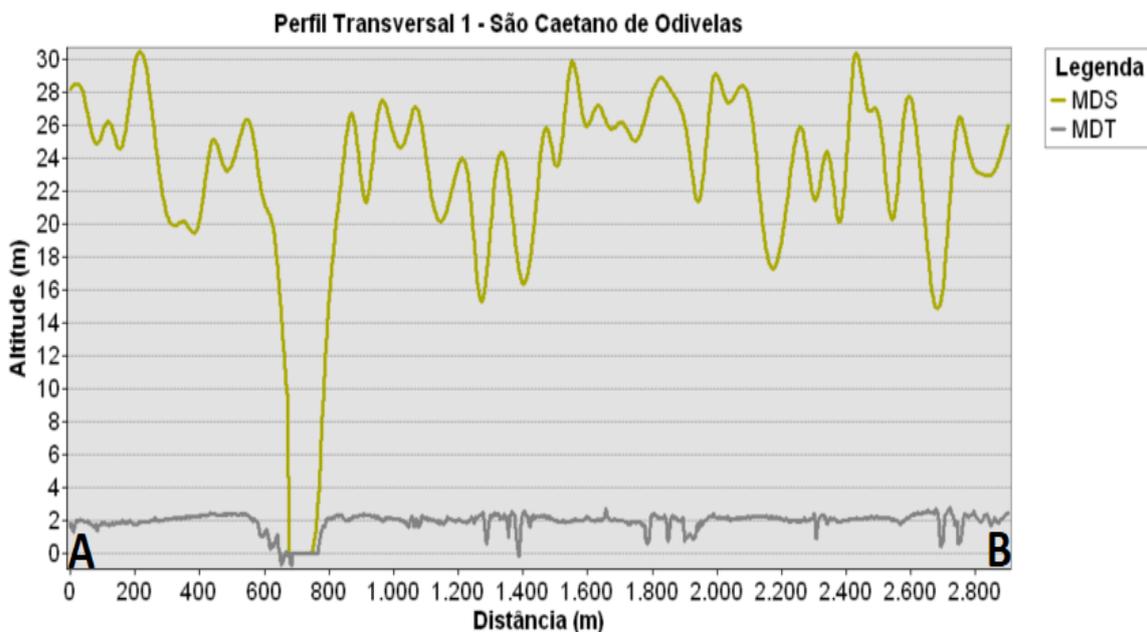


Figura 5-18: Perfil Transversal 1 no estuário de São Caetano de Odíveas (PA) - Terreno com pouca variação de altitude (observado pela variação da linha do MDT de até 2 m) e árvores entre 14 e 28 metros de altura (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

O Perfil 2 (Figura 5-19), também com orientação Noroeste-Sudeste, apresenta uma maior variação na altura das árvores (mostrada pela linha que representa o MDS) que estão sobre um terreno com maiores variações de altitude (linha representada pelo MDT). O terreno tem uma variação de altitude próximo dos 10 metros, variando de aproximadamente 0 até quase 10 metros. As árvores apresentam altura que varia de 2 até 22 metros neste trecho.

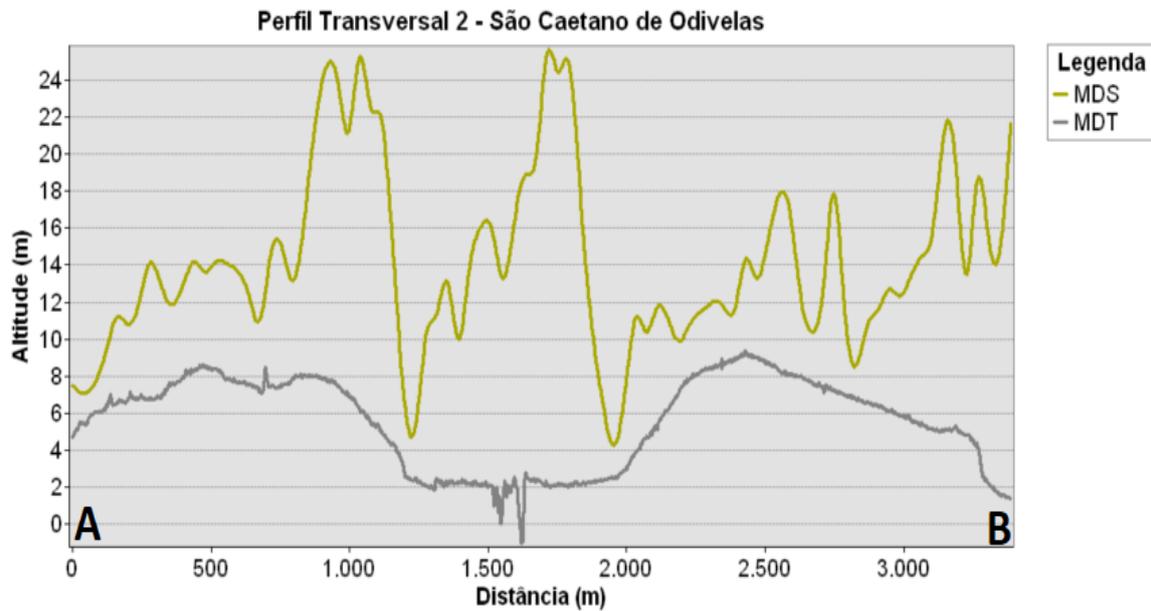


Figura 5-19: Perfil Transversal 2 no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) - Vegetação e Terreno não seguem o mesmo padrão de variação de elevação. Árvores variando entre 2 e 22 metros (observado pelas diferenças entre as linhas do MDS e do MDT), às distâncias de aproximadamente 2.000 m e 1.700 m, respectivamente.

No terceiro perfil (Figura 5-20), a orientação é Sul-Norte e ele está localizado no extremo oposto da área, em relação à cidade de São Caetano de Odivelas. Assim como no Perfil 2, não há nenhum cruzamento com corpos d'água. O terreno começa com altitude predominantemente constante em torno de 2 metros, na metade da extensão começa a subir até um máximo de 14 metros, quando volta a descer e se aproxima dos 2 metros no trecho final. As árvores apresentam altura variando de 2 até 22 metros (observado pelas diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

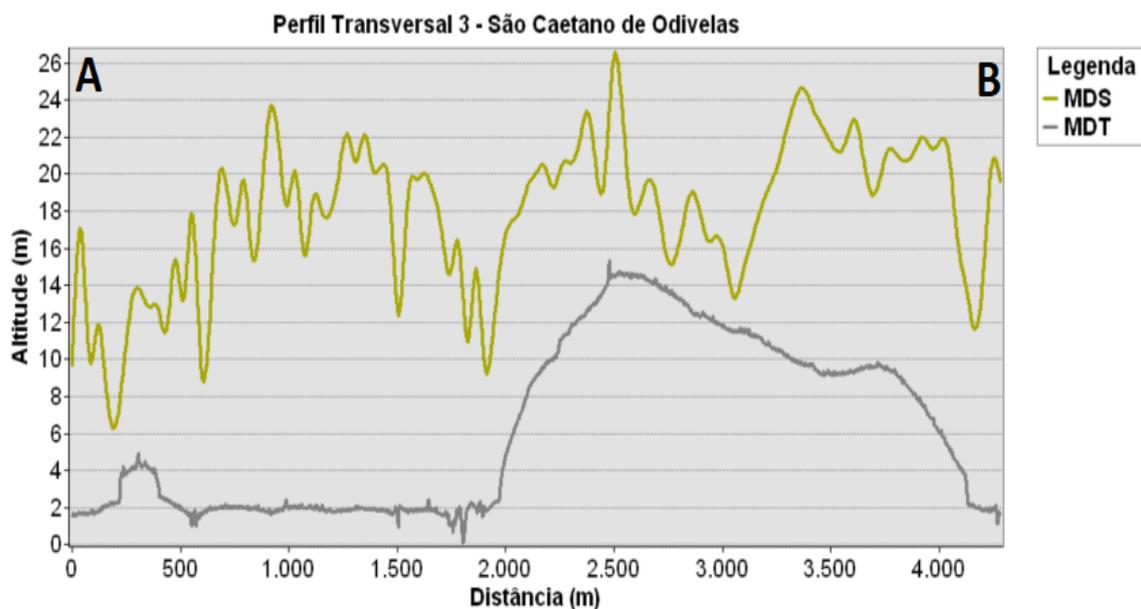


Figura 5-20: Perfil Transversal 3 no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) - metade do perfil com predominância de terreno com altitude próxima dos 2 metros (até a distância de aproximadamente 2.000 m) e a outra metade chegando aos 14 metros (à distância de aproximadamente 2.500 m), observado pela variação da linha do MDT. Árvores com altura variada, entre 2 e 22 metros (observado pelas diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

5.5.2. Produtos LiDAR para a baía de Turiiaçu (MA)

A Figura 5-21, Figura 5-22 e Figura 5-23, a seguir, apresentam o MDS, MDT e exemplos da Nuvem de Pontos da área de estudo baía de Turiiaçu. A Figura 5-24 apresenta o MDC para esta área e a localização dos perfis transversais que serão analisados na sequência desse texto.

