

Capítulo 10

Mapeamento das Fitofisionomias das Florestas de Mangue

Autores do Capítulo

ESPAÇO/UFRJ

Profa. Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz

Dra. Paula Maria Moura de Almeida

Me. Felipe Gonçalves Amaral

Me. Gabriel dos Santos Duarte

Coordenação Adjunta

Ma. Carla Muniz Sabino

Colaboradores

Me. Alex Alves

Ma. Carla Muniz Sabino

Bela. Edineuza dos Santos Rosário

Gabriella Ferreira da Silva

Bel. Lucas Madureira Cruz

Me. Luiz Felipe de Almeida Furtado

Dr. Rafael Silva de Barros

Bela. Raissa Kalaf de Almeida

Ma. Maria Rita Olyntho Machado

Bela. Rita Maria Cupertino Bastos

Dr. Salustiano Vilar da Costa Neto

Tatiane Costa da Matta

Tiago Assunção Pena

Dra. Valdenira Ferreira dos Santos

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, ALMEIDA, P.M.M, AMARAL, F.G., DUARTE, G.S. “Mapeamento das Fitofisionomias das Florestas de Mangue”, Capítulo 10. Em: Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira. v.2. Rio de Janeiro (BR), 2020.

Sumário

10. MAPEAMENTO DAS FITOSIONOMIAS DAS FLORESTAS DE MANGUE	1042
10.1. Objetivos	1050
10.2. Metodologia	1050
10.2.1. Meso resolução	1052
10.2.1.1. Mapeamento das áreas de Mangue em meso resolução	1053
10.2.2. Alta resolução	1068
10.2.2.1. Delimitação das classes de mapeamento das espécies de mangue	1070
10.2.2.2. Geração de Índices Espectrais	1073
10.2.2.3. Classificação das Espécies de Mangue	1074
10.2.2.4. Pós-classificação de Espécies de Mangue	1080
10.2.3. Identificação e Mapeamento das Fitofisionomias	1080
10.2.3.1. Generalização	1083
10.2.3.1.1. Primeira Etapa: Generalização por Espécies de Mangue	1085
10.2.3.1.2. Segunda Etapa: Generalização entre Espécies de Mangue	1086
10.2.3.1.3. Terceira Etapa: Generalização entre as Classes de Uso e Cobertura	1087
10.3. Mapeamento das áreas de mangue em meso resolução	1088
10.4. Mapeamento da composição de espécies	1095
10.5. Mapeamento das fitofisionomias de manguezal	1105
10.6. Considerações Finais	1123
10.7. Referências Bibliográficas	1125

Índice de Figuras

Figura 10-1: Exemplo de assinatura espectral de objetos na superfície terrestre. Fonte: adaptado de Florenzano (2007).	1043
Figura 10-2: Curvas espectrais da vegetação. Fonte: Souza Filho (2008).	1045
Figura 10-3: Assinatura espectral de folhas de <i>Avicennia</i> e <i>Rhizophora</i> . Fonte: Kuenzer <i>et al.</i> (2011).	1046
Figura 10-4: Comportamento espectral de folhas de espécies de mangue segundo Wang e Souza (2009). Fonte: Wang & Souza (2009).	1046
Figura 10-5: Comportamento espectral de folhas de espécies de mangue e outras legendas, segundo Blasco (1998).	1047
Figura 10-6: Comportamento espectral de folhas de espécies de mangue segundo Rebelo-Mochell e Ponzoni (2007).	1047
Figura 10-7: Ilustração da visada de um sensor.	1048
Figura 10-8- Níveis de Classificação do Manguezal adotados no presente estudo.	1050
Figura 10-9- Fluxograma geral para o Mapeamento de Fitofisionomias, na coluna azul as atividades sob responsabilidade do Laboratório ESPAÇO.	1051
Figura 10-10: Recorte referente às áreas de mapeamento de meso resolução.	1054
Figura 10-11: Recorte de meso resolução referente à área que compreende o estuário de São Caetano de Odivelas (PA).	1055
Figura 10-12: Recorte de meso resolução referente à área que compreende o sistema costeiro de Soure, na Ilha de Marajó (PA).	1056
Figura 10-13: Recorte de meso resolução referente à área que compreende a baía de Turiaçu (MA).	1057
Figura 10-14: Recorte de meso resolução referente à área que compreende o sistema costeiro de Sucuriçu (AP).	1058
Figura 10-15: Fluxograma de atividades para o mapeamento em meso resolução.	1059
Figura 10-16: Ilustração da ficha de interpretação para meso resolução com caracterização das classes do mapeamento.	1061
Figura 10-17: Fluxograma de Processos de Classificação de Meso resolução	1062
Figura 10-18: Hierarquia de classes do mapeamento de Meso resolução.	1063
Figura 10-19: Esquema da abordagem metodológica adotada para o mapeamento das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas utilizando imagens de alta resolução.	1068
Figura 10-20: Esquema da abordagem metodológica adotada para o mapeamento das florestas de mangue utilizando as imagens de alta resolução.	1069
Figura 10-21: Ilustração da Ficha de interpretação no Nível 1 de classificação para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA).	1070
Figura 10-22: Ilustração da Ficha de interpretação no Nível 2 de classificação para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA).	1071
Figura 10-23: Ilustração da Ficha de interpretação no Nível 3 de classificação para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA).	1071
Figura 10-24: Detalhamento das etapas envolvendo o mapeamento da distribuição das espécies de mangue.	1074
Figura 10-25: Exemplo de árvore de processo elaborada para o mapeamento de uma área na baía de Turiaçu (MA) (TUR04).	1076
Figura 10-26: Teste de segmentação em nível mais detalhado.	1077

Figura 10-27: Exemplo de parâmetros (banda do verde) e limiares, para dois projetos (TUR 02 e TUR 10).	1078
Figura 10-28: Fluxo de atividades para geração do mapa de fitofisionomias.	1081
Figura 10-29: Tipos Estruturais identificados por Pellegrini <i>et al.</i> (2009) nas florestas de mangue de Garapúá (Cairu, BA). Fonte: Pellegrini <i>et al.</i> (2009).	1082
Figura 10-30: Combinação entre o mapeamento de espécies (A), a classificação de alturas de mangue (1) gerando assim o mapeamento de fisionomias (A1).	1083
Figura 10-31: Diferença dos efeitos da generalização quando ocorre fragmentação causada pelos micros polígonos (A) e em áreas mais contínuas (B).	1084
Figura 10-32: Eliminação dos micros polígonos.	1084
Figura 10-33: Processo de generalização com as ferramentas utilizadas, onde o X é o valor de área a ser generalizado.	1085
Figura 10-34: Diferenças entre a generalização considerando todas as espécies (A) e por espécie (B). ...	1085
Figura 10-35: Fluxo de processos para generalização por espécie de mangue até 1.000m ²	1086
Figura 10-36: Generalização de pequenos polígonos de uma espécie dentro da outra.	1086
Figura 10-37: Fluxo de processos para generalização por espécie de mangue até 300m ²	1087
Figura 10-38: Fluxo de processos para generalização por espécie de mangue até 100m ²	1087
Figura 10-39: Diferenças do produto vetorial final sem e com suavização.	1088
Figura 10-40: Mapeamento de meso resolução do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).	1089
Figura 10-41: Mapeamento de meso resolução do sistema costeiro de Soure (PA).	1090
Figura 10-42: Mapeamento de meso resolução da baía de Turiaçu (MA).	1091
Figura 10-43: Mapeamento de meso resolução do sistema costeiro de Sucuriçu (AP).	1092
Figura 10-44: Distribuição proporcional de classes por área de estudo.	1094
Figura 10-45: Distribuição absoluta por classe do mapeamento de cada uma das áreas.	1096
Figura 10-46: Mapeamento das florestas de mangue segundo a composição de espécies no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), em destaque área dominada por <i>Rhizophora</i> e <i>Avicennia</i>	1097
Figura 10-47: Distribuição relativa das classes no estuário de São Caetano de Odivelas (PA).	1097
Figura 10-48: Mapeamento das florestas de mangue segundo a composição de espécies na baía de Turiaçu (MA), em destaque uma área com ocorrência de <i>Avicennia</i> spp.	1099
Figura 10-49: Distribuição relativa das classes na baía de Turiaçu (MA).	1099
Figura 10-50: Mapeamento das florestas de mangue segundo a composição de espécies na vertente leste do sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA), em destaque área próxima a Soure com ocorrência das 4 (quatro) classes de vegetação.	1101
Figura 10-51: Mapeamento das florestas de mangue segundo a composição de espécies na vertente norte do sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA), em destaque área com concentração de florestas dominadas por <i>Rhizophora</i> spp.	1102
Figura 10-52: Distribuição relativa das classes no sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA).	1103
Figura 10-53: Mapeamento das florestas de mangue segundo a composição de espécies no sistema costeiro de Sucuriçu (AP), em destaque a distribuição de espécies próximo a Sucuriçu.	1104
Figura 10-54: Distribuição relativa das classes no sistema costeiro de Sucuriçu (AP).	1104
Figura 10-55: Mapeamento das faixas de altura do dossel das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA).	1107
Figura 10-56: Mapeamento das faixas de altura do dossel das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó, (PA).	1108

Figura 10-57: Mapeamento das faixas de altura do dossel das florestas de mangue na baía de Turiaçu (MA).	1109
Figura 10-58: Mapeamento das faixas de altura do dossel das florestas de mangue no sistema costeiro de Sucuriju (AP).	1110
Figura 10-59: Mapeamento de fitofisionomias dos manguezais do estuário de São Caetano de Odivelas (PA), em destaque exemplos da ocupação das fitofisionomias nas margens dos rios e no interior do continente. Rh: <i>Rhizophora</i> spp.; Av: <i>Avicennia</i> spp.	1112
Figura 10-60: Contribuição das fitofisionomias do manguezal no estuário de São Caetano de Odivelas (PA). Rh: <i>Rhizophora</i> spp.; Av: <i>Avicennia</i> spp.	1113
Figura 10-61: Mapeamento de fitofisionomias dos manguezais da baía de Turiaçu (MA), em destaque exemplos de ocupações das fitofisionomias. Rh: <i>Rhizophora</i> spp.; Av: <i>Avicennia</i> spp.	1115
Figura 10-62: Contribuição das fitofisionomias do manguezal na baía de Turiaçu (MA). Rh: <i>Rhizophora</i> spp.; Av: <i>Avicennia</i> spp.	1116
Figura 10-63: Mapeamento de fitofisionomias dos manguezais do sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA). Rh: <i>Rhizophora</i> spp.; Av: <i>Avicennia</i> spp.	1118
Figura 10-64: Contribuição das fitofisionomias do manguezal no sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA). Rh: <i>Rhizophora</i> spp.; Av: <i>Avicennia</i> spp.	1119
Figura 10-65: Mapeamento de fitofisionomias dos manguezais do sistema costeiro de Sucuriju (AP). Rh: <i>Rhizophora</i> spp.; Av: <i>Avicennia</i> spp.	1121
Figura 10-66: Contribuição das fitofisionomias do manguezal no sistema costeiro de Sucuriju (AP). Rh: <i>Rhizophora</i> spp.; Av: <i>Avicennia</i> spp.	1122
Figura 10-67: Contribuição (%) das classes de desenvolvimento estrutural (altura do dossel) para cada uma das áreas estudadas.	1123

Índice de Tabelas

Tabela 10-1: Índices Espectrais utilizados na modelagem.....	1064
Tabela 10-2: Descritores analisados para a elaboração da modelagem.....	1065
Tabela 10-3: Descritores e limiares usados na classificação da baía de Turiaçu (MA).....	1066
Tabela 10-4: Índices de vegetação utilizados na modelagem.....	1073
Tabela 10-5: Descritores e modelos adotados na classificação das imagens da baía de Turiaçu e do sistema costeiro de Soure.	1079
Tabela 10-6: Classes de composição de espécies e faixas de altura (definidas segundo o método de Quebras Naturais do ArcMap para cada uma das áreas de estudo. Av – <i>Avicennia</i> spp., Rh – <i>Rhizophora</i> spp.	1082
Tabela 10-7: Quantificação de classes por área analisada.	1093
Tabela 10-8: Quantitativos de áreas (km ²) de cada região mapeada.	1095
Tabela 10-9: Comparativo do número de polígonos antes e depois da generalização.	1105
Tabela 10-10: Área (km ²) ocupada pelas diferentes fitofisionomias (representadas pela composição de espécies e pelo desenvolvimento estrutural) para as quatro áreas de estudo.	1122

Lista de Abreviações e Siglas

Av	<i>Avicennia</i> spp.
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i> (Índice de Vegetação Realçado)
IIA	Índice de Identificação de Água
MDC	Modelo Digital de Copas
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo)
SCO	Estuário de São Caetano de Odivelas (PA)
SOU	Sistema Costeiro de Soure (PA)
SUC	Sistema Costeiro de Sucuriju (AP)
Rh	<i>Rhizophora</i> spp.
TUR	Baía de Turiaçu (MA)
USGS	<i>United States Geological Survey</i> (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

10. MAPEAMENTO DAS FITOSIONOMIAS DAS FLORESTAS DE MANGUE

O desenvolvimento e o aprimoramento de técnicas de monitoramento são essenciais para auxiliar e subsidiar estudos relacionados às florestas de mangue. A investigação desse ecossistema é realizada a partir de observações e coleta de dados, que podem ocorrer através de visitas a campo (*in situ*) e/ou a uma distância remota. Dentre vários métodos para a investigação remota, está a análise a partir de técnicas associadas às Geotecnologias, mais especificadamente ao Sensoriamento Remoto que possibilitam o apoio ao mapeamento das florestas.

O Sensoriamento Remoto foi definido pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) como a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de um objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro que não esteja em contato físico ou íntimo com o objeto ou fenômeno em estudo (JENSEN, 2011). A observação remota do fenômeno se realiza a partir de uma base ou plataforma terrestre, suborbital (em um avião ou drone), ou orbital (em um satélite ou nave espacial), gerando dados especializados de medições e imagens digitais.

Segundo INPE (2006), a imagem digital é uma função bidimensional, adquirida através da leitura de sensores, que registra a intensidade de energia refletida ou emitida em cada porção reduzida do espaço, que será traduzida em um pixel. Os sensores remotos são definidos a partir de diferentes resoluções (espaciais, espectrais, temporais e radiométricas), cujas diferenças técnicas são refletidas nas características de suas imagens. Em outras palavras, como cada sensor remoto é único, possuindo uma combinação específica quanto à sensibilidade em cada uma das resoluções, a imagem gerada pelo processamento de seus dados irá refletir tais características.

A resolução espacial está relacionada à área mínima medida pelo sensor, representada pelo pixel, e quanto maior é esta área menor é a resolução espacial. A resolução espectral está relacionada ao número e à largura dos intervalos de comprimentos de ondas contíguos (denominados bandas ou canais) no espectro eletromagnético, aos quais o sensor é sensível (JENSEN, 2011). Quanto maior o número de bandas, maior a resolução espectral.