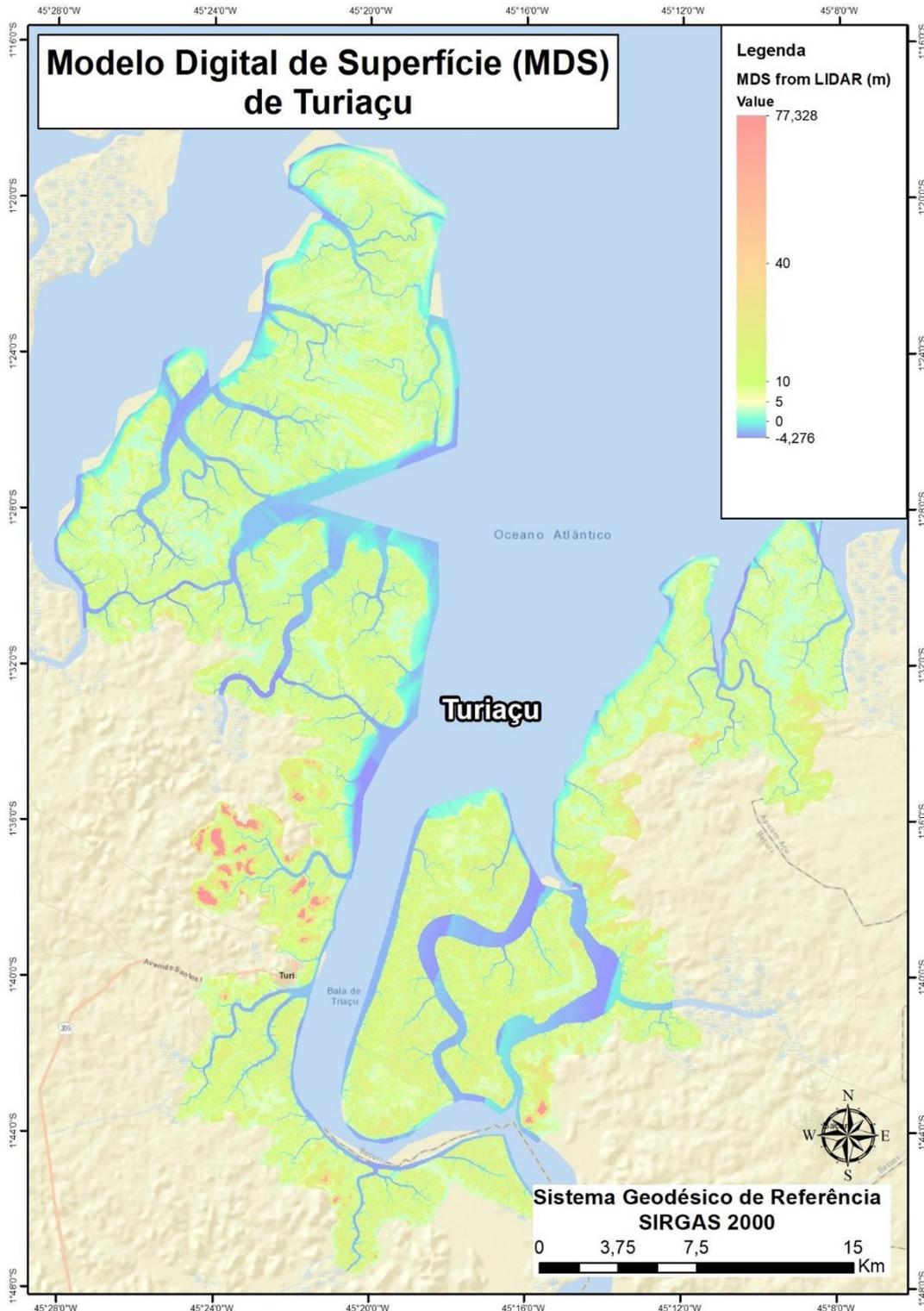


Figura 5-21: MDS da baía de Turiiaçu (MA).

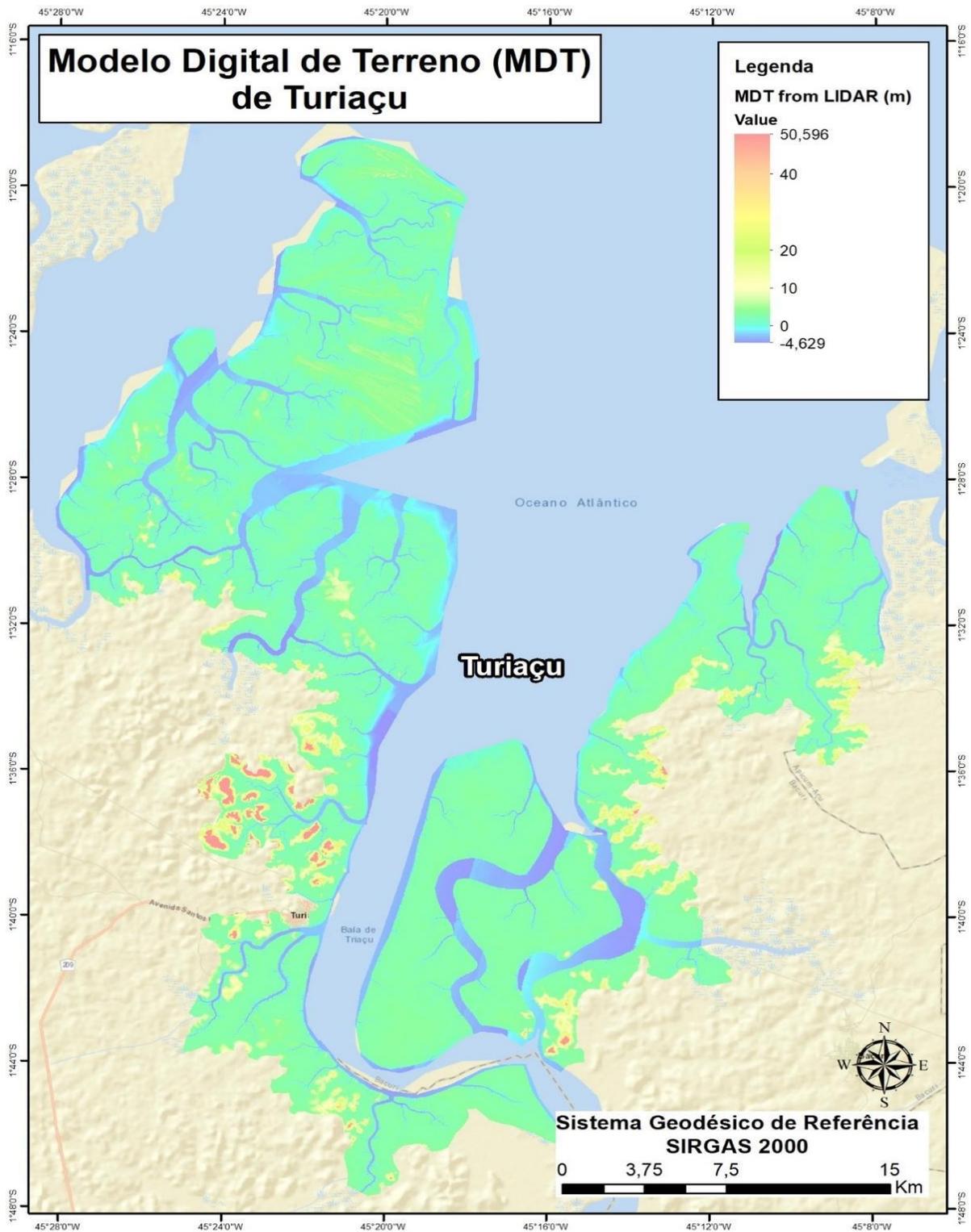


Figura 5-22: MDT da baía de Turiaçu (MA).

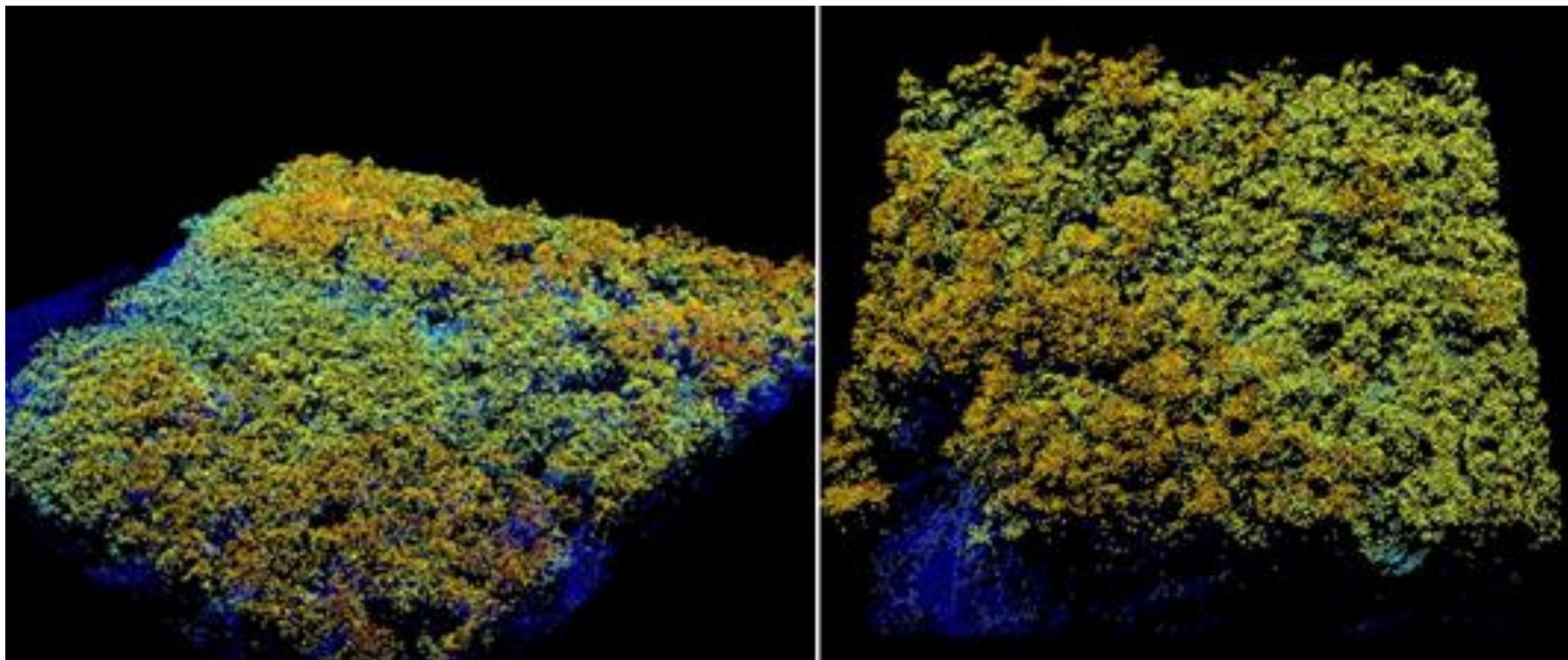


Figura 5-23: Exemplos de trechos da Nuvem de Pontos gerada com a aquisição de dados por LiDAR na baía de Turiaçu (MA) em diferentes perspectivas.

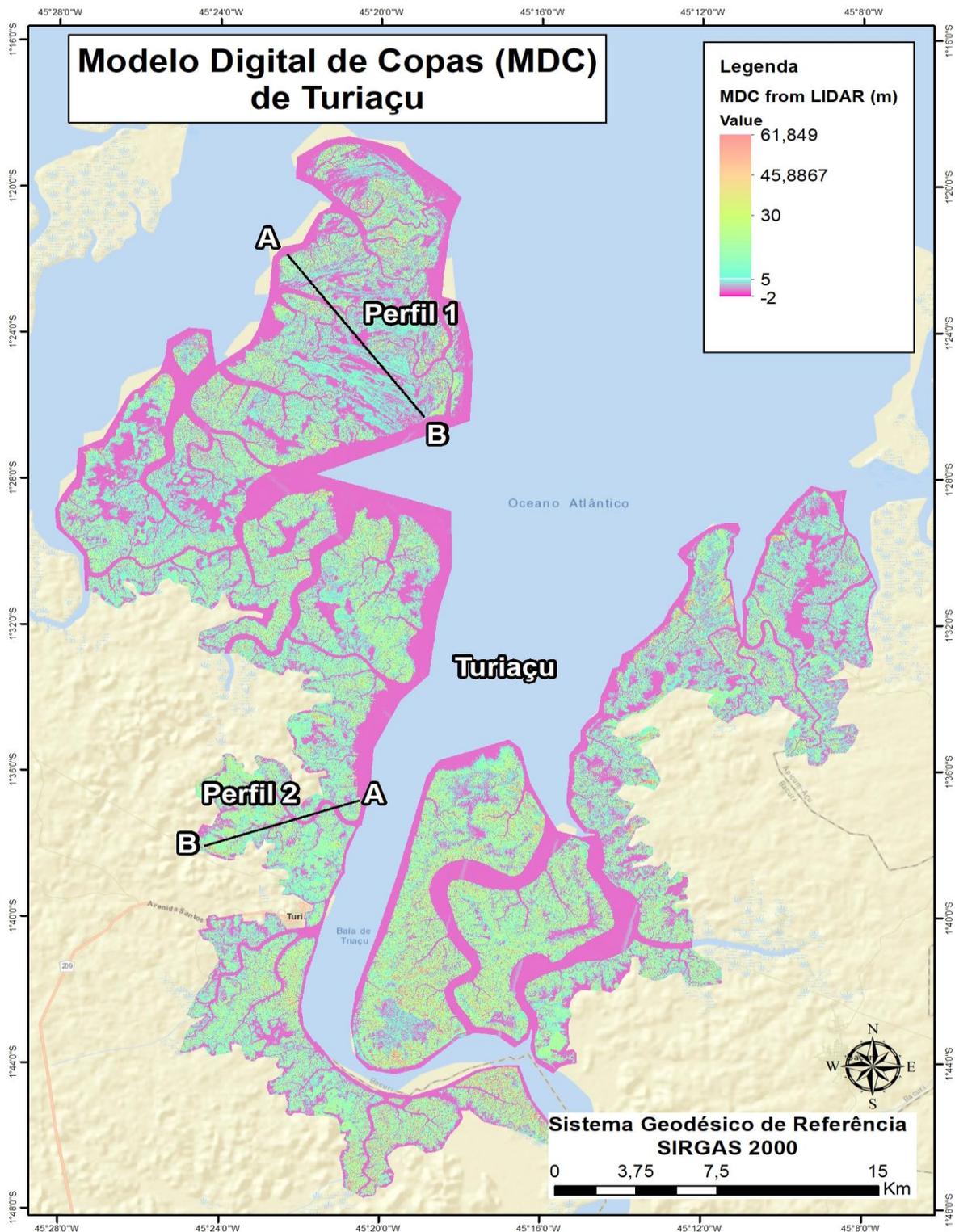


Figura 5-24: MDC da baía de Turiacu (MA) e localização dos perfis transversais para análise de resultados do MDS e MDT.

A Figura 5-25 e a Figura 5-26, a seguir, apresentam os resultados dos perfis transversais traçados sobre o MDS e o MDT da baía de Turiacu. Conforme apresentado no item 5.5.1, a altura das árvores é obtida subtraindo-se os valores de altitude do MDT dos valores de altitude do MDS (MDS-MDT). A variação entre

a altura das árvores pode ser observada pelos valores mínimo e máximo do MDS, subtraído o MDT. No Perfil 1 (Figura 5-25), observa-se uma grande variação na altura das árvores (Diferença entre MDS e MDT): desde 2 até 12 metros de altura. O perfil tem orientação Noroeste-Sudeste, começa e termina bem próximo a linha de costa, e cruza um grande canal à distância de aproximadamente 3.700 m. O terreno tem uma variação de altitude de 0 a 6 metros.

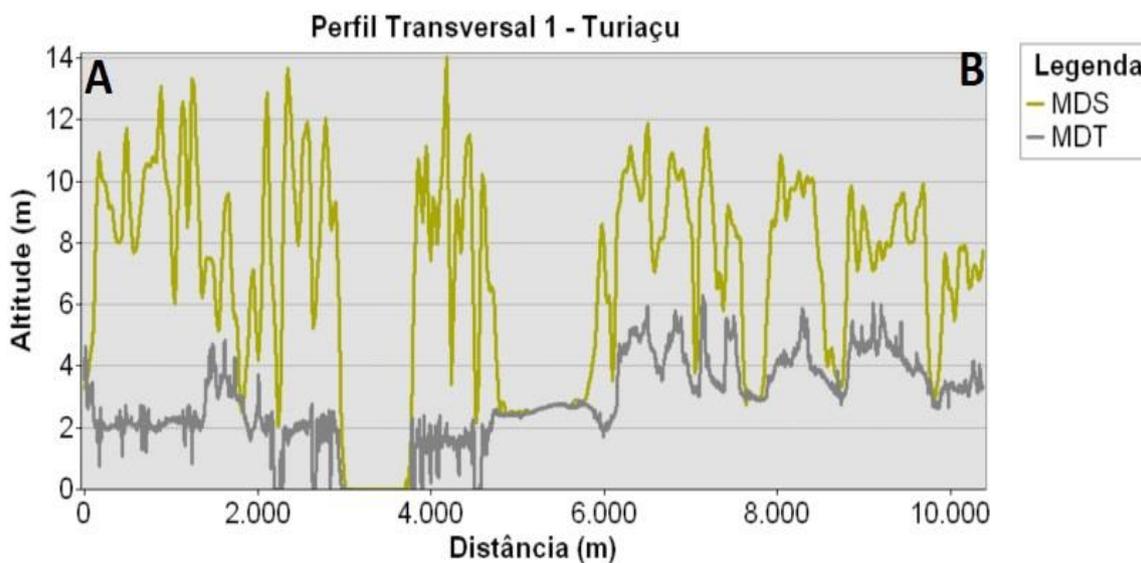


Figura 5-25: Perfil Transversal 1 na baía de Turiaçu (MA) - Terreno com variação de altitude entre 0 e 6 metros (observado pela variação da linha do MDT) e árvores variando de 2 a 12 metros de altura (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

No segundo perfil (Figura 5-26), a orientação aproxima-se de Nordeste-Sudoeste e ele está localizado mais ao sul da área, começando próximo à água e cortando algumas vezes um mesmo rio e outros canais menores. O terreno começa com altitude predominantemente constante em torno de 3 a 4 metros e depois de 4,5 km alterna altitudes de até 50 metros. As árvores apresentam altura variando de uns poucos metros até quase 20 metros (observado pelas diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