A varredura de um satélite em determinado local da superfície terrestre segue uma determinada periodicidade, sendo esse período regular e definidor da resolução temporal de um sistema orbital. Por último, mas não menos importante, tem-se a resolução radiométrica que, segundo INPE (2006), está associada à sensibilidade do sensor em distinguir os níveis de intensidade do sinal de retorno. Logo, quanto maior número de níveis de cinza (NC) a serem representados, maior a capacidade de diferenciação de respostas.

Conforme mencionado, cada resolução influencia como será a imagem gerada, que por sua vez é resultado do processamento dos dados medidos na superfície terrestre. O que se mede, nesse caso, é a energia refletida (ou emitida, no caso da energia termal) pelos diversos alvos da superfície terrestre. Cada alvo possui um determinado comportamento e característica frente à energia radiante, chama-se isso de assinatura espectral (Figura 10-1), é ela que permite a distinção dos objetos (INPE, 2006).

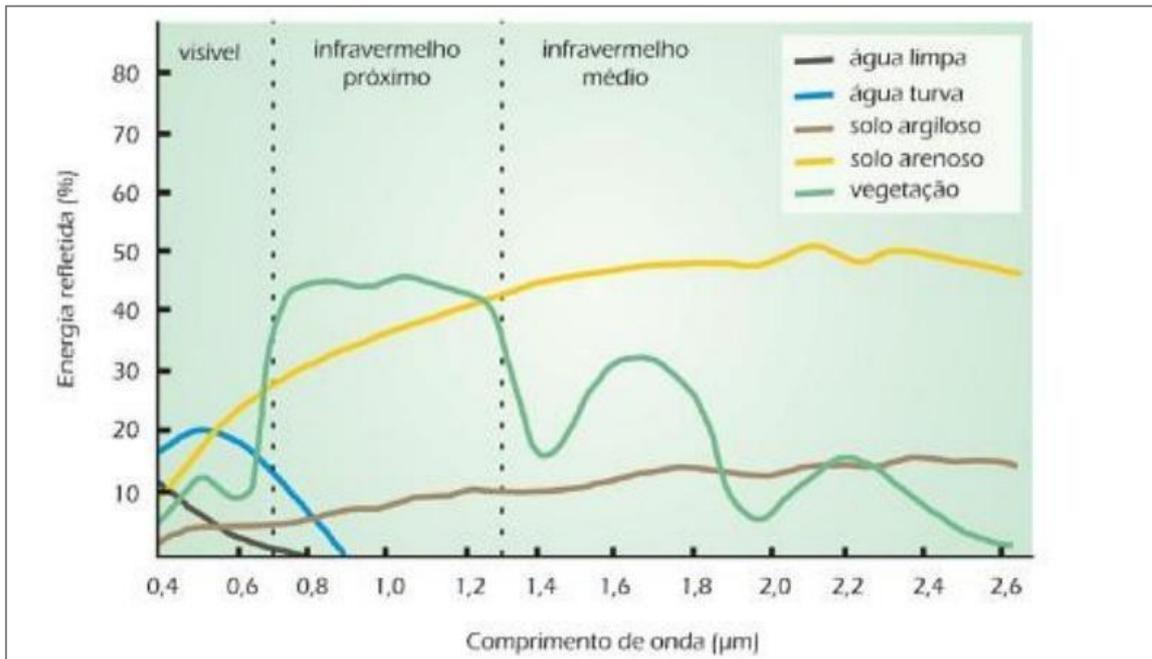


Figura 10-1: Exemplo de assinatura espectral de objetos na superfície terrestre. Fonte: adaptado de Florenzano (2007).

Em relação à resolução espacial, por exemplo, no início das atividades de classificação de imagens, as opções de imagens de satélite restringiam-se a baixa ou média resolução (70 a 30 metros de resolução espacial). Atualmente, existem sensores que fornecem imagens com melhor resolução espacial, como os do SPOT (5,0 m), Ikonos (1,0 m) e alguns submétricos, como o *GeoEye* e o *Worldview*.

Há quase cinco décadas, a partir de dados ópticos orbitais, técnicas de classificação de imagens de satélite são adotadas para o desenvolvimento de mapas temáticos utilizados para os mais diferentes fins. Desde então, as técnicas de processamento e classificação vêm avançando sistematicamente.

A classificação é o processo de levar para o pixel um código associado a um item de legenda, ou classe, dando significado às suas propriedades numéricas frente a um processo interpretativo. Mais detalhadamente, a classificação é o reconhecimento de padrões e objetos homogêneos, que constituirão uma única classe de objetos na legenda (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). Todas as várias técnicas de classificação existentes, de forma geral, auxiliam no entendimento e "tradução" das imagens em produtos que permitam e auxiliem ações e análises específicas.

O uso das geotecnologias contribui imensamente para estudos integrados, pois possibilita ampliar a abrangência da área de estudo, complementando análises ecológicas (como as de estrutura vegetal) realizadas através de dados coletados *in situ*. Esta abordagem, aplicada ao estudo em desenvolvimento, permite que através desse esforço interdisciplinar, as informações da estrutura das florestas de mangue (coletadas em campo) possam ser extrapoladas para uma área maior ao serem correlacionadas com informações disponibilizadas pela interpretação das imagens e, assim, servirem de base para a elaboração de mapas temáticos em escala de paisagem.

Em relação ao mapeamento de áreas cobertas por florestas de mangue, Kuenzer *et al.* (2011) apresentaram uma análise crítica de estudos de sensoriamento remoto desenvolvidos em manguezais nas últimas décadas. Os autores mostraram que esse ecossistema vem sendo bastante estudado, utilizando

para isso, imagens provenientes de diferentes sensores. Os estudos de Sensoriamento Remoto em manguezais propiciam informações importantes para: i) inventários de habitats (determinação de extensão, composição e *status* de saúde; ii) detecção de mudança e monitoramento; iii) suporte à avaliação do ecossistema; iv) estimativa de biomassa; v) estimativa da capacidade de regeneração; vi) gerenciamento multidisciplinar; vii) planejamento de atividades de campo; viii) avaliação da qualidade da água; ix) fornecimento rápido de informações para gerenciamento de desastres e; x) auxílio na melhor compreensão das relações e processos ecológicos e biológicos, funções e dinâmica.

A grande dificuldade, entretanto, é que a maioria dos estudos que analisam os manguezais a partir de técnicas de sensoriamento remoto utiliza as imagens simplesmente como ferramentas para a determinação da área da floresta como um todo. Buscam delimitar as áreas de mangue, diferenciando-as do entorno, não focando na diferenciação das fitofisionomias que caracterizam essas florestas. A abordagem considerando todo o complexo de manguezais como uma floresta homogênea pode ser, eventualmente, insuficiente para se estudar e compreender a situação e as características que definirão a sua vulnerabilidade. Kuenzer *et al.* (2011) apontaram que ainda são relativamente poucos os estudos com uso de imagens de alta resolução para investigar vários aspectos do ecossistema manguezal, dentre eles a discriminação de gêneros ou espécies.

O ecossistema em estudo – o manguezal – por possuir uma forte relação com a morfologia e a dinâmica costeira, conforme demonstrado nos inúmeros estudos que tratam da classificação e caracterização de florestas de mangue, remete ainda ao desafio de encontrar métodos capazes de detectar os diferentes tipos fitofisionômicos. Assim, o mapeamento detalhado de manguezais é um dos desafios de alta complexidade no sensoriamento remoto, porque o sinal detectado remotamente desses ecossistemas é formado por vários componentes e é influenciado por um grande número de outros parâmetros (KUENZER *et al.*, *op. cit.*).

Para as análises de sensoriamento remoto em manguezais, é interessante primeiro considerar a assinatura espectral da vegetação e suas características. Como qualquer outro elemento presente na superfície terrestre, a vegetação tem uma assinatura espectral própria, apresentando comportamento distinto ao longo do espectro eletromagnético, sendo sua curva espectral a mais amplamente estudada na literatura (JONES; VAUGHAN, 2010; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; FONSECA; FERNANDES, 2004; NOVO, 2010 e JENSEN, 2011) (Figura 10-2).

É importante destacar que a curva do comportamento espectral é uma média de respostas de diferentes coberturas vegetais, incluindo as gramíneas (JONES; VAUGHAN, 2010). Além disso, a maioria das medições é realizada em florestas não tropicais, o que indica a necessidade de mais investigações para estes ambientes de maior diversidade, tanto em termos biológicos quanto geográficos. Condições relacionadas à umidade nas áreas mais estudadas, por exemplo, é completamente diferente das florestas presentes nos biomas brasileiros, que por si só, apresentam peculiaridades próprias.

Observando a curva apresentada na Figura 10-2, pode-se perceber que dentro da faixa do visível (0,4 a 0,7 μ m), a maior reflectância (ponto mais elevado da curva) ocorre no intervalo do verde (setor intermediário), com menores valores no azul e no vermelho. Nessa faixa do espectro as características que mais influenciam a reflectância são os pigmentos foliares (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Assim, o baixo valor de reflectância seria em função da absorção desses comprimentos de onda pela clorofila presente

nas folhas, em virtude da atividade fotossintética. Desta forma, quanto menos sadia (ou mais estressada) for a vegetação, menor será a reflectância registrada, já que menor será sua concentração de pigmentos.

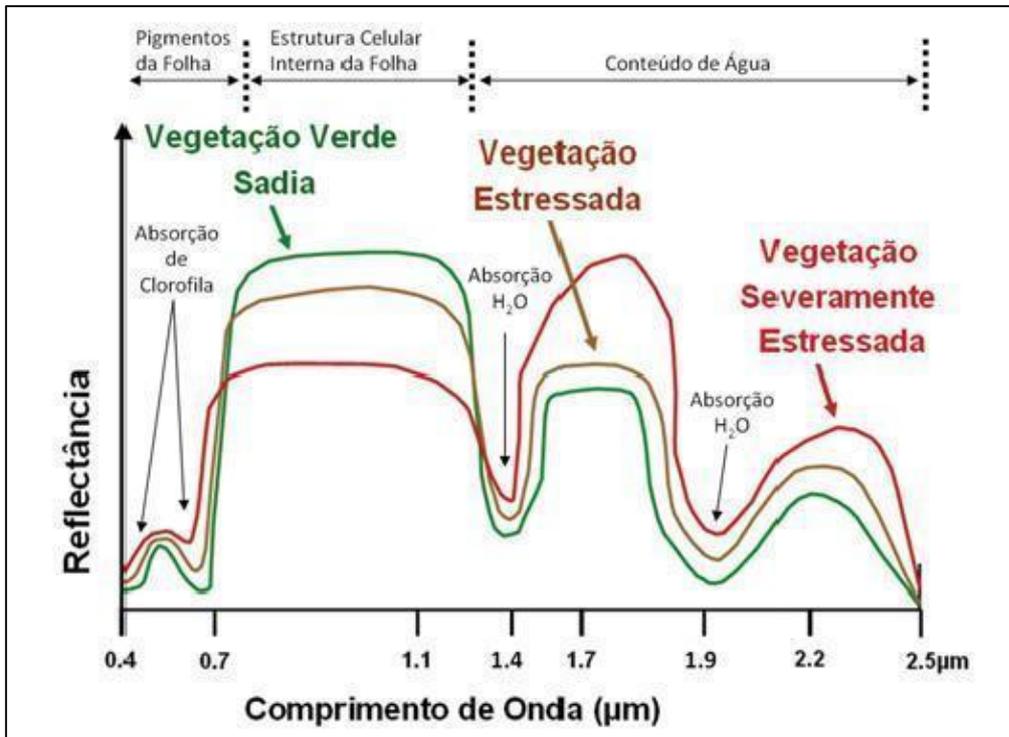


Figura 10-2: Curvas espectrais da vegetação. Fonte: Souza Filho (2008).

Na faixa do infravermelho próximo (de 0,7 a 1,1 µm), é a estrutura celular interna da folha que influencia na quantidade de ondas refletidas. Nesse intervalo do espectro, quanto mais sadia for a folha, maior a reflectância. Essa relação se inverte na faixa do infravermelho médio (valores maiores que 1,3 µm, no gráfico). Nessa faixa, quanto mais estressada estiver a vegetação, maior sua reflectância. Isso porque quanto maior a quantidade de água, maior a atividade de absorção dessas ondas. De maneira mais sucinta, pode-se dizer que quanto maior for a densidade da cobertura vegetal, menor a reflectância na região do visível e maior na região do infravermelho próximo (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

Em relação à caracterização de gêneros ou espécies vegetais que compõem o ecossistema manguezal através da assinatura espectral, alguns estudos apoiados em experimentos em laboratório (medições por espectrorradiômetro) descrevem diferenciações entre gêneros e espécies vegetais características do ecossistema.

Medições em folhas de mangue no Vietnã identificaram diferenças entre espécimes dos gêneros *Avicennia* e *Rhizophora* (Figura 10-3), onde as folhas de *Avicennia* apresentaram reflectância maior, ou seja, uma resposta mais clara (KUENZER *et al.*, 2011).

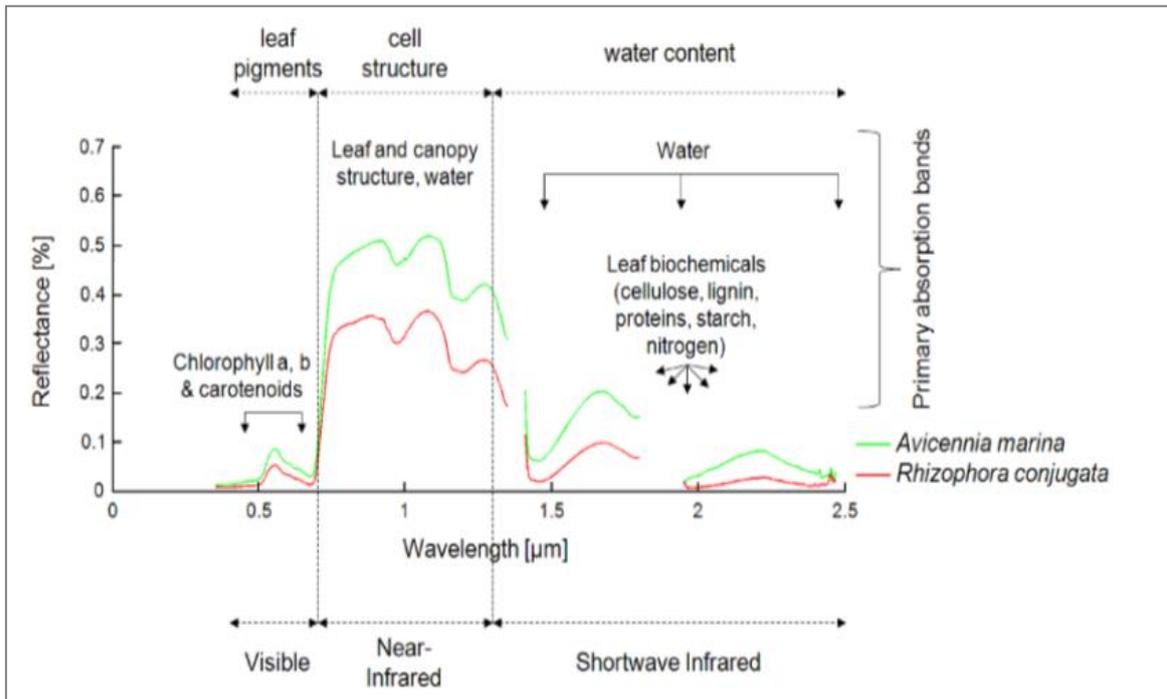


Figura 10-3: Assinatura espectral de folhas de *Avicennia* e *Rhizophora*. Fonte: Kuenzer *et al.* (2011).