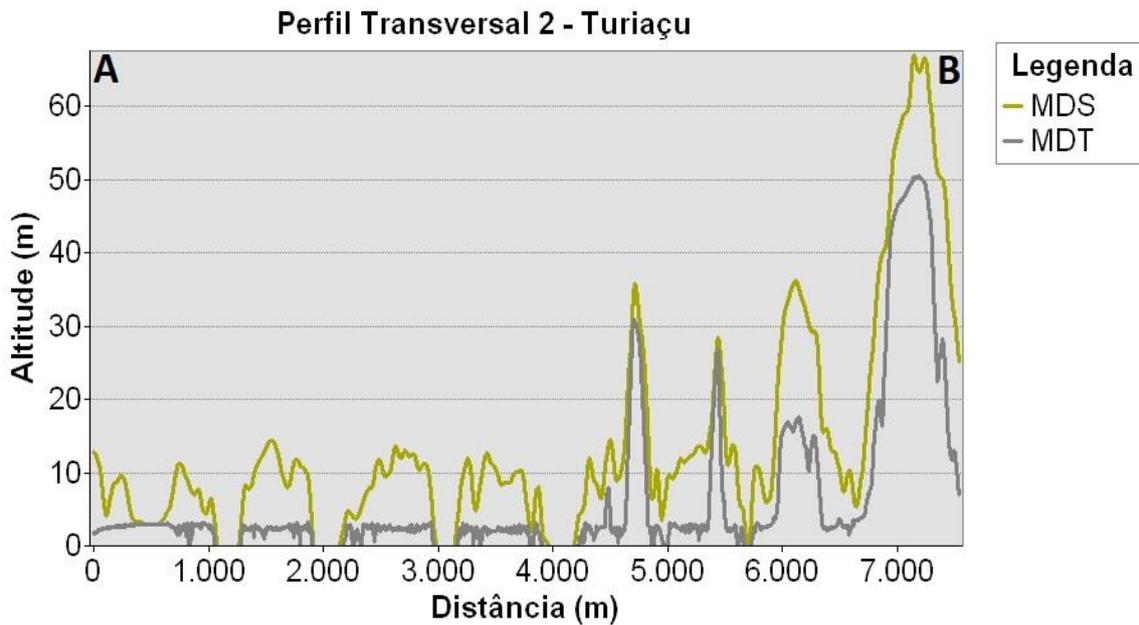


Figura 5-26: Perfil Transversal 2 na baía de Turiiaçu (MA) – à distância de 0 a 4,5 km, altitudes próximas a 3 ou 4 metros. A partir disso, encontram-se locais com até 50 metros de altitude (observado pela variação da linha do MDT). Árvores com altura variada até 20 metros (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

5.5.3. Produtos LiDAR para o sistema costeiro de Soure (PA)

A Figura 5-27, Figura 5-28 e Figura 5-29 apresentam, respectivamente o MDS, MDT e exemplos da Nuvem de Pontos do sistema costeiro de Soure. A Figura 5-30 apresenta o MDC do sistema costeiro de Soure e a localização dos perfis transversais que serão analisados na sequência desse texto.

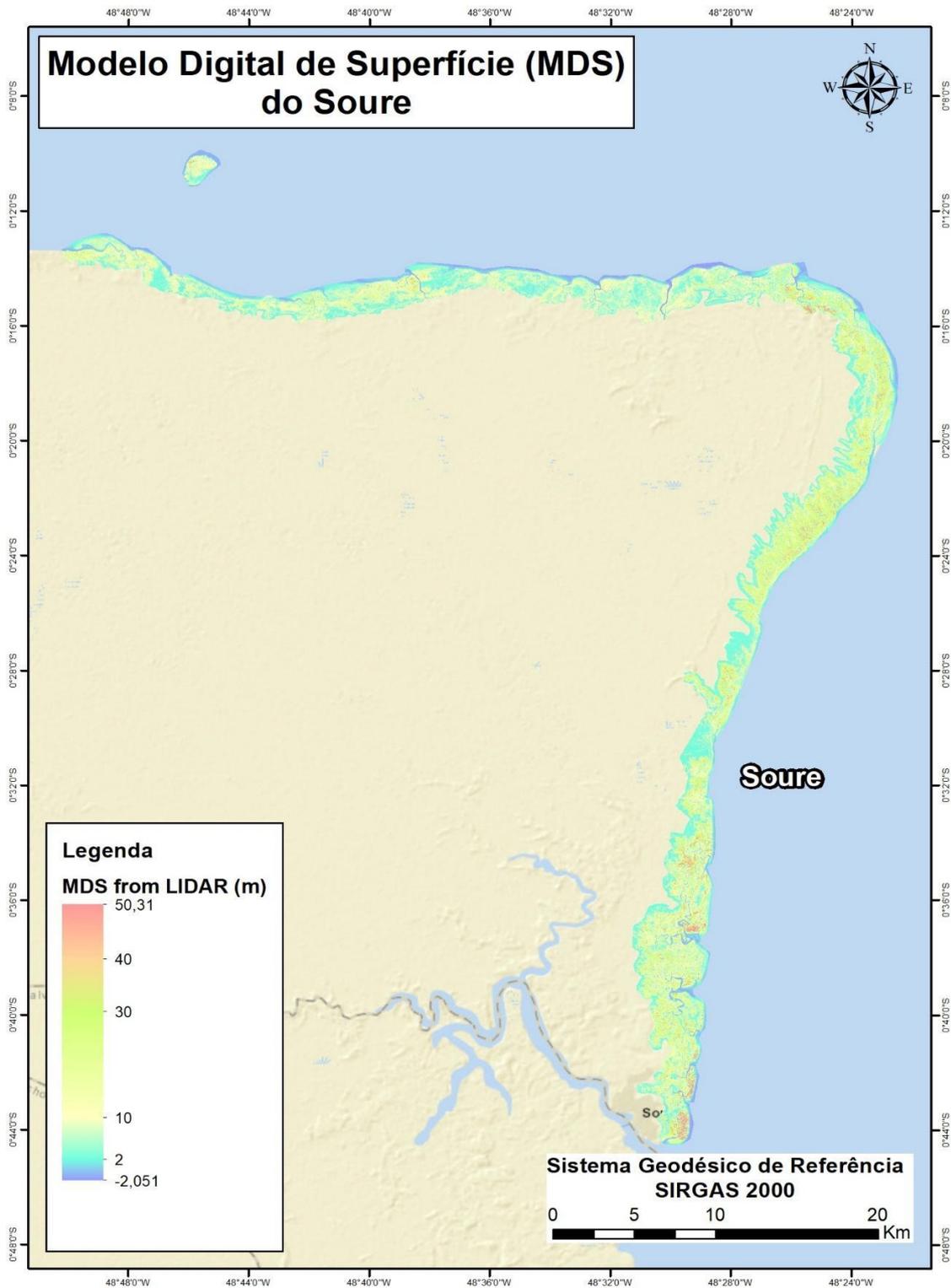


Figura 5-27: MDS do sistema costeiro de Soure (PA).

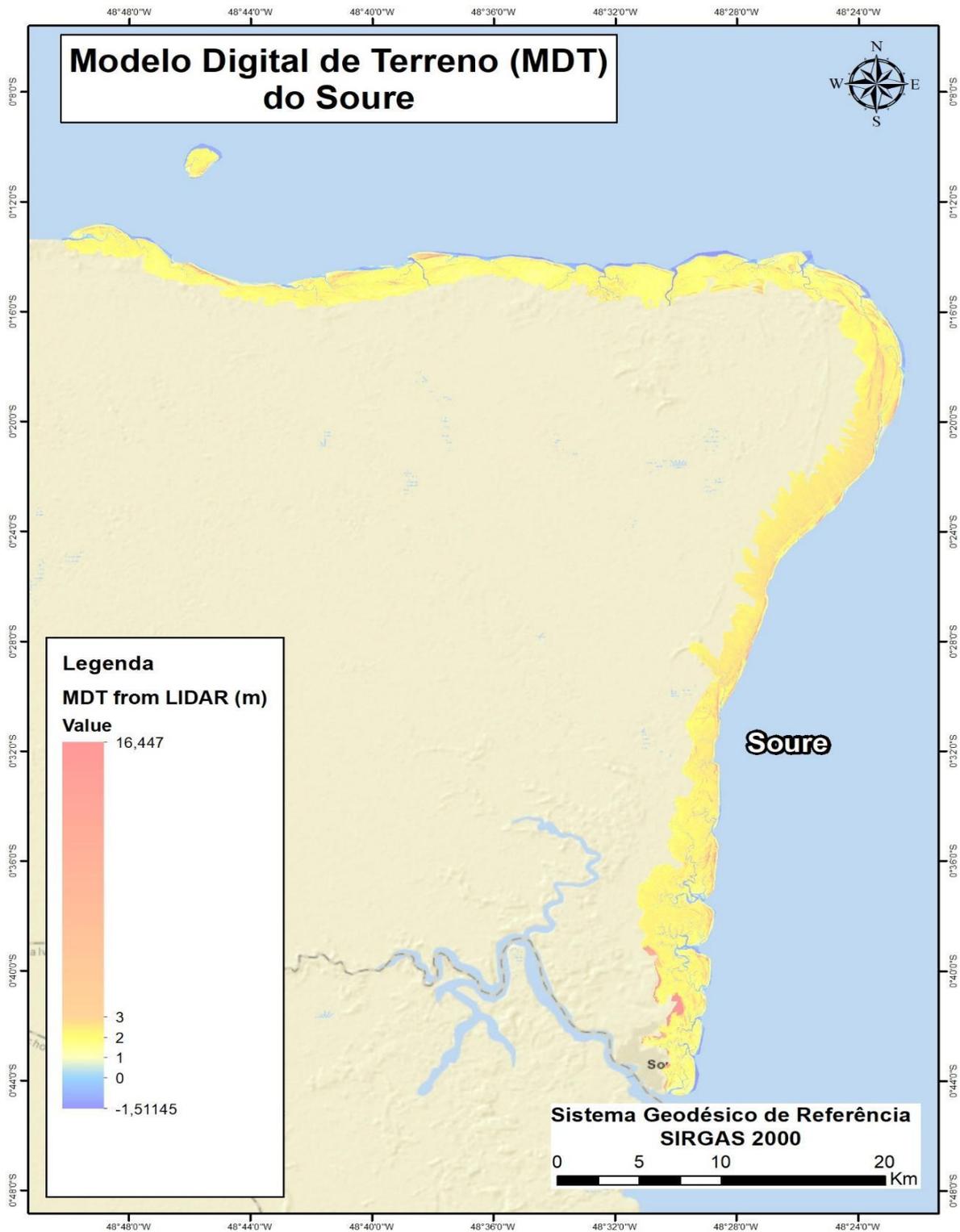


Figura 5-28: MDT do sistema costeiro de Soure (PA).

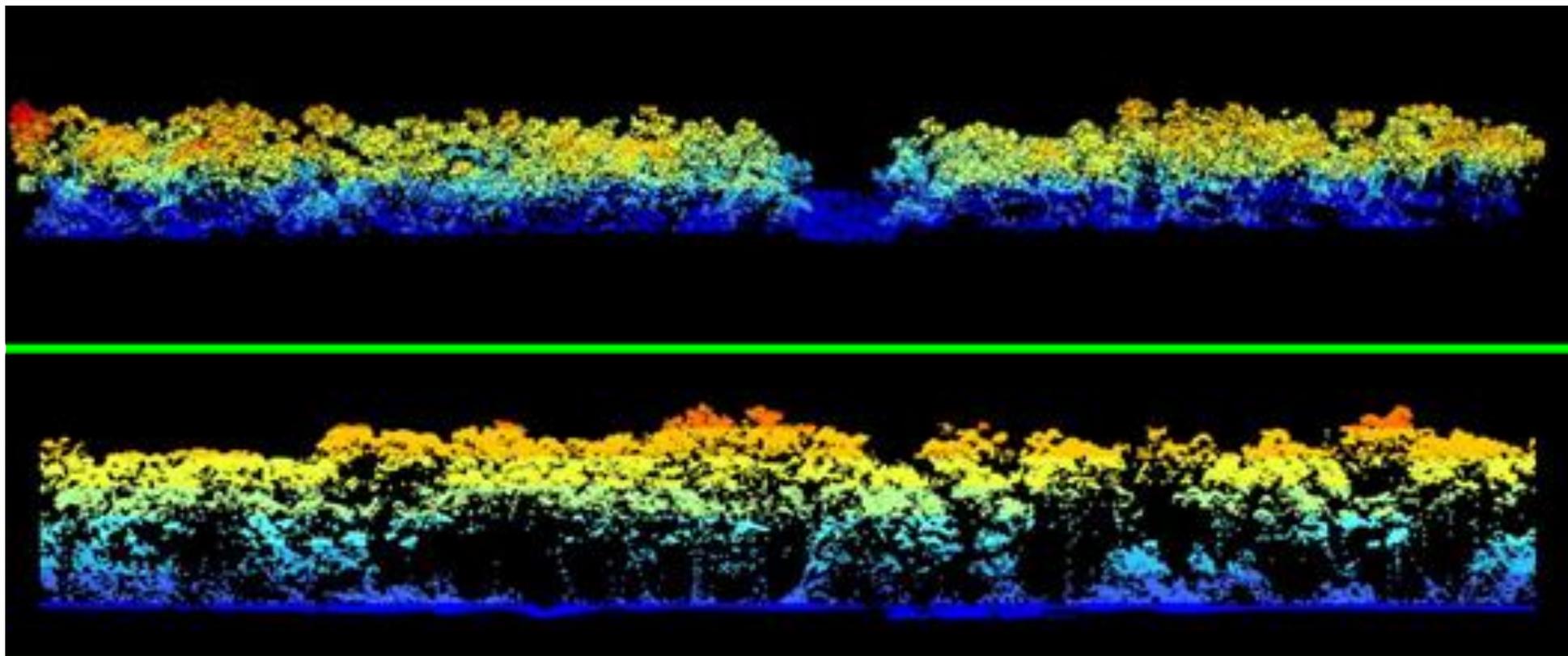


Figura 5-29: Exemplos de trechos da Nuvem de Pontos gerada com a aquisição de dados por LiDAR no sistema costeiro de Soure (PA) em diferentes perspectivas

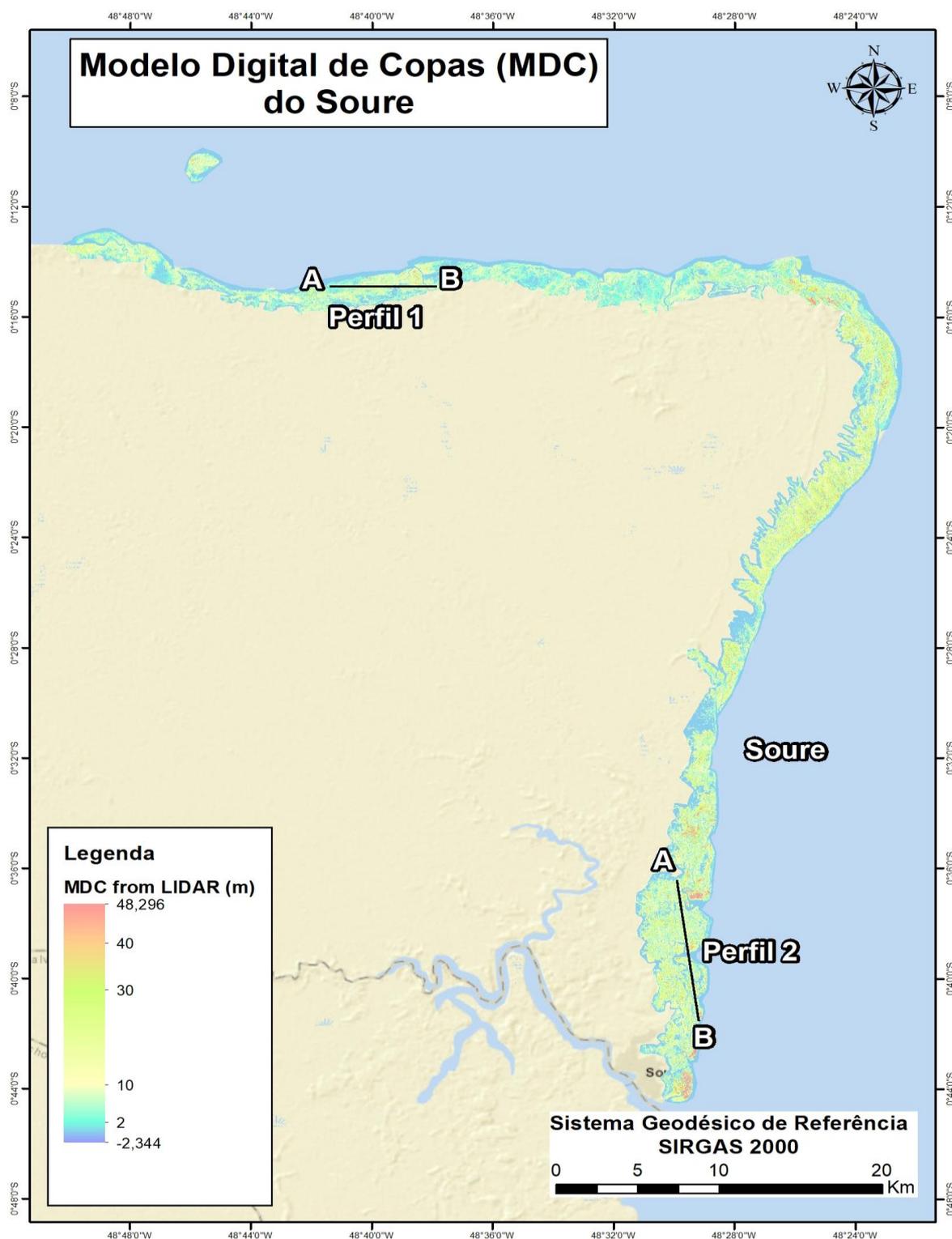


Figura 5-30: MDC do sistema costeiro de Soure (PA) e localização dos perfis transversais para análise de resultados do MDS e MDT.

A Figura 5-31 e a Figura 5-32, a seguir, apresentam os resultados dos perfis transversais traçados sobre MDS e o MDT do sistema costeiro de Soure. No Perfil 1, de orientação Oeste-Leste (Figura 5-31), percebe-se que o terreno tem pouca variação de altitude, ficando próximo a 2 metros em quase toda sua extensão, com algumas variações entre 0 e quase 4 metros. A altura das árvores, ao contrário, apresenta uma variação muito grande, desde 2 até 20 metros.