Uma reflectância maior para *Avicennia* também foi percebida por Wang e Sousa (2009) que estudaram o comportamento espectral das espécies *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* e *Rhizophora* spp. (Figura 10-4). Esses autores descrevem que em folhas verdes e saudáveis, *Avicennia germinans* teria a maior reflectância, com cerca de 0.7 na região do infravermelho. *Laguncularia racemosa* e *Rhizophora* spp. teriam valores muito semelhantes no infravermelho e diferentes no infravermelho próximo.

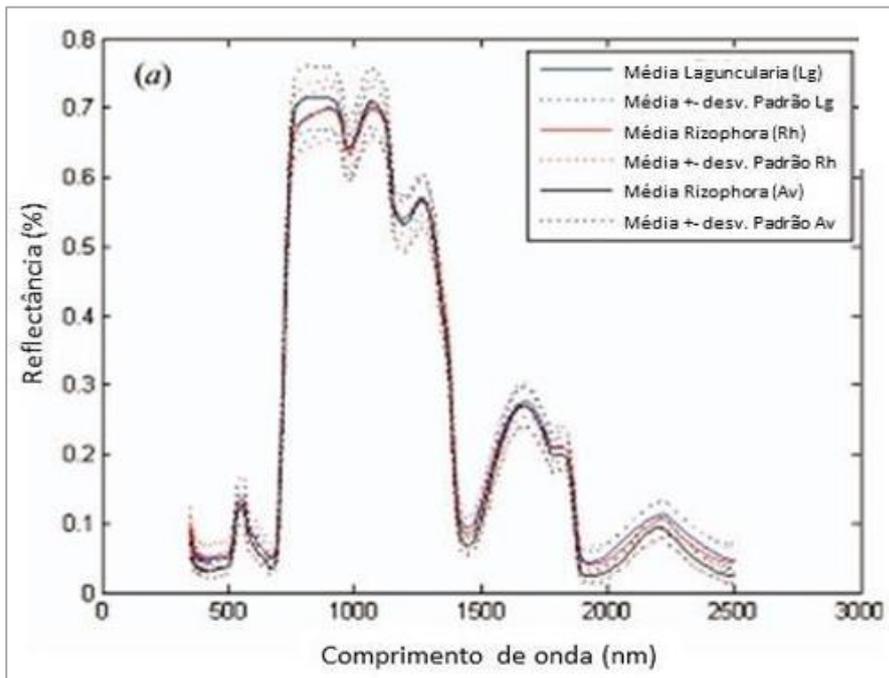


Figura 10-4: Comportamento espectral de folhas de espécies de mangue segundo Wang e Souza (2009). Fonte: Wang & Souza (2009).

Em Blasco *et al.* (1998), os resultados foram diferentes. As observações realizadas indicaram que *Rhizophora* apresentava valores maiores que *Avicennia* na faixa do infravermelho próximo (Figura 10-5).

No Brasil, Rebelo-Mochell & Ponzoni (2007) encontraram comportamentos semelhantes aos descritos por Wang & Sousa (2009), com *Avicennia* apresentando reflectância superior a *Rhizophora*, na faixa do infravermelho próximo. Na faixa do visível, a reflectância de *Avicennia* se apresenta igual ou superior à de *Rhizophora*, assim como descrito por Blasco *et al.* (1998) (Figura 10-6).

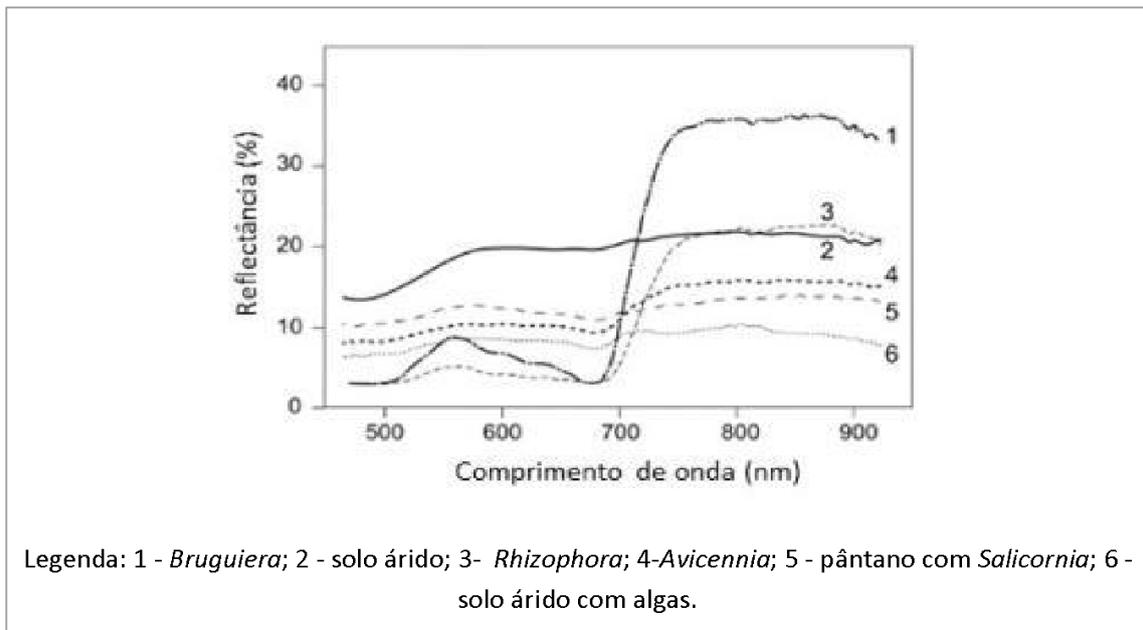


Figura 10-5: Comportamento espectral de folhas de espécies de mangue e outras legendas, segundo Blasco (1998).

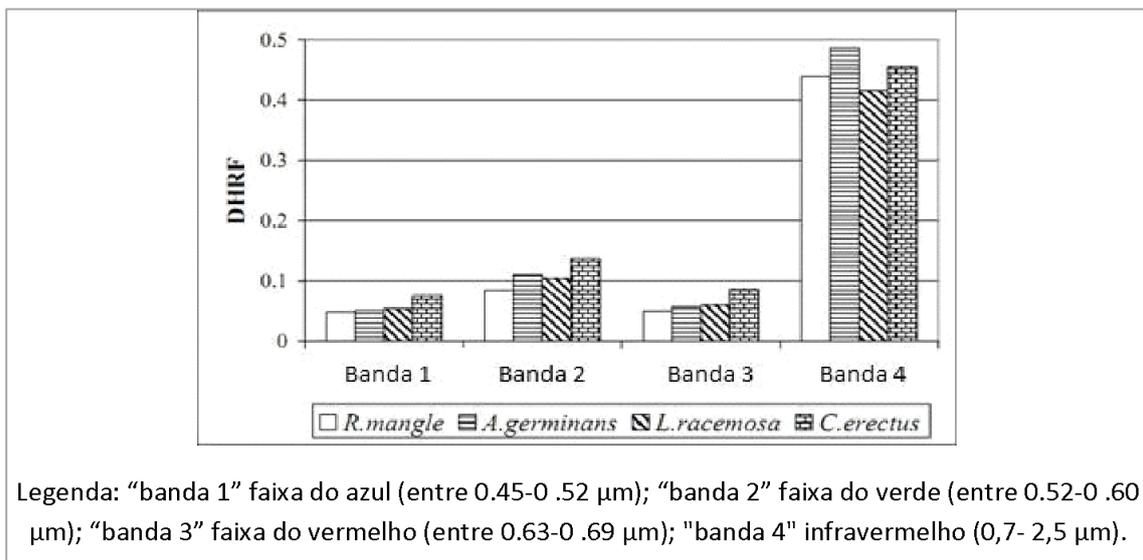


Figura 10-6: Comportamento espectral de folhas de espécies de mangue segundo Rebelo-Mochell e Ponzoni (2007).

Muitos autores apontam uma maior reflectância para as folhas de *Avicennia* (RAMSEYIII e JENSEN, 1996; REBELO-MOCHELL e PONZONI, 2007; WANG e SOUSA, 2009; KUENZER *et al.*, 2011), o que possibilita a

diferenciação de gêneros e espécies no mapeamento de manguezais. Essa análise de diferenciação dos gêneros e espécies é muito importante para auxílio nos estudos de vulnerabilidade.

A aplicação do sensoriamento remoto se mostra, portanto, com grande potencial para os estudos florestais desse ecossistema. Mas não é apenas o aspecto foliar e da vegetação (composição química, estrutura vegetal e densidade) que influenciam na medida espectral realizada pelo sensor, mas também a angulação do sol e as características do solo ou do que se encontra adjacente e abaixo das copas.

A Figura 10-7 apresenta um esquema do imageamento de uma área florestada. Conforme mencionado, a arquitetura formada pelo posicionamento da fonte de iluminação e do sensor interferem no resultado, fazendo com que se tenha uma parte da copa da árvore iluminada e outra sombreada, gerando diferenças espectrais. Todas essas feições espectralmente distintas (copa iluminada, copa sombreada, solo sombreado, solo iluminado) se integram na representação. O grande desafio passa a ser encontrar um padrão através dessa mistura espectral, de forma a possibilitar a sua identificação e classificação, subsidiando os estudos de manguezais.

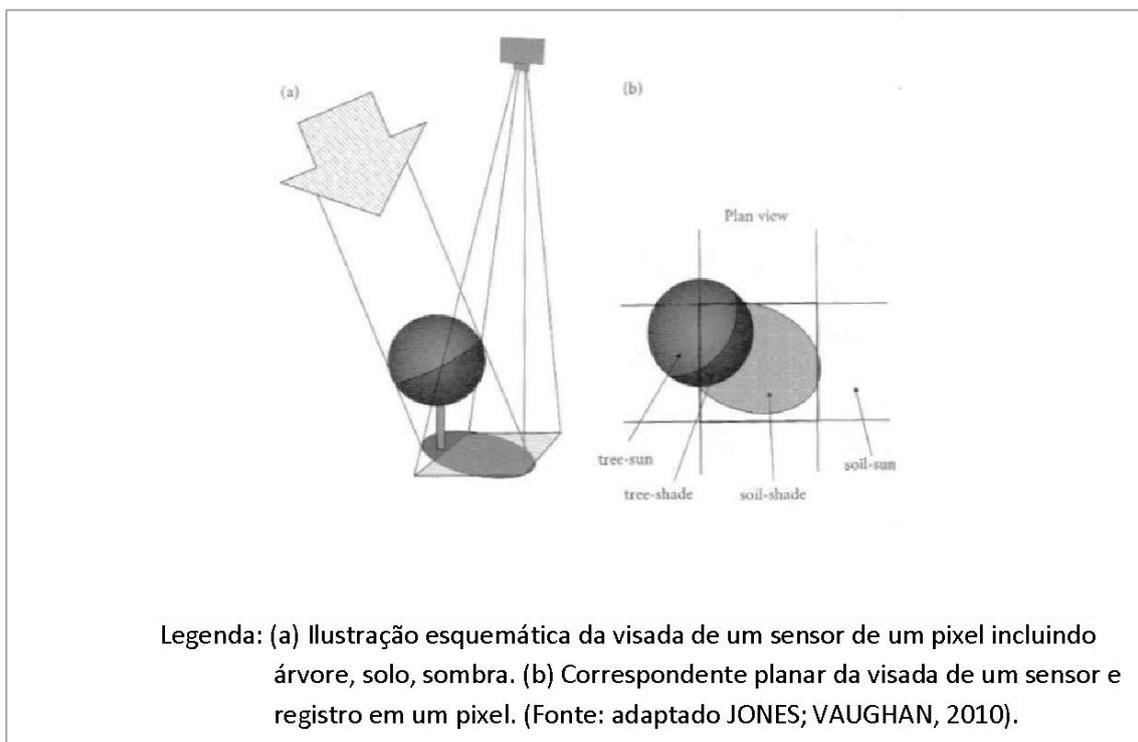


Figura 10-7: Ilustração da visada de um sensor.

Embora se saiba que os tipos fisiográficos apresentam respostas espectrais distintas, um método preciso para a conjunção entre estudos ecológicos e sua eficaz diferenciação em imagens de satélite ainda carece de mais investigações e, só assim, a análise da vulnerabilidade desse ecossistema poderá ser expandida para grandes áreas.

Nos estudos de manguezais, além da composição de espécies, são necessários outros dados, como topografia local, estrutura da floresta e identificação da presença de sub-bosques para caracterizar uma floresta de mangue. Nem todas essas informações podem ser extraídas das imagens orbitais, os esforços de caracterização dessas florestas, para além da identificação florística – gêneros ou espécies, necessitam

da utilização complementar de dados provenientes de outros sensores, como o Laser ou o Radar e, obviamente, dados de campo.

Kuenzer *et al.* (2011) relatam que além das imagens orbitais (de média e alta resolução), o estudo de sensoriamento remoto em manguezais ainda compreendem as análises a partir de fotografias aéreas, dados hiperespectrais e métodos baseados em dados de Radar. Os autores apontam ainda que "existem muitos dados de sensoriamento remoto que são promissores para a pesquisa em sensoriamento remoto em manguezais, mas eles não foram devidamente explorados (ou seja, as publicações disponíveis são escassas)". Dentre eles, os mapeamentos e análises baseados em LiDAR podem auxiliar na análise dos resultados dos mapeamentos de manguezais. Isto, porque esses dados podem fornecer a elevação do terreno e a altura das árvores, complementando os mapeamentos a partir de imagens orbitais. Desta forma, as abordagens multitudes e multisensores podem melhor identificar as características dos ecossistemas, permitindo avançar no desafio de determinar a caracterização e gerar mapeamentos em escala de paisagem.

O mapeamento digital, no âmbito do presente estudo, possui cinco etapas bem definidas: i) ações que subsidiam o trabalho de campo (ver Capítulo 11); ii) identificação e mapeamento das espécies mangue; iii) dados da altura das árvores, fornecidos por LiDAR (ver Capítulo 5); iv) identificação e mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue; e; v) a determinação da vulnerabilidade propriamente dita, ao contribuir com bases de dados espacializados de detalhe para o mapeamento da suscetibilidade, sensibilidade e resiliência e sua integração para a determinação da vulnerabilidade (ver Volume 1).