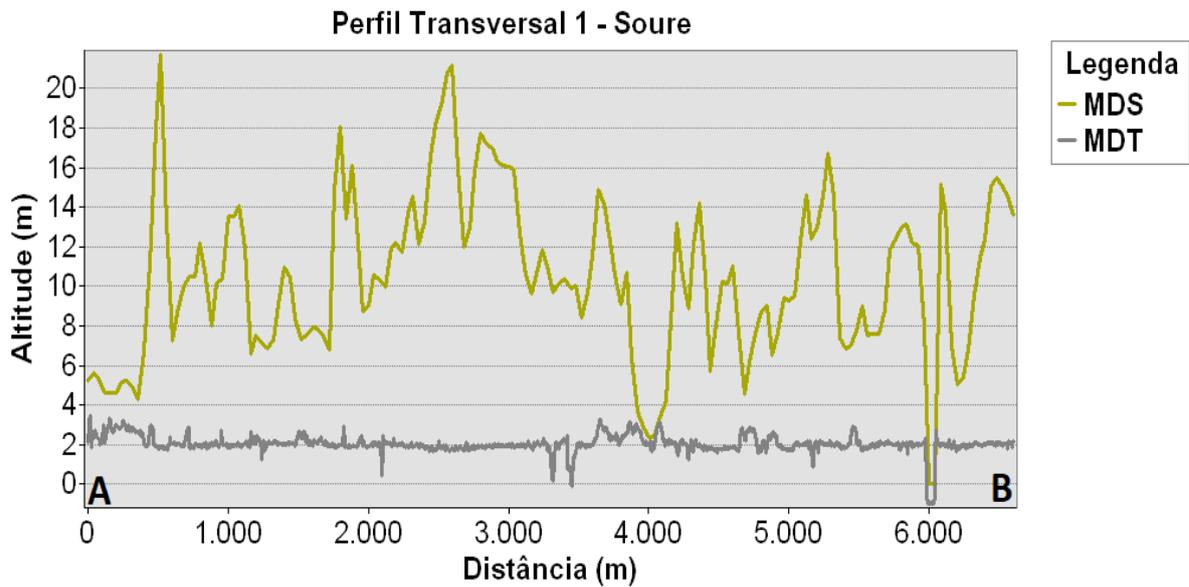


Figura 5-31: Perfil Transversal 1 no sistema costeiro de Soure (PA) - Terreno com pouca variação de altitude (observado pela variação da linha do MDT) e árvores entre 2 e 20 metros de altura (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

O Perfil 2 (Figura 5-32), com orientação Norte-Sul, também mostra um trecho com pouca variação de altitude do terreno: entre 0 e pouco mais de 3 metros em alguns poucos locais. As árvores apresentam variações grandes na altura, desde poucos metros até 25 metros na maior parte do trecho, com alguns locais apresentando árvores de quase 35 metros de altura.

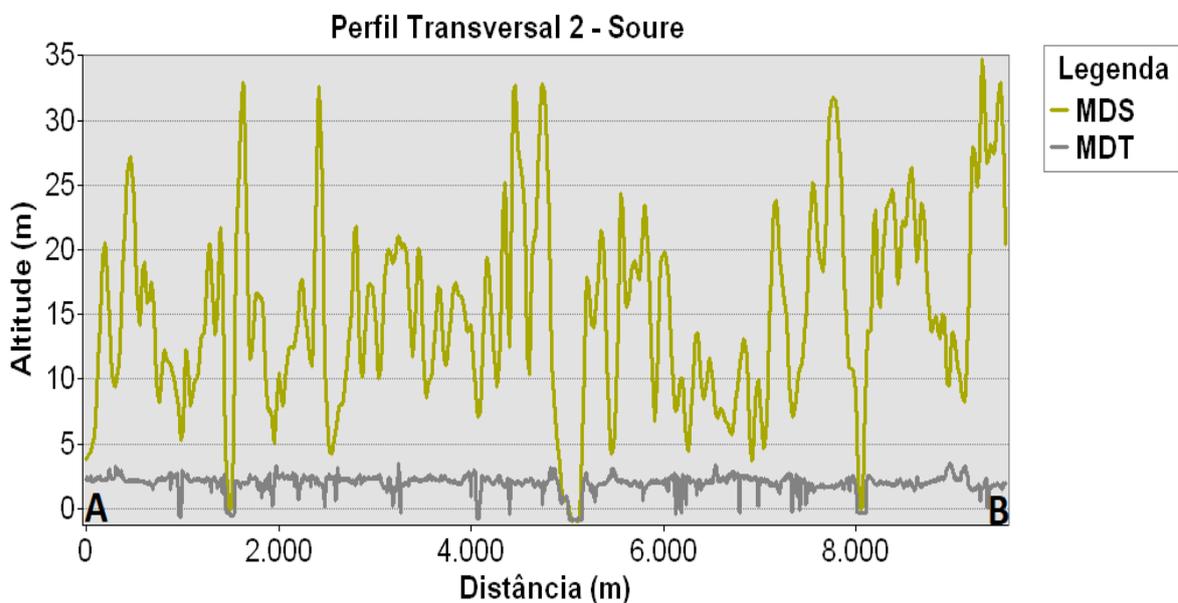


Figura 5-32: Perfil Transversal 2 no sistema costeiro de Soure (PA) - Terreno com pouca variação de altitude (observado pela variação da linha do MDT de aproximadamente 2,5 metros), e árvores variando bastante até quase 35 metros de altura (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

5.5.4. Produtos LiDAR para o sistema costeiro de Sucuriju (AP)

Para o sistema costeiro de Sucuriçu foram disponibilizados os mesmos produtos. A Figura 5-33, Figura 5-34 e Figura 5-35 apresentam o MDS, MDT e exemplos da Nuvem de Pontos, enquanto a Figura 5-36, representa o MDC do sistema costeiro de Sucuriçu e apresenta a localização dos perfis transversais que serão analisados na sequência desse texto.

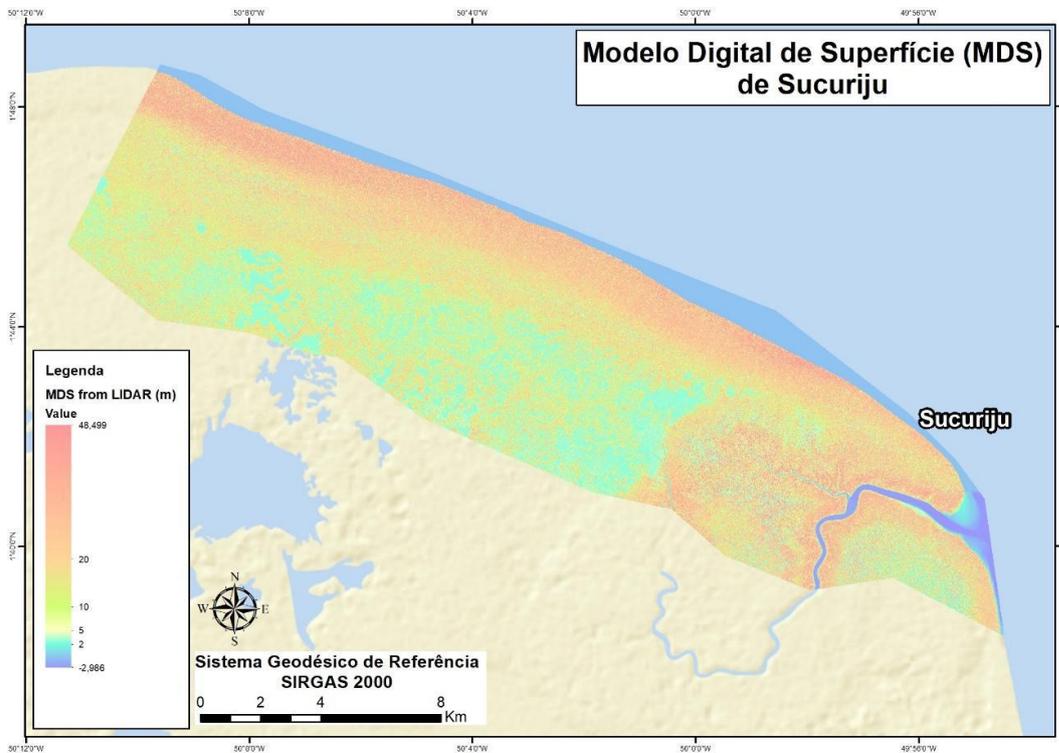


Figura 5-33: MDS do sistema costeiro de Sucuriçu (AP).

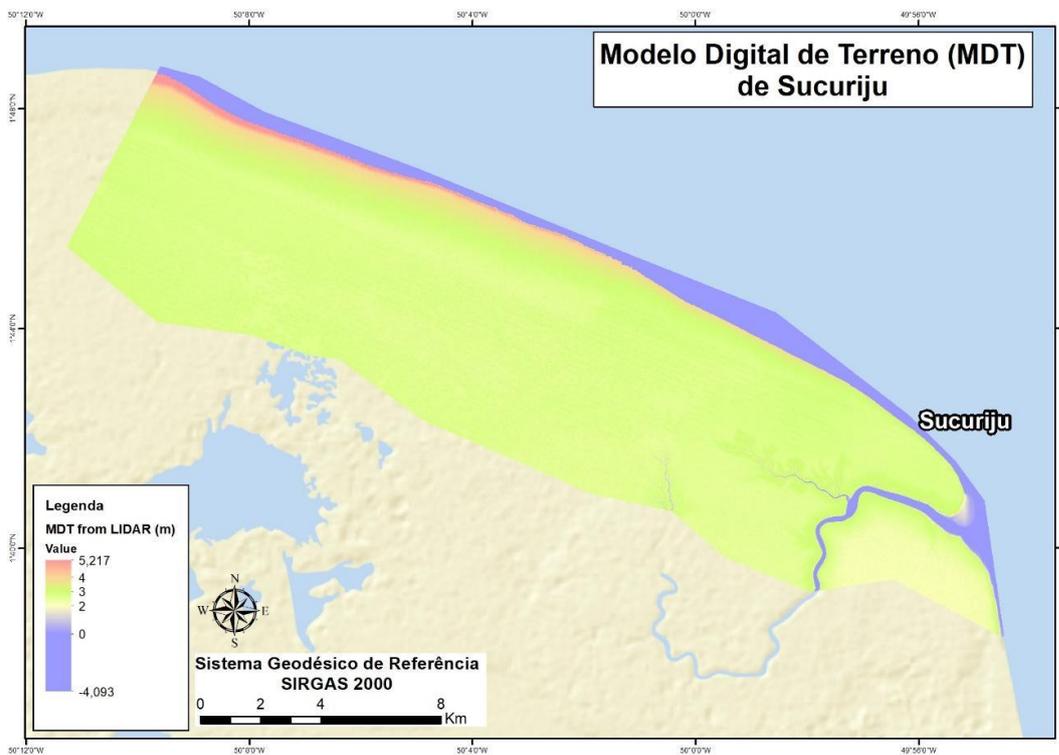


Figura 5-34: MDT do sistema costeiro de Sucuriçu (AP).

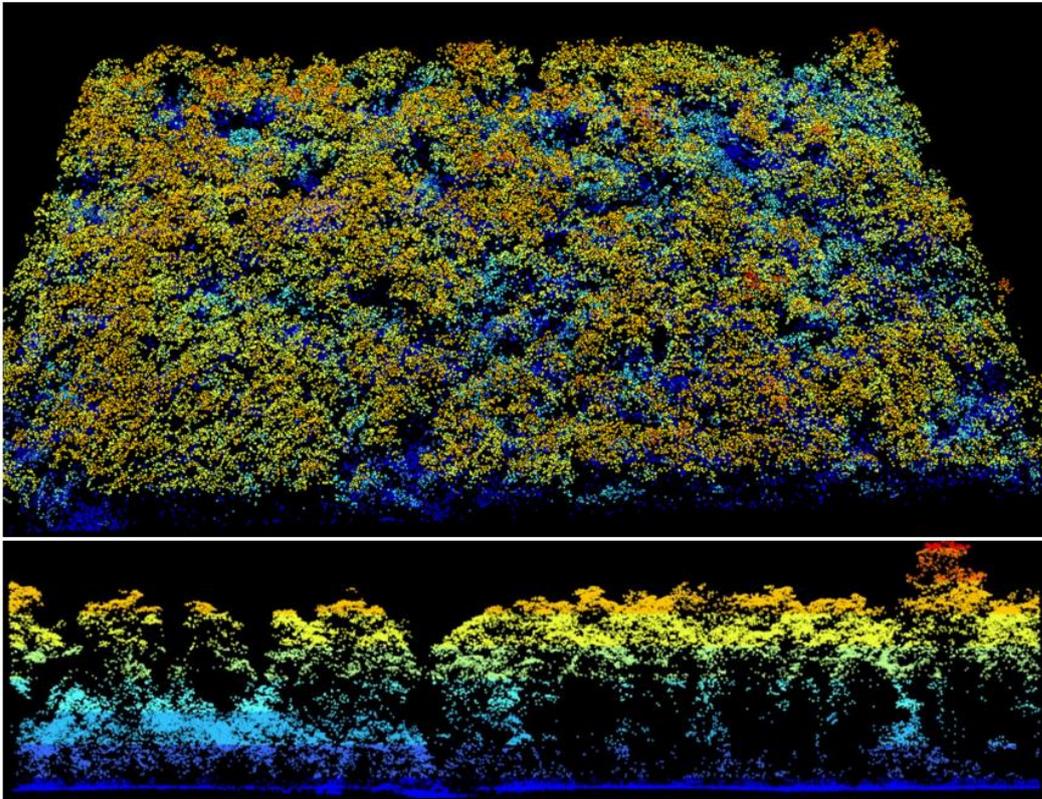


Figura 5-35: Exemplos de trechos da Nuvem de Pontos gerada com a aquisição de dados por LiDAR no sistema costeiro de Sucuriçu (AP) em diferentes perspectivas.

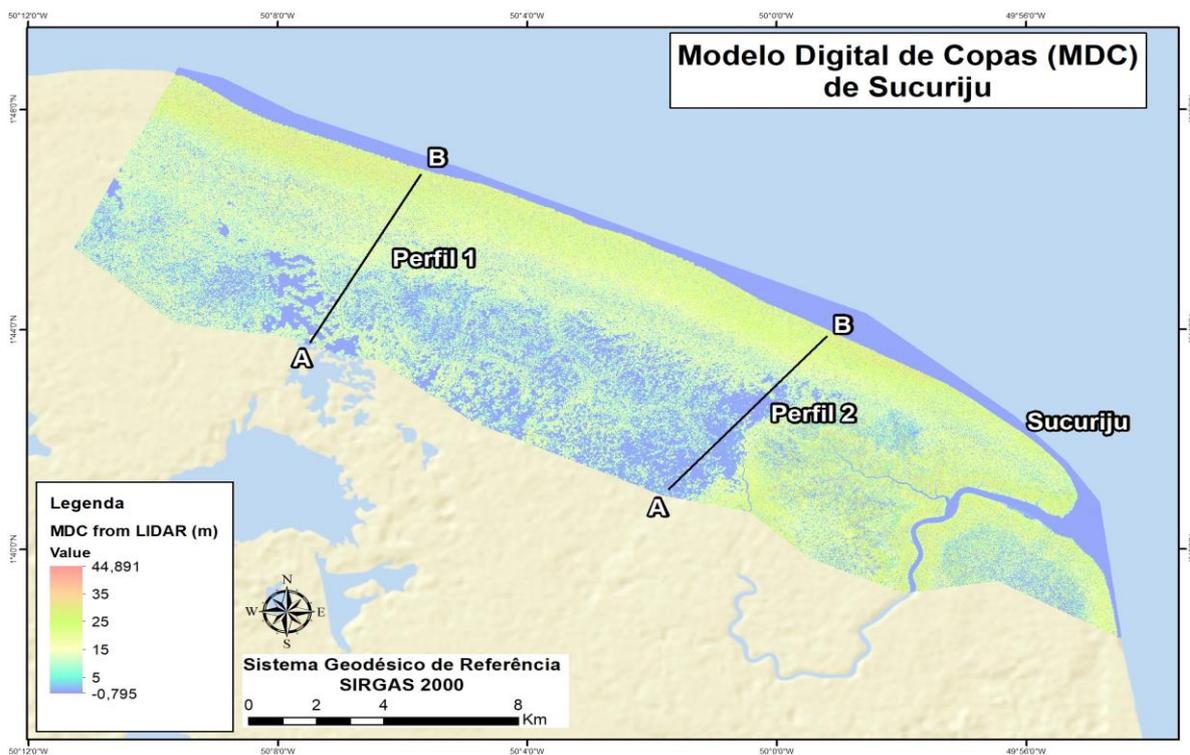


Figura 5-36: MDC do sistema costeiro de Sucuriçu (AP) e localização dos perfis transversais para análise de resultados do MDS e MDT.

A Figura 5-37 e a Figura 5-38, a seguir, apresentam os resultados dos perfis transversais traçados sobre o MDS e o MDT do sistema costeiro de Sucuriçu. No Perfil 1 (Figura 5-37), a orientação aproxima-se de Sudoeste-Nordeste e percebe-se uma constância muito grande nas altitudes do terreno em torno de 2 metros durante os primeiros 5 km, quando o terreno começa uma leve subida até a cota de 4 metros. A altura das árvores, porém, varia bastante, apresentando valores entre quase 0 e 16 metros nos primeiros 2,5 km do perfil. Depois disso, a altura aumenta um pouco e passa a variar entre 10 e 25 metros.