Recortes espaciais representativos das quatro áreas de florestas de mangue estudadas no âmbito da região que compreende a zona costeira associada às bacias da Foz do Amazonas e Pará-Maranhão foram selecionadas para a geração do mapeamento digital. Assim, de modo a compreender os ecossistemas da região optou-se por uma abordagem multiescalar de análise. As etapas relacionadas ao mapeamento digital e a utilização de sensores remotos deu-se em três escalas de análise em cada uma das áreas de estudo, conforme apresentado na Figura 10-8.

NÍVEIS DE ANÁLISE	ZONA COSTEIRA ASSOCIADA ÀS BACIAS DA FOZ DO AMAZONAS E PARÁ-MARANHÃO	
		<p>ÁREAS DA COSTA DELIMITADAS PARA ANÁLISE</p>
<p>1 <i>Mesoescala</i></p>		<p>SETORES DA COSTA DELIMITADOS A PARTIR DE ATRIBUTOS FÍSICOS PARA MAPEAMENTO DOS LIMITES DA FLORESTA</p>
<p>2 <i>Alta Resolução</i></p>		<p>ÁREAS DE INTERESSE PARA MAPEAMENTO DAS DIFERENTES FISIONOMIAS</p>
<p>3 <i>LIDAR</i></p>		<p>ÁREAS DELIMITADAS PARA LEVANTAMENTO DE LIDAR E ANÁLISE TOPOGRÁFICA</p>

Figura 10-8- Níveis de Classificação do Manguezal adotados no presente estudo.

As análises para o mapeamento de alta resolução das florestas de mangue e para o mapeamento dos estratos de altura das florestas foram realizadas de maneira interdisciplinar entre as equipes de campo e de sensoriamento remoto. Assim, de modo a compreender os ecossistemas da região optou-se por uma abordagem de análise multiescalar e multisensor que abrange o mapeamento em meso resolução realizado preliminarmente, o mapeamento em alta resolução das espécies de mangue e o mapeamento do desenvolvimento estrutural utilizando de forma integrada os dados gerados pelo levantamento LiDAR e as imagens de alta resolução.

10.1. Objetivos

- Contribuir metodologicamente para o mapeamento das espécies de mangue através de modelagem do conhecimento apoiada em GEOBIA;
- Identificar e mapear as fitofisionomias de mangue através da integração de dados de sensoriamento remoto (imagens de sensor passivo de alta resolução e MDC oriundo do levantamento por LiDAR) e dados de campo.

10.2. Metodologia

Por se tratar de um projeto de inovação e pesquisa, a solução metodológica para geração de produtos e análises dos resultados frente às demandas traçadas, teve que ser elaborada e testada ao longo de toda sua construção. Assim, o processo metodológico inicialmente apresentado nos relatórios anteriores e proposto para o estuário de São Caetano de Odivelas – SCO (primeira área de estudo), foi sendo ajustado continuamente, em resposta, dentre outros fatores, à incorporação das particularidades das demais áreas. As principais alterações metodológicas realizadas nesse processo de construção do conhecimento se

referiram ao mapeamento de espécies de mangue. O presente relatório busca sintetizar a metodologia final estabelecida para o alcance dos objetivos delineados, apresentando justificativas para os ajustes efetuados.

Outra complexidade típica de projetos desta natureza, que envolvem inovação, é a delimitação clara entre metodologia e resultados, dado que os caminhos propostos também fazem parte dos resultados gerados na pesquisa. Assim, para facilitar a compreensão dos processos e análise dos resultados, optou-se por manter a estrutura clássica dos relatórios e projetos de pesquisa, mantendo todas as questões definidoras dos processos adotados neste item, referente à metodologia. Uma apresentação dos resultados será realizada nos itens 10.3 (mapeamentos em meso resolução), 10.4 (mapeamentos das espécies de mangue) e 10.5 (mapeamentos das fitofisionomias das florestas de mangue), a seguir.

Como será apresentado no Capítulo 11 deste relatório - Caracterização das fitofisionomias que compõem as florestas de mangue da Costa Equatorial Brasileira - a espacialização das fitofisionomias é fruto do esforço conjunto dos grupos de pesquisa de Estudos de Ecologia de Manguezais e de Sensoriamento Remoto. No Capítulo 11, será apresentado o fluxograma geral que mostra de forma sucinta essa integração, que optamos por resgatar na Figura 10-9. Nele, as atividades apresentadas, integralmente ou parcialmente, na coluna azul são de responsabilidade (total ou parcial) da equipe de Sensoriamento Remoto. Essas etapas serão detalhadas a seguir, assim como seus respectivos resultados.

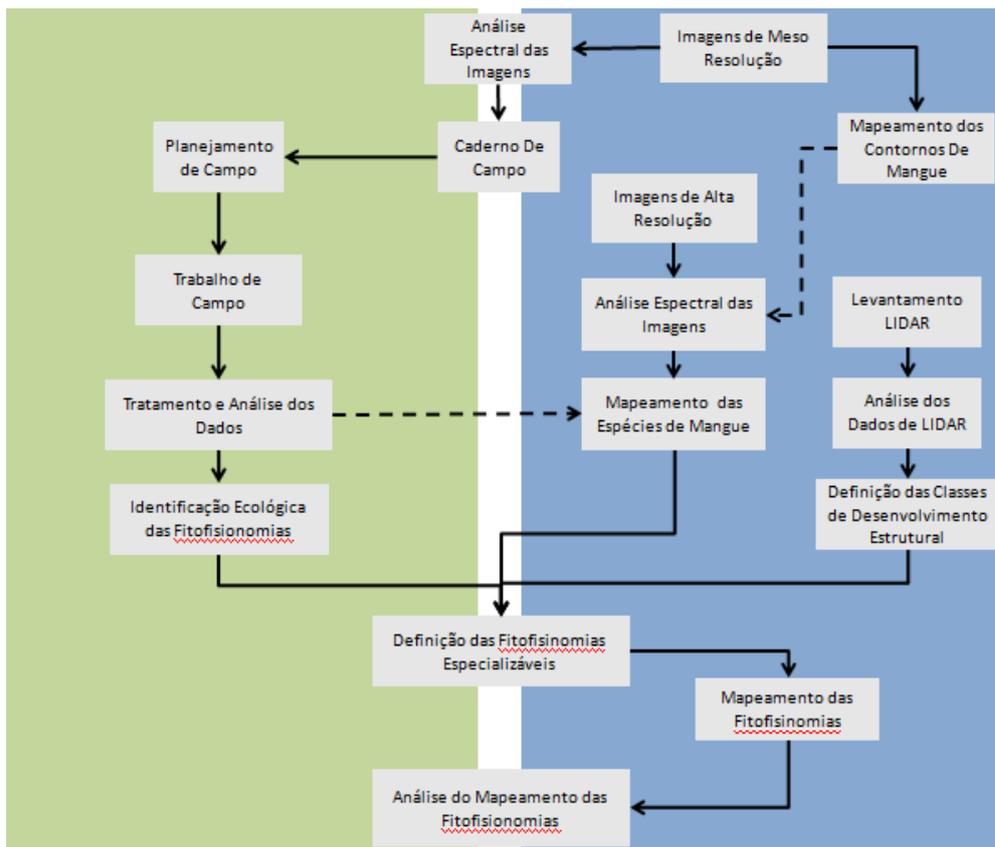


Figura 10-9- Fluxograma geral para o Mapeamento de Fitofisionomias, na coluna azul as atividades sob responsabilidade do Laboratório ESPAÇO.

10.2.1. Meso resolução

A classificação de imagens de sensoriamento remoto, apesar de ser uma tarefa antiga, iniciada de forma integralmente visual, exige muitos conhecimentos sobre os princípios físicos que norteiam a caracterização espectral de alvos, assim como sobre os fenômenos e objetos de interesse.

Com a evolução computacional, este procedimento foi sendo incrementado com a automatização gradual de alguns processos. Desde os anos 80, começou-se a incorporar o conceito de regiões homogêneas (ou manchas) em substituição aos pixels, como objetos de interesse para a classificação. Somente no início dos anos 2000 que uma proposta surgida na Alemanha trouxe o conceito de classificação orientada a objetos geográficos (GEOBIA¹), que envolvia o desafio de automatizar critérios baseados em conhecimento, de forma similar ao processo usado em uma interpretação visual.

Apesar de surgir, especificamente, para atender à complexidade da classificação de imagens de alta resolução (que apareceram ao final dos anos 90), desde então tem-se o registro de experiências em que tal técnica foi aplicada com êxito a imagens de meso resolução (ALMEIDA *et al.*, 2020; CRUZ *et al.*, 2007; CRUZ *et al.*, 2009; MOREIRA *et al.* 2015) para o mapeamento em escalas regionais.

Dentre tantos desafios no uso de imagens de sensoriamento remoto para fins de mapeamento da cobertura e uso da terra, a caracterização da cobertura florestal é, sem dúvida, foco de muitos esforços da comunidade científica. A complexidade do mapeamento fica maior, quanto menos conhecido, em termos espectrais, é o ecossistema. E este é o caso dos manguezais.

A dificuldade de se mapear esse ecossistema vem de suas características particulares, onde a interface entre o mar e a porção continental faz com que a variabilidade de respostas espectrais das florestas seja grande. Além disso, poucos são os estudos que caracterizam espectralmente as espécies típicas de manguezais, sendo ainda menos comuns as contribuições que trazem informações sobre as distintas fisionomias da floresta.

Para satisfazer aos desafios da interpretação de imagens de sensores remotos foram necessárias concepções inovadoras orientadas não somente para os clássicos níveis de cinza. Assim, buscou-se formas de se considerar critérios relacionados à forma, tamanho, contexto e relações de vizinhança, características igualmente importantes na classificação de determinadas coberturas (SCHIEWE; TUFTE, 2007). O GEOBIA se configurou, desta forma, numa tentativa de mudança conceitual neste sentido. Além de possibilitar o uso de critérios de diferentes naturezas, não só os relacionados às cores e tonalidades percebidas nas imagens, trouxe outros elementos similares ao modo que nosso cérebro funciona em um processo interpretativo. Complementarmente, permitiu o uso de modelagem matemática *fuzzy* (lógica “nebulosa”) para se trabalhar melhor com as incertezas do conhecimento.

São dois os caminhos clássicos que podem estar associados ao uso do GEOBIA: a modelagem do conhecimento e a descoberta do conhecimento. A primeira opção é indicada quando se tem um conhecimento prévio dos elementos descritores dos fenômenos ou objetos a serem mapeados. Ou seja, o esforço passa a ser o da tradução deste conhecimento em um modelo matemático que possa ser descrito

¹Geographic Object- Based Image Analysis

no sistema. Este caminho é o mais exigente em relação à experiência prévia do especialista no tema a ser tratado.

Benz *et al.* (2004) destacam que os principais requisitos para o processo de extração de informações nesses sistemas são: (1) compreensão das características do sensor, (2) compreensão das escalas de análise adequadas e sua combinação, (3) identificação de contexto típico e dependências hierárquicas e (4) consideração das incertezas inerentes de todo o sistema de extração de informação, iniciando-se pelo sensor e culminando nos conceitos *fuzzy* para as informações solicitadas.

A segunda opção, a descoberta do conhecimento, é também chamada de mineração de dados ou *Data Mining*. Este caminho tem sido adotado nos casos em que o volume de dados é muito grande e a filtragem destes dados em termos de relevância para explicar determinado fenômeno necessita de recursos automatizados. Este contexto se justifica pelos constantes avanços na área da Tecnologia da Informação que têm viabilizado o armazenamento de grandes e múltiplas bases de dados. Desta forma, passou a ser imprescindível o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem de forma automática e inteligente na tarefa de analisar, interpretar e relacionar esses dados, para que se possa desenvolver e selecionar estratégias de ação em cada contexto de aplicação (GOLDSCHMIDT; PASSOS, 2005). Em resumo, a mineração de dados refere-se à extração ou "mineração" do conhecimento em grandes quantidades de dados (CARVALHO *et al.*, 2015).

O mapeamento em mesoresolução das 4 áreas de interesse no presente projeto, além de auxiliar na análise de contexto em apoio aos trabalhos de campo (descrito no item 10 deste relatório), também apoiou os primeiros testes metodológicos para escolha do melhor caminho para a classificação. Mais uma vez o estuário de São Caetano de Odivelas foi a área piloto de experimentação, passando pelos dois processos: a modelagem do conhecimento e a mineração de dados. Os resultados obtidos apontaram para uma melhor performance da modelagem do conhecimento, provavelmente pela experiência prévia da equipe de Sensoriamento Remoto em mapeamentos diversos de ambientes florestais e, especificamente, de manguezais.

10.2.1.1. Mapeamento das áreas de Mangue em meso resolução

Em atendimento à necessidade dos testes metodológicos preliminares, foi necessário estruturar um esforço de investigação inicial para determinação dos modelos de classificação das espécies de mangue. Esses esforços foram apoiados em metodologia GEOBIA, e consideraram a integração com a caracterização das estações visitadas em campo. A proposta final metodológica foi adequada para o mapeamento em alta resolução.

O processo investigativo, relacionado à resposta espectral e ocupação espacial do ecossistema manguezal, se deu a partir dos mapeamentos das florestas através de imagens de mesoresolução, que apoiaram a investigação dos padrões de sua distribuição nas quatro áreas.

Como o objetivo principal era apoiar a compreensão dos contornos florestais, seus diferentes padrões e contextualização frente ao entorno, o mapeamento de meso resolução foi realizado considerando recortes um pouco maiores, quando necessário, que os adotados no mapeamento de espécies de mangue em escala de maior detalhe. Essa estratégia foi adotada porque as imagens utilizadas, cujas resoluções são apresentadas no item 10 do presente relatório, são disponibilizadas de forma gratuita.

Definiu-se a escala de 1:50.000 para o mapeamento final em mesoresolução. Não houve preocupação em se identificar as diferentes espécies de mangue neste produto, mas sim uma melhor delimitação desse ecossistema nas 4 áreas. Os resultados obtidos neste mapeamento, ao final, foram confrontados com o mapeamento da cobertura e uso da terra de toda a bacia de forma a garantir coerência entre os dois mapeamentos.

Os recortes adotados não sofreram diferenciação quanto à nomenclatura (Figura 10-10), sendo igualmente denominados: i) estuário de São Caetano de Odivelas (PA) - SCO (Figura 10-11); ii) sistema costeiro de Soure (PA) - SOU, Ilha de Marajó (Figura 10-12); iii) baía de Turiaçu (MA) - TUR (Figura 10-13) e iv) sistema costeiro de Sucuriçu (AP) - SUC (Figura 10-14).