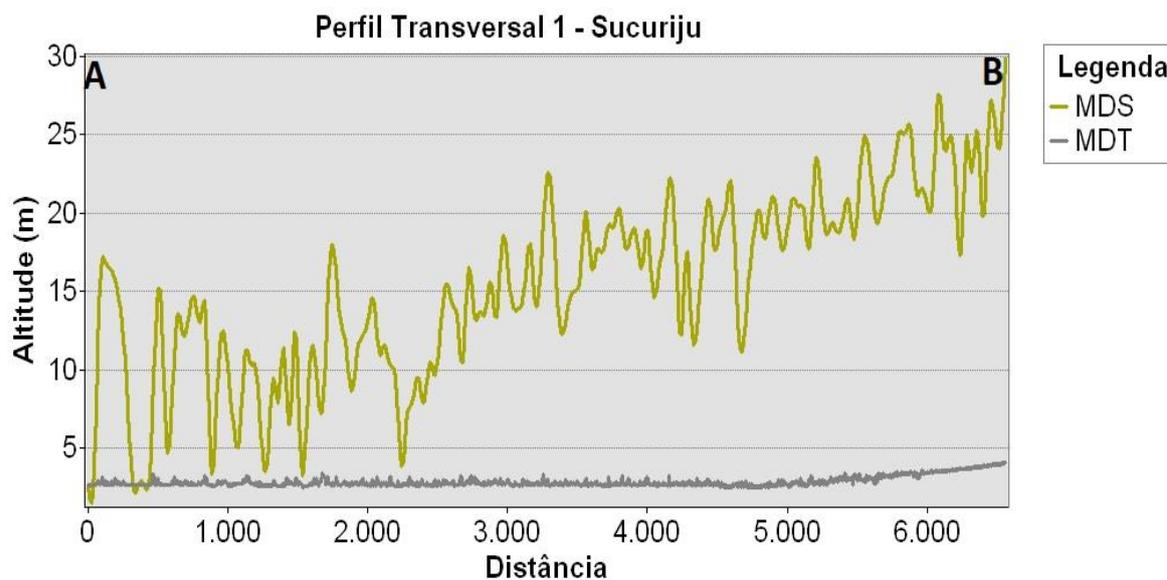


Figura 5-37: Perfil Transversal 1 no sistema costeiro de Sucuriçu (AP) - Terreno com pouca variação de altitude, entre 2 e 4 metros (observado pela variação da linha do MDT), e árvores variando bastante em altura, entre quase 0 e 25 metros (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

No segundo perfil (Figura 5-38), a orientação é Sudoeste-Nordeste. O terreno apresenta altitude praticamente constante em torno de 2 metros, havendo uma pequena subida para 3 metros no final do perfil, a partir do quilômetro 6,7, mais próximo da linha de costa. As árvores apresentam altura que varia de quase 0 até 15 metros até o 5o. quilômetro. A partir dessa distância até o final do perfil, próximo à costa, a altura das árvores passa a variar de 7 a 27 metros.

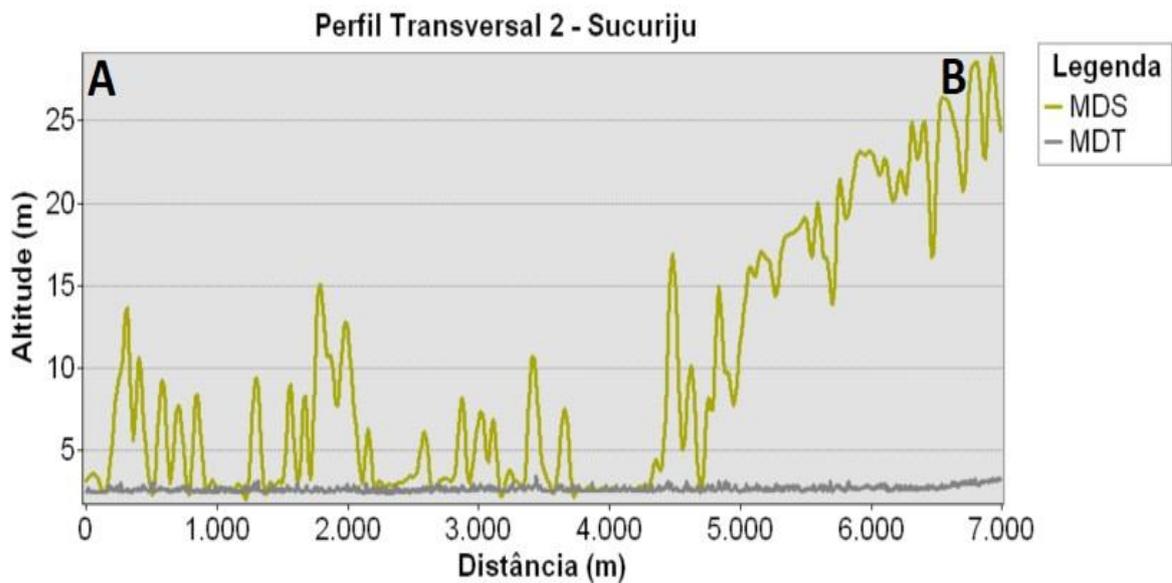


Figura 5-38: Perfil Transversal 2 no sistema costeiro de Sucuriçu (AP) - Terreno com altitude próxima dos 2 metros, com leve subida para os 3 metros no trecho final do perfil (observado pela variação da linha do MDT). Árvores com altitudes variadas, de poucos metros até 27 metros (observado pela variação da linha do MDS, consideradas as diferenças entre as linhas do MDS e do MDT).

5.6. Considerações sobre os resultados obtidos

Considerou-se que o LiDAR apresentou ótimos resultados se comparado a metodologias tradicionais de levantamento topográfico, tanto em questão de otimização de tempo, detalhamento e qualidade dos produtos finais e área total de cobertura. Um levantamento topográfico tradicional não combinaria essas três características juntas com o mesmo investimento.

A experiência obtida neste Projeto corroborou as expectativas do produto, mesmo considerando as complexidades envolvidas nas áreas de levantamento. Assim, é possível considerar o LiDAR como um dos produtos mais avançados e detalhados no quesito de representação topográfica e, principalmente, pelo fato de que com um MDS e um bom MDT é possível determinar a altura das árvores, dado importante no contexto do Projeto.

Reforça-se que o detalhamento do terreno, em regiões florestais, é dependente de características como a densidade de copas e tipos de solo, por exemplo. Para contrabalancear o baixo retorno, a área de sobreposição entre as faixas de sobrevoo pode ser aumentada para que um número maior de pontos seja enviado para uma mesma área, melhorando as chances de retorno dos pontos de terreno e garantindo um maior detalhamento no MDT. Entretanto, essa opção requer mais tempo de sobrevoo e um aumento de custo.

Considerando-se, ainda, as regiões costeiras ou, no caso específico, os ambientes de manguezais, áreas profundamente marcadas pelo regime de marés, áreas alagadas podem ser um fator adicional de obstrução dos pontos de terreno. Nessas regiões, além das medidas citadas anteriormente, é recomendável que a hora do sobrevoo seja calculada para ser em horário de maré baixa, garantindo que se tenha o mínimo de alagamento possível, minimizando restrições no caminho dos pontos de retorno ao sensor.

Considerando todas as análises, resultados e produtos obtidos, o LiDAR atendeu ao objetivo geral do seu levantamento ao definir com esmero a topografia das áreas estudadas com precisão suficiente, alcançando um detalhamento acima do exigido para a integração com os produtos da vulnerabilidade. Esse detalhamento dos modelos topográficos permitiu a determinação da altura das árvores, a partir da geração do MDC, contribuindo para a geração do mapeamento de fitofisionomias de mangue.

Os produtos finais do LiDAR (MDS, MDT e MDC) foram compartilhados com todos os grupos de trabalho do Projeto para que utilizassem a topografia como um refinamento em suas modelagens. Ressalta-se que o MDT gerado com os dados do LiDAR foram essenciais para o estudo da hidrodinâmica no interior das florestas de mangue e, portanto, para a análise de Vulnerabilidade a vazamentos de óleo segundo a metodologia desenvolvida no Projeto Costa Norte (ver Volume 1, Capítulo 3).

Dentre os resultados do Projeto Costa Norte que foram beneficiados direta ou indiretamente pela utilização do levantamento de dados por LiDAR tem-se:

i) Suscetibilidade:

- Probabilidade de toque de óleo nas regiões interiores das florestas de mangue (ver capítulo 8);

ii) Resiliência:

- Taxa de Afastamento nas regiões de floresta de mangue (ver Capítulo 8);
- Trabalho realizado pelas correntes nas regiões de floresta de mangue (ver Capítulo 7);

iii) Sensibilidade:

- Energia Cinética nas regiões das florestas de mangue (ver Capítulo 7);

iv) Mapeamento das Fitofisionomias:

- Combinação com o mapeamento de alta resolução de espécies de mangue para determinação das fitofisionomias (ver Capítulo 10).

5.7. Referências

- 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.
- BERGEN, S. J., GOETZ, R. O., DUBAYAH, G. M., HENEERY, 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.
- BRANDTBERG, T., WARNER, T. A., LANDENBERGER, R. E. & MCGRAW, J. B. Detection and analysis of individual leaf-off crowns in small footprint, high sampling density LiDAR data from eastern deciduous forest in North America. Remote Sensing of Environment, 85, 290 – 303, 2002.
- BROKAW, N.V.L.. The definition of treefall gap and its effect on measures of forest dynamics. Biotropica, 14, 158-160, 1982.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- LIU, X. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. Progress in Physical Geography, v. 32, n.1,p.31-49, 2008.
- 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.
- SILVA, A. Ecologia de paisagem: fundamentos e aplicações. Papel Virtual Editora, Rio de Janeiro, 2004.
- XIE, Y.; SHA, Z. & YU, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. (2008)
- YOUNG, R.H.; GREEN, D.R., COUSINS, S. 1993. Landscape ecology and geographic information systems. Taylor & Francis, New York.
- ZANDONA, D.F. 2006. Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.92p.
- ZHANG, K. Identification of gaps in mangrove forests with airborne LiDAR. Remote Sensing of Environment, 112, 2309–2325, 2008.
- 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, 87, 171-182, 2003.