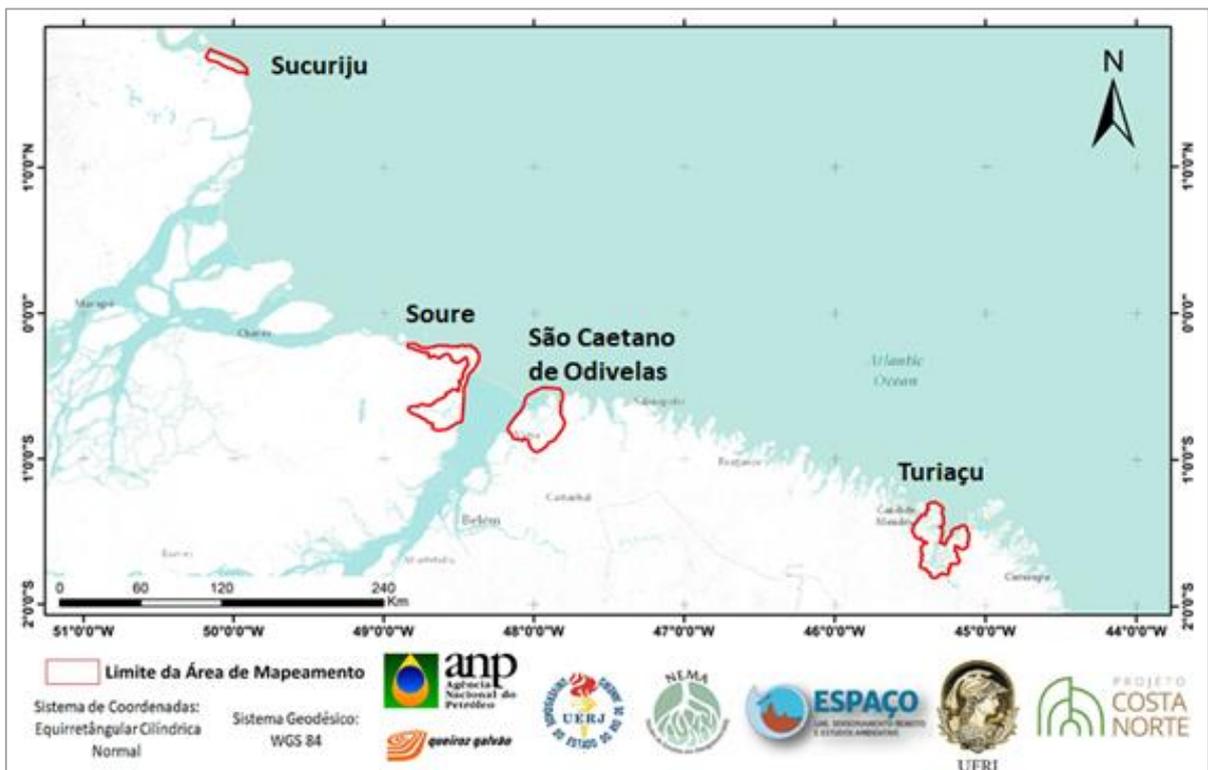


Figura 10-10: Recorte referente às áreas de mapeamento de meso resolução.

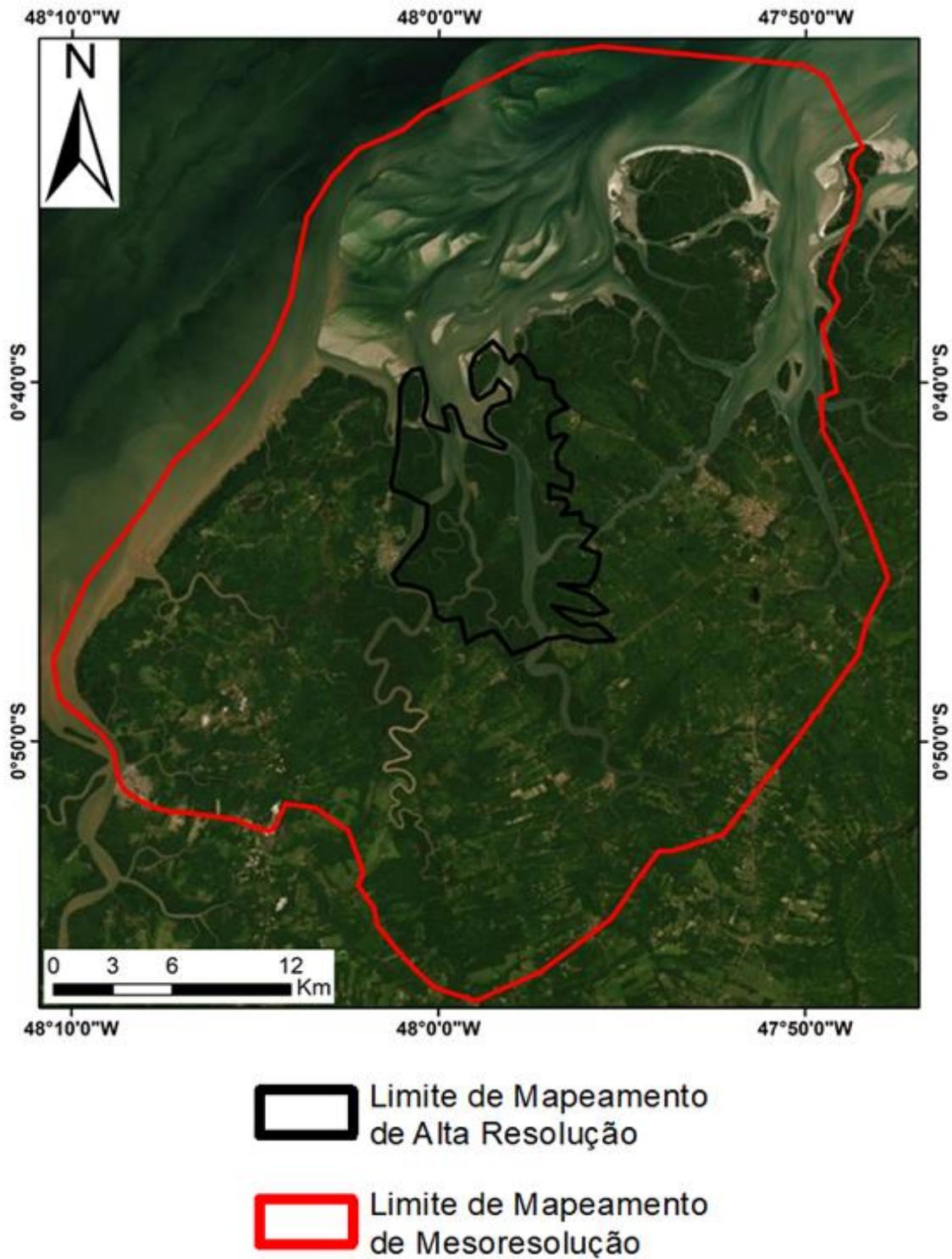


Figura 10-11: Recorte de meso resolução referente à área que compreende o estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

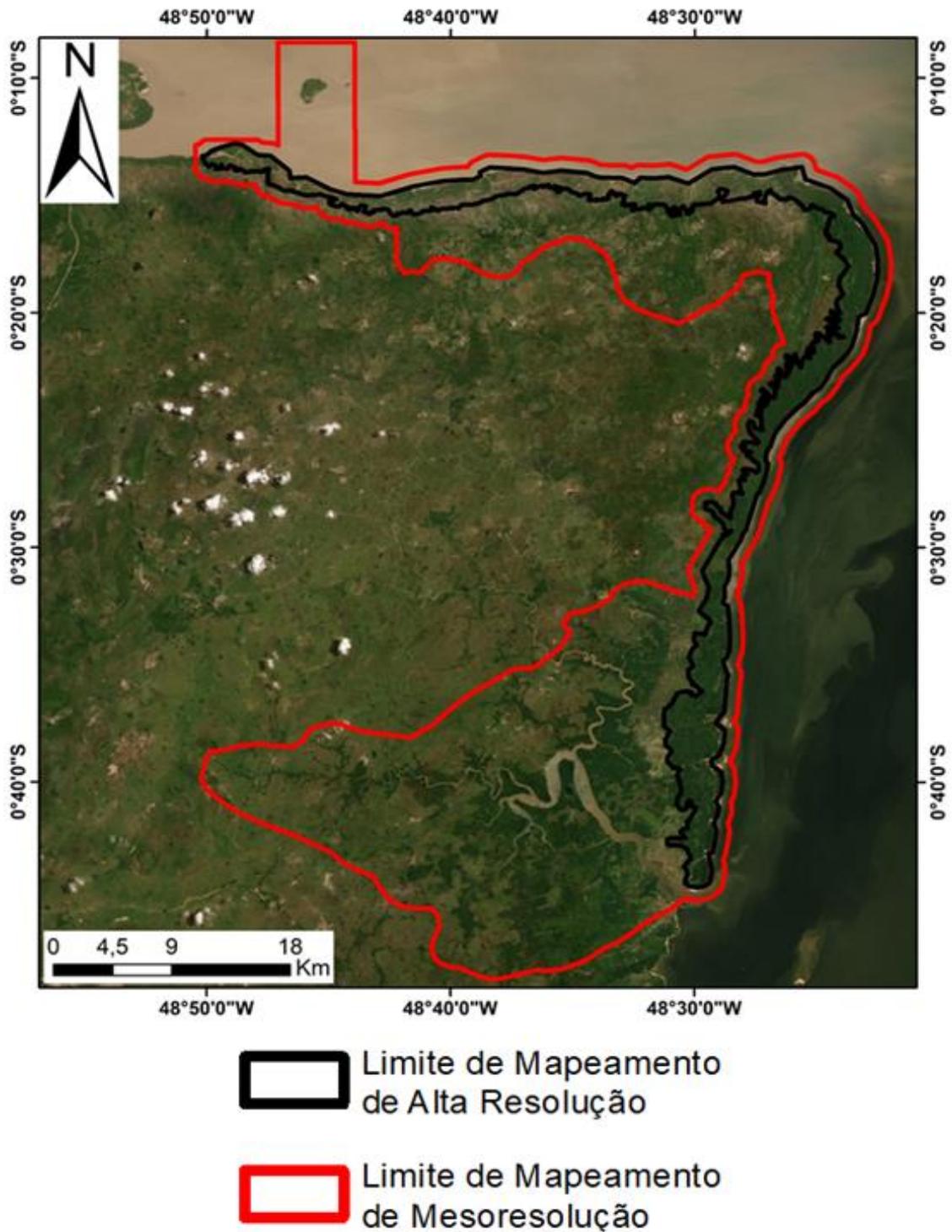


Figura 10-12: Recorte de meso resolução referente à área que compreende o sistema costeiro de Soure, na Ilha de Marajó (PA).

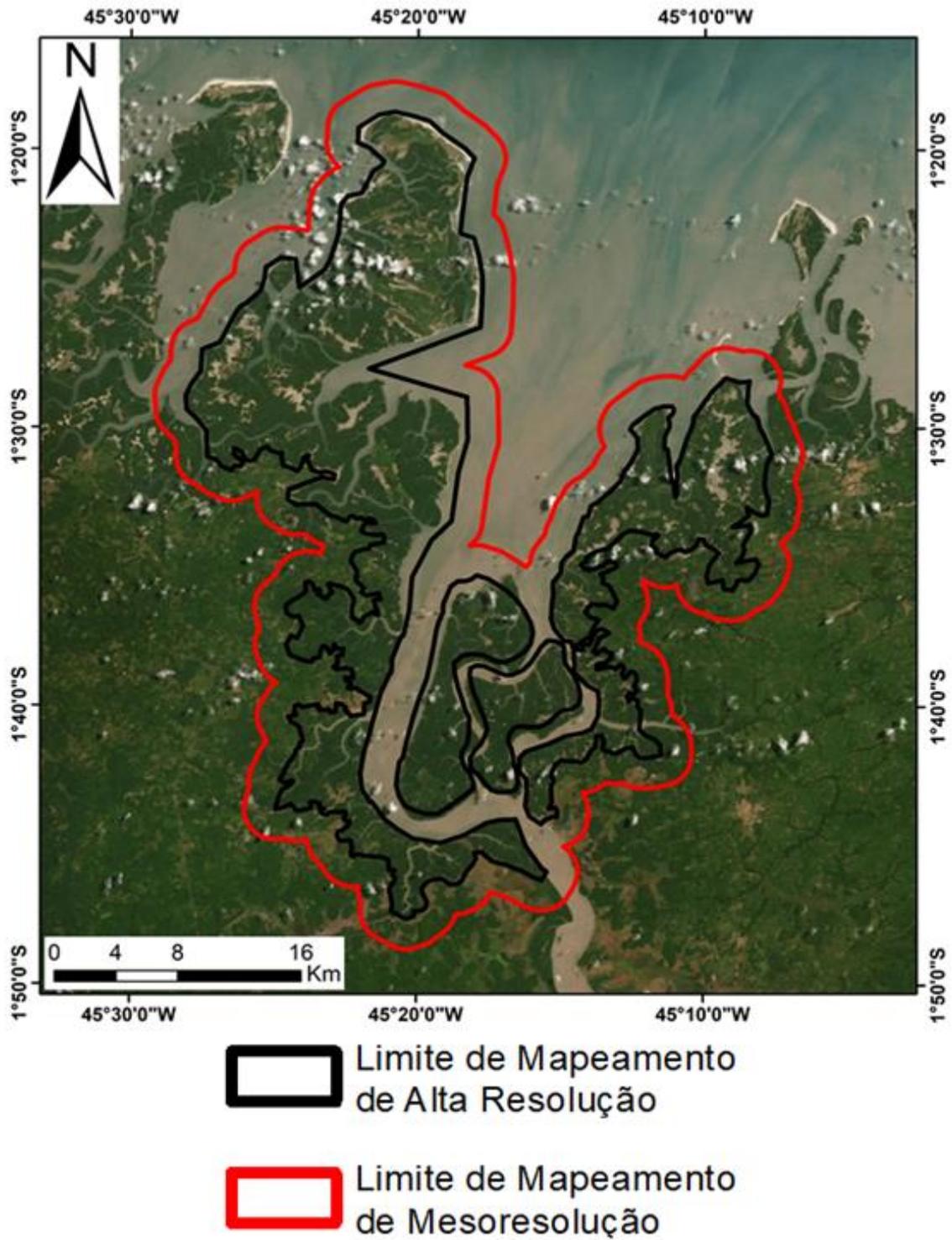


Figura 10-13: Recorte de meso resolução referente à área que compreende a baía de Turiaçu (MA).



Figura 10-14: Recorte de meso resolução referente à área que compreende o sistema costeiro de Sucuriçu (AP).

Os processos e métodos utilizados para o mapeamento meso resolução se encontram dispostos na Figura 10-15, indo desde a Aquisição de Imagens, passando pelo entendimento do contexto e fisionomias das florestas de mangue, até o produto final. A Figura expõe também como os resultados gerados aqui apoiam etapas posteriores envolvendo a modelagem de alta resolução das espécies de mangue.

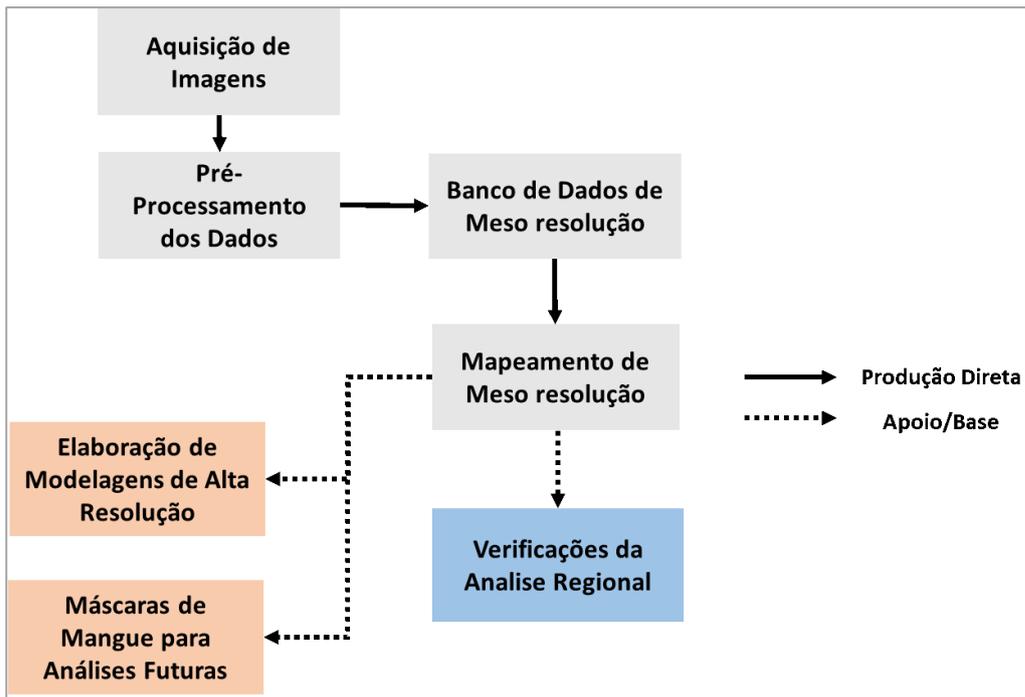


Figura 10-15: Fluxograma de atividades para o mapeamento em meso resolução.

Para cada área foi estruturada uma base de dados (KIT) composta por imagens de diferentes sensores orbitais como Landsat, ALOS PALSAR, SENTINEL-1 e SENTINEL-2 e o modelo digital de elevação SRTM. A metodologia aplicada teve que ser adaptada para particularidades encontradas em cada área. Assim, a seleção das imagens e dos métodos de classificação empregados, variou para cada área.

As descrições dos dados utilizados são apresentadas a seguir:

- Imagens **Landsat 8 (Sensor OLI)**, com resolução de 30 m e imagens no espectro visível e variações do infravermelho. Esses dados formam o mosaico em menor escala, mas que alcança um maior detalhamento espectral, usado integralmente no mapeamento. Ano-Base 2017±1. Fonte: USGS - *United States Geological Survey* .
- Imagens **Sentinel2 (S2A)**, com resoluções entre de 10 m e 20 m e imagens no espectro visível e variações do infravermelho. Foram adquiridas imagens de várias datas, formando mosaicos para alcançar um maior detalhamento espectral, também usado integralmente no mapeamento. Ano-base 2018±1. Fonte: USGS.
- Os dados **SAR** (radar) são oriundos dos sensores SAR do satélite Sentinel-1 e PALSAR, do ALOS. As imagens SAR/Sentinel-1 são geradas em banda C (~5 cm de comprimento de onda), e foram obtidas no modo de imageamento *Interferometric Wide Swath*, em *Ground-Range (IW-GRD)*, com resolução espacial nominal de 10 m. As imagens ALOS/PALSAR são obtidas em banda L (~23 cm de resolução espacial), no modo de imageamento *Fine Beam Dual (FBD)* e no nível de processamento *Hi-Res Terrain Corrected*. Essas imagens são importantes, pois não sofrem interferência da cobertura de nuvens e apresentam padrões diferentes das imagens ópticas, usadas dessa forma no mapeamento nas áreas com muitas coberturas de nuvem nas outras imagens orbitais e também em áreas de dúvidas. Ano-Base 2017±1.

- Modelo **SRTM**, com resolução de 30m, foi usado para caracterização do relevo na elaboração de indicadores para mapeamento. Ano-Base 2000. Fonte: USGS.

A definição prévia das classes a serem mapeadas é um fator de grande relevância para qualquer tipo de mapeamento, pois é nessa etapa que são definidas e caracterizadas espectralmente as classes do mapa final. Esse mapeamento foi realizado considerando 5 classes: Mangue, Área Urbana, Água, Mangue Dúvida² e não-mangue, essa última, como descrito na figura, se relaciona a coberturas múltiplas não compreendidas nas outras classes. A descrição dessas classes está exposta na chave de identificação (Figura 10-16), como dito, para padronizar o entendimento e consideração sobre cada uma das classes.

² A classe temporária Mangue dúvida foi definida para que pudesse ser confirmada, a posteriori, com dados de campo.

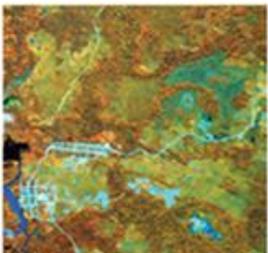
Imagem <i>RapidEye</i>			
Classe	Descrição	Falsa Cor (RGB 543)	Cor Verdadeira (RGB 321)
Mangue	Textura homogênea Presença de clareiras/gaps Proximidade com corpos hídricos Tons vermelhos/verdes escuros		
Área Urbana	Tons azuis e brancos muito saturados Presença de estradas, ruas e outros padrões urbanos Textura rugosa		
Água	Tons azulados (claros ou escuros), em geral com presença de manchas esbranquiçadas associadas às plumas de sedimento em suspensão		
Mangue Dúvida (a ser confirmado em campo)	Textura menos homogênea que a classe Mangue Tonalidades claras e escuras se alternando Presença de gramíneas e outros tipos de vegetação		
Não Mangue	Presença de cultivos, estradas e outros alvos associados à Terra Firme Tonalidades e texturas variadas		

Figura 10-16: Ilustração da ficha de interpretação para meso resolução com caracterização das classes do mapeamento

Após a aquisição dos dados utilizados e a definição e caracterização das classes a serem mapeadas, foi realizado o pré-processamento das imagens. Florenzano (2012) define o pré-processamento como o tratamento preliminar de dados brutos, com a finalidade de calibrar a radiometria da imagem, atenuar os efeitos da atmosfera, remover ruídos e corrigir suas distorções geométricas. Em síntese, o pré-processamento, que é a etapa preliminar do Processamento Digital de Imagens, tem como finalidade resolver problemas gerais da imagem e facilitar assim o uso dessas para análises e processamentos posteriores.

O pré-processamento realizado nessa parte da pesquisa envolveu a correção radiométrica das imagens SAR, adequando-as ao processo de classificação, dado que os produtos disponibilizados pelos fornecedores não possibilitam o seu uso direto e integrado com outros tipos de dados.

Além da correção radiométrica, realizou-se também uma análise geométrica de todas as imagens para entender as condições do georreferenciamento (absoluto e relativo). Analisou-se, desta forma, a qualidade geométrica da imagem em relação ao terreno - a exatidão de posicionamento - e também entre as imagens utilizadas, relacionada ao “encaixe” espacial relativo entre as mesmas.

Para geração do mapeamento, foi criado um projeto no software *eCognitionDeveloper* com todos os dados que constituem o KIT descrito, dando-se início à modelagem da classificação com apoio de GEOBIA. Todas as etapas que envolvem esse processo podem ser observadas na Figura 10-17. A modelagem do conhecimento foi construída através de testes empíricos apoiados em amostras de cada uma das áreas de estudo.

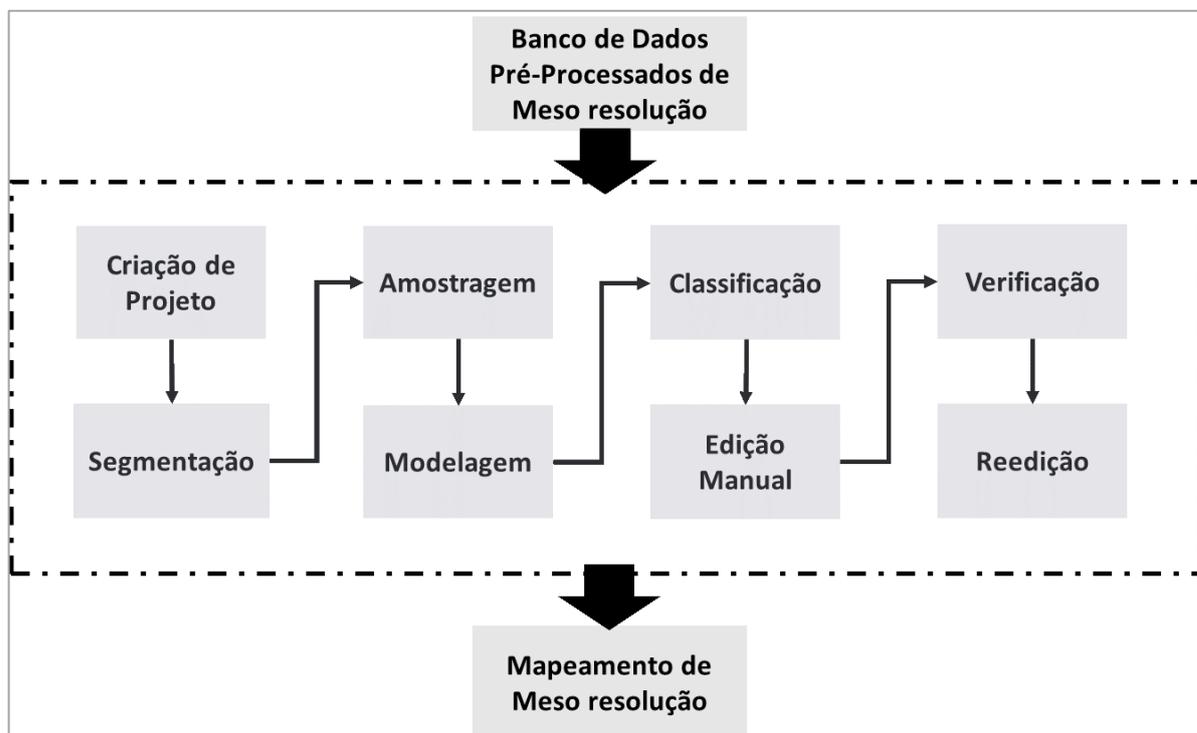


Figura 10-17: Fluxograma de Processos de Classificação de Meso resolução

Também se buscou uma melhor estrutura de segmentação de objetos em apoio à classificação. Foram realizados testes para definição do melhor parâmetro de escala a ser adotado, definidor do detalhamento

do mapa. A segmentação faz com que os pixels sejam agrupados em segmentos maiores (os objetos), que são formados com base na resposta espectral e na forma. Os tamanhos e contornos dos segmentos são tentativas de agrupamento dentro de uma escala representativa do fenômeno que se pretende mapear. Quando o objetivo é o mapeamento de florestas de mangue, recomenda-se a busca por limiares que delimitem, inicialmente, segmentos maiores, de forma a separar esse ecossistema de ambientes adjacentes, como água e planícies hipersalinas. Por outro lado, quando o objetivo é a diferenciação do interior da floresta (o que apresentaremos no mapeamento de alta resolução), o desejável é que se tenha segmentos menores que possibilitem a delimitação de áreas homogêneas no interior das florestas, em resposta às diferentes dominâncias de espécies. Tal parâmetro é ainda sensível à imagem utilizada e sua respectiva resolução espacial, por isso a necessidade de testes, caso a caso. Para o mapeamento de mesoresolução, definiu-se o valor 100 para parâmetro de escala, considerando as imagens SENTINEL 2, as com maior resolução do conjunto de dados adotado. Esses valores foram replicados para todas as áreas de estudo.

Para se chegar às classes finais do mapeamento, foram necessários alguns arranjos metodológicos comuns em GEOBIA. Elaborou-se assim uma árvore hierárquica com um conjunto maior de classes, de forma a facilitar a melhor delimitação das classes de interesse, reduzindo confusões e auxiliando no processo de modelagem. Os níveis hierárquicos apresentados na Figura 10-18 mostram a divisão adotada neste processo de modelagem. Ressalta-se que os modelos adotados no nível superior são herdados pelo nível abaixo, isto significa que a estrutura hierárquica adotada permite a identificação das classes por níveis. A árvore hierárquica elaborada separou inicialmente os corpos d'água (água & continente). A seguir, separou as áreas continentais em as áreas verdes e não verdes, e só no último nível hierárquico identificou as classes-chave do mapeamento.

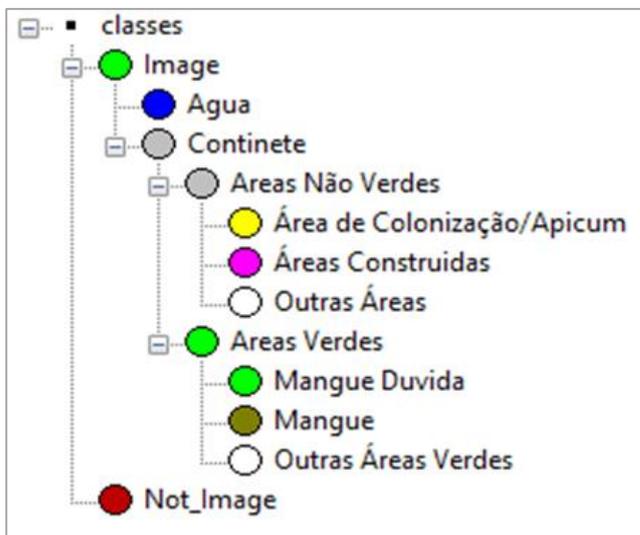


Figura 10-18: Hierarquia de classes do mapeamento de Meso resolução.

O processo complexo de definição de uma hierarquia de classes se mistura com a modelagem em si, pois a sinergia desses dois procedimentos é fundamental para a definição do melhor caminho para a classificação. Ou seja, a modelagem é dependente dessa estrutura de níveis e ambas têm que ser adequadas para a melhor discriminação de classes.

Com a segmentação estabelecida e a estrutura de níveis definida, iniciou-se a etapa de treinamento, responsável pela atribuição de amostras à cada classe nó (ou folha) da rede hierárquica. A análise desse conjunto amostral envolvendo todas as classes do mapeamento serviu de base para a seleção de descritores e modelos representativos para cada classe mãe ou filha. Assim, coletaram-se amostras para as classes água, áreas de colonização e apicum, áreas construídas, mangue e outras áreas verdes. A classes outros, por ser uma classe de exclusão em relação às demais classes, compreendendo várias coberturas com resposta espectral diversa, não foi amostrada. Isso também ocorreu com a classe mangue dúvida, utilizada primeiramente para facilitar a modelagem e o processo de edição, sendo posteriormente identificada como áreas onde existiam, além de espécies de mangue, herbáceas. No mapeamento final, acabou sendo denominada Herbáceas com presença de mangue.

Além das bandas das imagens foram gerados outros índices espectrais, calculados no próprio sistema. Esses índices espectrais são razões entre bandas, popularmente chamados de índices de vegetação, e tem como intuito, segundo FONSECA e FERNANDES (2004): i) realçar certos aspectos que permitam a discriminação de alguns alvos; e ii) minimizar efeitos indesejáveis nas radiâncias dos alvos.

Os índices selecionados se justificam por estarem relacionados ao fenômeno em análise, tendo respaldo na literatura que aponta o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) como o mais adotado nos estudos de manguezais (RAMSEY *et al.*, 1996; GREEN *et al.*, 1997; BLASCO *et al.*, 1998; KOVACS *et al.*, 2004; MAHMOUND *et al.*, 2007; GIRI *et al.*, 2007; SETO *et al.*, 2007; MUTTITANON & TRIPATHI, 2005; KAMTHONKIAT *et al.*, 2011 e SATYANARAYAMA *et al.*, 2011). A Tabela 10-1: Índices Espectrais utilizados na modelagem. apresenta o modelo matemático dos índices utilizados no mapeamento da meso resolução.

Além do NDVI, foram utilizados ainda o brilho das bandas (somatório dos valores de todas as bandas por pixel, calculado automaticamente pelo *eCognitionDeveloper*®) e um índice próprio para a diferenciação da água, denominado por IIA (Índice de Identificação de Água).

Tabela 10-1: Índices Espectrais utilizados na modelagem.

SIGLA	NOME	FÓRMULA	CARACTERÍSTICAS
NDVI	Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$	Bom para monitorar mudanças sazonais e interanuais da vegetação; Sensível a variações do substrato sob o dossel (Altos valores com substratos escuros); Responde a quantidade de Biomassa Verde
IIA	Índice de Identificação de Água	$IIA = \frac{\rho_{blue} - \rho_{nir}}{\rho_{blue} + \rho_{nir}}$	Sensível à presença de água.

Legenda: ρ_{green} = valor de reflectância na faixa do verde, ρ_{blue} = valor de reflectância na faixa do azul;; ρ_{nir} = valor de reflectância na faixa do Infravermelho Próximo e; ρ_{red} = valor de reflectância na faixa do Vermelho.

Com todos os índices gerados para a imagem Sentinel-2, as bandas espectrais e o brilho de todos os sensores, estruturou-se o conjunto de descritores a disposição do processo de modelagem, conforme apresentado na Tabela 10-2.

Tabela 10-2: Descritores analisados para a elaboração da modelagem.

Sensor	Bandas/Produtos
ALOS - PALSAR	Banda 1 - <i>HH</i>
	Banda 2 - <i>VV</i>
LANDSAT 8 - OLI	Banda 5 - <i>Infravermelho Próximo</i>
	Banda 6 - <i>Infravermelho de Ondas Curtas 01</i>
	Banda 7 - <i>Infravermelho de Ondas Curtas 02</i>
Sentinel 2A (S2A) - MSI	Banda 2 - <i>Azul</i>
	Banda 3 - <i>Verde</i>
	Banda 4 - <i>Vermelho</i>
	Banda 8 - <i>Infravermelho Próximo</i>
	IIA
	NDVI
SRTM	Altitude

Para a separação dos corpos d'água e áreas continentais utilizou-se o IIA, índice especificamente criado para esta finalidade no contexto deste projeto. Com este descritor foi possível separar toda a parte oceânica, além dos rios e canais. Os limiares utilizados para a classificação foram ajustados para cada área de estudo. Para classes em um mesmo nível hierárquico é comum a utilização do modelo complementar NOT, para as classes menos homogêneas. Neste caso, este foi o recurso adotado como modelo da classe Áreas Continentais.

Na modelagem das classes “Áreas verdes” e “Áreas Não Verdes”, optou-se pela definição de um modelo caracterizador das Áreas verdes, enquanto as Áreas não verdes foram associadas ao modelo NOT. O descritor adotado foi o NDVI. No último nível hierárquico, com as classes de maior complexidade para separação, foram realizados vários testes com os descritores definidos e, na maioria dos casos, foi necessária a combinação de descritores para a caracterização de cada classe.

Para o mapeamento das áreas de mangue, no contexto das Áreas Verdes, dois descritores combinados foram aplicados: i), a Banda 1 do ALOS-PALSAR e; ii) o SRTM, usado para delimitar o compartimento de relevo associado às áreas baixas. Isso confirma que as imagens orbitais, quando usadas sozinhas, apresentam maior dificuldade para a identificação das áreas de manguezal. Os limiares parametrizados foram ajustados para cada área. Esses mesmos descritores, com limiares diferentes, também foram

aplicados para classificar as demais áreas verdes. A classe temporária Mangue Dúvida foi por fim definida como a classe complementar (NOT).

No contexto das Áreas não verdes, têm-se as áreas de sedimentos expostos, áreas construídas e outras áreas. Para a modelagem dessas classes foram utilizados descritores diferentes entre as classes. A classe “sedimentos expostos” foi modelada a partir dos descritores SRTM e brilho, devido a ser constituída de áreas baixas e que refletem muito espectralmente (mais claras). As áreas construídas foram modeladas a partir da Banda 1 do ALOS e também do brilho e, por fim, a classe referente às outras áreas foi considerada como complementar (NOT).

Todos os modelos foram adaptados de acordo com a área de estudo, assim, os limiares de classificação apresentam pequenas diferenças de uma área para outra em virtude das particularidades encontradas. Importante destacar que os descritores, de forma geral, se mantiveram os mesmos. Atítulo de exemplo, a Tabela 10-3 apresenta os descritores e limiares usados na modelagem da área da baía de Turiaçu (MA).

Tabela 10-3: Descritores e limiares usados na classificação da baía de Turiaçu (MA).

Hierarquia da Classe	Classes	Descritores	Limiares	Método de Classificação
1	Image	Banda 2, 3, 4 e 8 das imagens Sentinel 2	≤ 0	<i>Boleano</i>
	Not_Image	NOTImage	-	<i>Boleano</i>
2	Água	IIA (Índice de Identificação de Água)	> 0	<i>Boleano</i>
	Continente	NOTÁgua	-	<i>Boleano</i>
3	Áreas Verdes	NDVI	$> 0,38$	<i>Boleano</i>
	Áreas Não Verdes	NOT Áreas Verdes	-	<i>Boleano</i>
4	Sedimentos Expostos	Brilho	> 1000	<i>Fuzzy</i>
		SRTM	< 2	<i>Fuzzy</i>
	Áreas Construídas	Brilho	> 1000	<i>Fuzzy</i>
		ALOS - PALSAR - Banda 1	$> 0,3$	<i>Fuzzy</i>
	Outras Áreas	NOTSedimentos Expostos e NOT Áreas Construídas	-	<i>Fuzzy</i>
	Mangue	SRTM	< 5	<i>Fuzzy</i>
		ALOS - PALSAR - Banda 1	$> 0,12$	<i>Fuzzy</i>
Mangue Dúvida	NOTSedimentos Expostos e NOT Áreas Construídas	-	<i>Fuzzy</i>	
Outras Áreas Verdes	ALOS - PALSAR - Banda 1	$< 0,07$	<i>Fuzzy</i>	

O processo de classificação baseado na modelagem do conhecimento não responde por 100% do produto final acabado, sendo necessária ainda uma etapa de edição manual para correção de algumas inconsistências. A etapa de edição necessita que o intérprete tenha experiência tanto espectral quanto ecológica na identificação de alvos e, para reduzir subjetividades é comum que se tenha pelo menos dois processos de edição ao final, uma sequencial à modelagem e outra pós-campo.

Após a etapa de edição, é realizado o agrupamento de classes de forma a se ressaltar apenas as classes de interesse. Durante este processo, algumas alterações das classes definidas previamente se fizeram necessárias: i) o reconhecimento e alteração do nome da classe “mangue dúvida” para “Vegetação Herbácea com Presença de Mangue”, por caracterizar, como o próprio nome diz, áreas de mangue misturadas a outras coberturas vegetais herbáceas e; ii) o agrupamento das duas classes referentes a outras coberturas (vegetadas e não vegetadas) em uma única classe.

Para definição do mapeamento final aplicou-se ainda um filtro objetivando a eliminação de pequenos ruídos presentes na classificação. Os modelos e limiares adotados nessa fase serviram de base de conhecimento para a classificação baseada em imagens de alta resolução. A máscara das áreas de mangue, obtida neste mapeamento para cada área de estudo, ajudou ainda na redução de esforços na classificação em maior escala e na validação do mapeamento de menor escala, alvos do presente estudo.

Cabe destacar que o mapeamento em meso resolução foi desenvolvido por duas equipes embasadas nos mesmos processos: as classificações das áreas do estuário de São Caetano de Odivelas, sistema costeiro de Soure e baía de Turiaçu foram realizadas pela equipe do laboratório ESPAÇO/UFRJ, enquanto a área do sistema costeiro de Sucuriju foi desenvolvida pela equipe do IEPA.

10.2.2. Altaresolução

Para ilustrar a evolução metodológica de todo processo adotado no mapeamento de alta resolução são apresentados os procedimentos inicial e consolidado aplicados ao projeto. O fluxograma da Figura 10-19 apresenta as etapas empregadas especificamente para o estuário de São Caetano de Odivelas, primeira área de estudo mapeada e na qual inúmeros testes foram realizados. A Figura 10-20, por outro lado, apresenta a metodologia consolidada no âmbito desse projeto e que foi aplicada às demais áreas. Por questão de praticidade, os exemplos apresentados para as etapas realizadas se até às áreas do sistema costeiro de Soure e baía de Turiaçu; a primeira, por apresentar particularidades no tipo e distribuição da cobertura vegetal, o que demandou cuidados especiais; e, a segunda, por ser a maior e última área que foi mapeada.

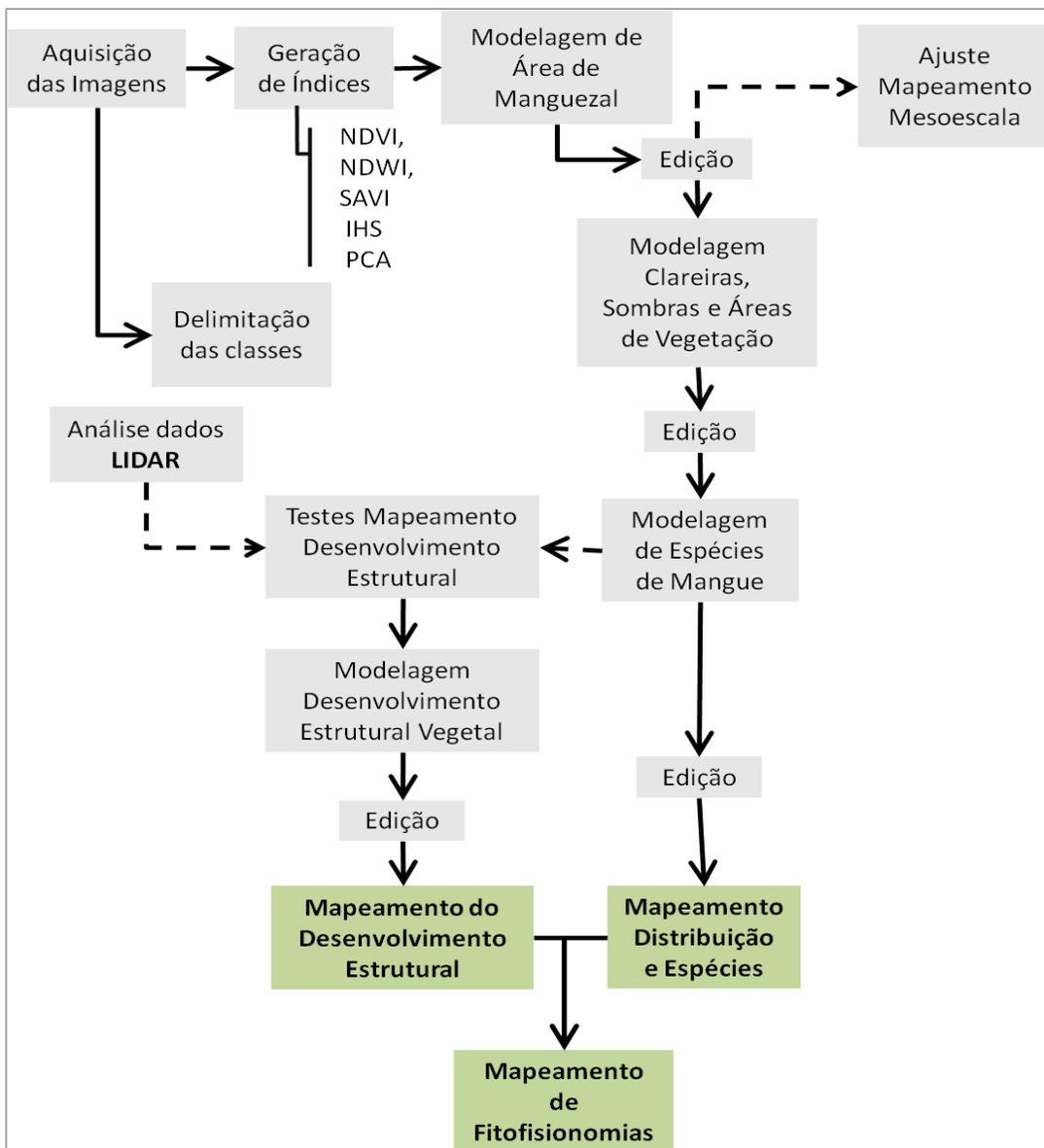


Figura 10-19: Esquema da abordagem metodológica adotada para o mapeamento das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas utilizando imagens de alta resolução.

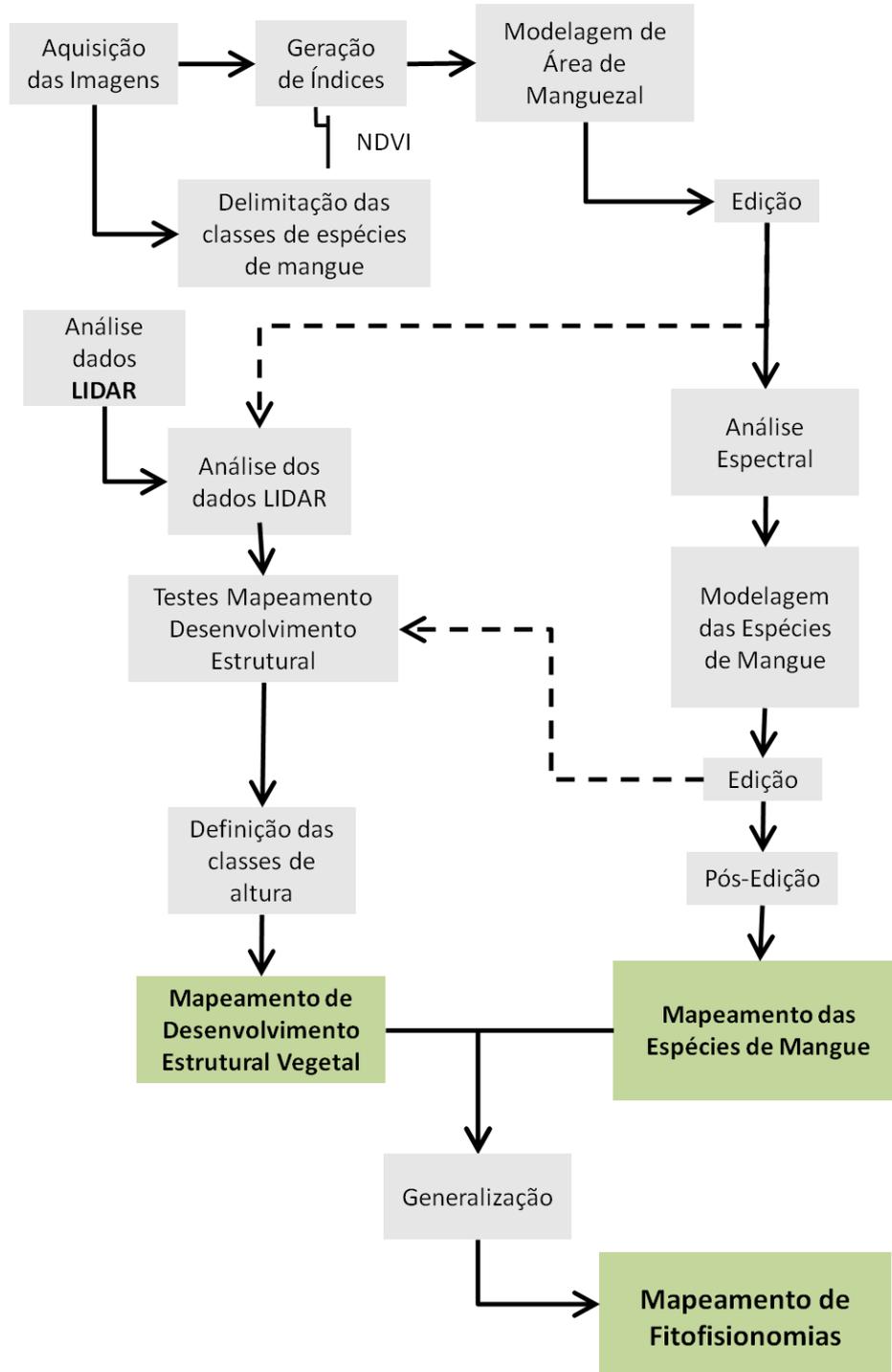


Figura 10-20: Esquema da abordagem metodológica adotada para o mapeamento das florestas de mangue utilizando as imagens de alta resolução.

Através da comparação entre os fluxogramas apresentados nas Figura 10-19 e Figura 10-20, percebe-se que as principais diferenças metodológicas, da primeira à última área mapeada, se relacionam a: i) o abandono da modelagem de clareiras e sombras; ii) inserção da definição de classes de altura e; iii)

inclusão do processo de generalização. Essas mudanças metodológicas serão justificadas e explicadas a seguir.

Após a elaboração do caderno de campo (abordado no Capítulo 11); a delimitação das áreas de mangue e o entendimento das distintas respostas espectrais no interior da floresta em meso resolução (descrito em tópicos anteriores); e com a aquisição das imagens de alta resolução, seguiu-se com a análise espectral para o mapeamento das espécies de mangue.

As imagens de alta resolução foram adquiridas com resolução espacial que varia de 0,5a 2 metros e em 4 bandas espectrais (as 3 do visível mais o infravermelho próximo). Essas imagens foram utilizadas para o mapeamento mais detalhado da floresta de mangue, onde se buscou, em conjunto com os dados de campo, a delimitação de fitofisionomias específicas. As imagens de 2 metros de resolução foram usadas somente para o mapeamento da baía de Turiaçu, por ser essa a maior área. Esta diferença não comprometeu a escala de mapeamento adotada.

10.2.2.1. Delimitação das classes de mapeamento das espécies de mangue

Nesse processo, a definição das classes é uma das primeiras atividades desenvolvidas após a aquisição das imagens e consiste na análise visual das imagens de satélite para estabelecimento das classes finais que comporão a legenda dos mapeamentos das 4 áreas.

Após a definição das classes a serem mapeadas relativas às espécies de mangue, foram confeccionadas fichas de identificação e caracterização com vistas ao mapeamento. Nestas chaves de reconhecimento cada classe foi descrita ambiental e espectralmente, exemplificando-se sua representação através das imagens (Figura 10-21, Figura 10-22 e Figura 10-23). Essas fichas auxiliam no processo de edição, reduzindo a subjetividade e a incerteza da interpretação.

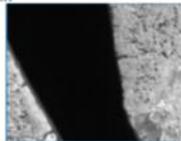
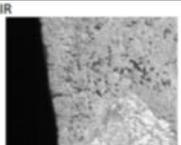
Nível 1					
Classe	Descrição	Amostra da Imagem	Amostra de uma banda	Visão Obliqua	Descrição Objeto
Água	Corpos Hídricos representados pelo Oceano Atlântico e pelos rios que compõem o sistema estuarino de Odivelas.		NIR 		Textura lisa; formas amplas assimétricas e tamanhos variados. Alta Absorção em todas as bandas (tonalidade escura em todas as bandas).
Não mangue	Vegetação (Florestal e Não Florestal) com desenvolvimento estrutural variado; áreas de pastagem; áreas antrópicas agrícolas e não-agrícolas.	Respostas variadas. 	Respostas variadas. 		Textura lisa e rugosa, formas assimétricas; tamanhos variados; pouco brilho. Se diferencia de outros tipos de vegetação, principalmente, por sua resposta espectral no Verde e no NIR.
Mangue	Florestas de mangue com desenvolvimento estrutural variado, localizadas às margens de corpos hídricos e sofre inundação diária das marés.		NIR 		Textura lisa e rugosa, formas assimétricas; tamanhos variados; pouco brilho. Se diferencia de outros tipos de vegetação, principalmente, por sua resposta espectral no Verde e no NIR.

Figura 10-21: Ilustração da Ficha de interpretação no Nível 1 de classificação para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

Nível 2					
Classe	Descrição	Amostra da Imagem	Amostra de uma banda	Representação em Campo	Descrição Objeto
Clareira	Áreas "abertas" nas florestas de mangue onde se observa o solo.		Blue		Textura lisa; formas isoladas assimétricas e de tamanhos variados. Alta radiação no azul.
Sombra	Áreas abertas ou com árvores de estrutura vegetal diferente onde as copas de espécies de mangue fazem sombra no interior do bosque.		Green		Textura lisa; formas isoladas assimétricas e de tamanhos variados, nas bordas de vegetação. Alta absorção no verde.
Vegetação Mangue	Florestas de mangue com desenvolvimento estrutural variado, localizadas às margens de corpos hídricos e que sofre inundação diária das marés. Excluído-se as clareiras e as sombras.		Green		Textura lisa e rugosa, formas assimétricas; tamanhos variados; pouco brilho. Se diferencia de outros tipos de vegetação, principalmente, por sua resposta espectral no Verde e no NIR.

Figura 10-22: Ilustração da Ficha de interpretação no Nível 2 de classificação para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

Nível 3					
Classe	Descrição	Amostra da Imagem	Amostra de uma banda	Representação em Campo	Descrição Objeto
Av	Florestas de mangue com desenvolvimento estrutural variado cuja composição apresenta dominância da espécie <i>Avicennia shaueriana</i> . Se localiza, preferencialmente, às margens de corpos hídricos.		Green		Textura lisa e rugosa, formas assimétricas; tamanhos variados. Se diferencia de outros tipos de vegetação de mangue, principalmente, por sua resposta espectral no Verde (maior radiação, mais claro).
Rh	Florestas de mangue com desenvolvimento estrutural variado cuja composição apresenta dominância da espécie <i>Rhizophora mangue</i> .		Green		Textura lisa e rugosa, formas assimétricas; tamanhos variados. Se diferencia de outros tipos de vegetação de mangue, principalmente, por sua resposta espectral no Verde (maior absorção, mais escuro).
Mista	Florestas de mangue com desenvolvimento estrutural variado cuja composição apresenta composição mista de Rh, Av e Lg.				Textura lisa e rugosa, formas assimétricas; tamanhos variados. Apresenta resposta espectral de mistura entre Av e Rh.

Figura 10-23: Ilustração da Ficha de interpretação no Nível 3 de classificação para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

As três figuras acima ilustram as classes mapeadas no estuário de São Caetano de Odivelas em níveis hierárquicos distintos (segundo a mesma lógica explicitada no mapeamento de meso resolução) presentes no processo de modelagem, a ser detalhado a seguir. Esse processo variou de área para área em virtude da complexidade espectral, mas em todas as áreas foram realizados procedimentos para a identificação das classes: água, mangue (florestas dominadas por *Avicennia* spp., florestas dominadas por *Rhizophora* spp. e florestas mistas).

Cabe destacar aqui que, a separação entre florestas dominadas por *Rhizophora* spp. e *Avicennia* spp. se dá porque as duas são espectralmente distinguíveis e por ser a espécie de *Rhizophora* spp. a mais frequente, entretanto, ressalta-se que há nas regiões a presença (com menor ocorrência) de *Laguncularia* spp. e, que florestas compostas por essa espécie não são mapeadas por apresentar assinatura espectral semelhante aos bosques de *Rhizophora* spp.

As classes detalhadas na Figura 10-22 dizem respeito à identificação de áreas de clareira e sombra, um dos testes iniciais do projeto. À princípio, pretendia-se utilizar a identificação de áreas de clareiras e sombras para auxiliar na identificação das diferentes fitofisionomias de florestas de mangue, principalmente com o atraso na aquisição dos dados de LiDAR. Entretanto, as análises dos mapeamentos dessas áreas, juntamente com os dados de estrutura da região indicaram que tal relação não se apresenta de forma tão direta, sendo necessário um esforço de tempo e investigações maiores que o esperado. Com a disponibilização dos dados LiDAR, esta abordagem foi suspensa para as outras três áreas.

Além das classes de clareira e sombra, mapeadas exclusivamente para o estuário de São Caetano de Odivelas, outras classes específicas surgiram para atender às peculiaridades locais de cada área.

No caso do sistema costeiro de Soure, além das classes descritas, foi mapeada também a classe “**Mangue + Associadas**”. Essa classe representa áreas onde a floresta de mangue se encontra entremeadada com espécies não típicas desse ecossistema, formando um padrão diferenciado. A presença dessas espécies influencia a resposta espectral destas áreas de tal forma que as espécies de mangue não podem ser identificadas. Assim, a classe se limita a indicar a presença de vegetação típica de mangue sem a especificação de espécie.

Para o sistema costeiro de Sucuriju percebeu-se que o intervalo entre a aquisição da data da imagem de alta resolução (imagem de arquivo de 2015) e o voo do lidar (realizado em 2019) evidenciou um processo de mudança associada à alta dinâmica geomorfológica bastante significativo, ao ponto de demandar cuidados especiais no mapeamento final. Na franja, a imagem apresenta uma faixa de floresta que não existia mais na época de levantamento do LiDAR. Essa faixa, embora presente em toda a franja, não apresenta dimensões constantes e, de acordo com o observado em campo, se refere a um forte processo erosivo. Somente nessa área o intervalo de dados dos dois sensores apontou variações bastante acentuadas. Por esse motivo, para o caso específico do sistema costeiro de Sucuriju, criou-se uma classe adicional, denominada “Faixa Erosiva”.

Os mapeamentos gerados para as 4 áreas obedeceram às chaves de reconhecimento descritas nas figuras apresentadas. As legendas, desta forma, mantêm um mesmo padrão, tendo uma pequena variação para os sistemas costeiros de Soure e de Sucuriju, que tiveram uma classe adicional cada uma.

Legenda padrão para as 4 áreas:

- Água;
- Florestas dominadas por *Rhizophora* spp.;
- Florestas dominadas por *Avicennia* spp.;
- Florestas Mistas;
- Outras coberturas.

Classe incluída para o caso específico do sistema costeiro de Soure:

- Mangue + Espécies Associadas.

Classe incluída para o sistema costeiro de Sucuriçu:

- Faixa Erosiva.

Após a determinação e detalhamento das classes do mapeamento de espécies de mangue, a modelagem inicial foi precedida pela geração de índices espectrais cuja função foi auxiliar na identificação dos padrões espectrais.

10.2.2.2. Geração de Índices Espectrais

A seleção do conjunto de descritores a ser adotado na classificação, em um processo de modelagem do conhecimento, está relacionada a expertise do intérprete relativa ao fenômeno e ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Como mencionado no mapeamento em meso resolução, nos estudos dos manguezais, assim como para outros tipos de vegetação, há um grande número de estudos que se utilizam de índices espectrais para a classificação florestal. Para o mapeamento de alta resolução, optou-se por analisar três índices de vegetação: NDVI, NDWI e SAVI (Tabela 10-4).

Tabela 10-4: Índices de vegetação utilizados na modelagem.

SIGLA	NOME	FÓRMULA	CARACTERÍSTICAS
NDVI	Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$	Bom para monitorar mudanças sazonais e interanuais da vegetação; Sensível a variações do substrato sob o dossel (Altos valores com substratos escuros); Responde a quantidade de Biomassa Verde
NDWI	Índice de água de Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Water Index</i>)	$NDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{nir}}{\rho_{green} + \rho_{nir}}$	Bom para monitorar mudanças sazonais e interanuais da vegetação; Sensível à umidade
SAVI	Índice de Vegetação ajustado ao Solo	$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{nir} - \rho_{red})}{(\rho_{nir} + \rho_{red} + L)}$ L = 0,5	Considerado como NDVI modificado; Outro índice com fator de ajuste para o solo

Legenda: ρ_{green} = valor de reflectância na faixa do verde; ρ_{nir} = valor de reflectância na faixa do Infravermelho Próximo; ρ_{red} = valor de reflectância na faixa do Vermelho e, L = fator de ajuste para o substrato do dossel. Fórmulas retiradas do software ERDAS®

Todos esses índices foram analisados para a área do estuário de São Caetano de Odiveias, de maneira a identificar como as imagens representavam as diferentes classes. Os testes visuais apontaram para uma maior sensibilidade do NDVI em comparação com os demais índices, sendo esse o índice escolhido para ser utilizado nos mapeamentos das 4 áreas de estudo.

10.2.2.3. Classificação das Espécies de Mangue

A etapa posterior à geração dos índices é a modelagem em si, que está dividida em duas importantes etapas: a segmentação e a modelagem propriamente dita. A Figura 10-24 detalha todos os processos envolvidos no mapeamento das espécies de mangue. Como descrito nas fichas de interpretação para o mapeamento de espécies de mangue (Figuras 10-21 a 10-23), o que se identifica aqui é a dominância de espécie no dossel, logo, quando falamos de mapeamento da distribuição das espécies de mangue, não estamos descartando a ocorrência de determinada espécie naquela área, principalmente no sub-bosque, mas mapeando, como dito, a classe mais abundante no dossel.

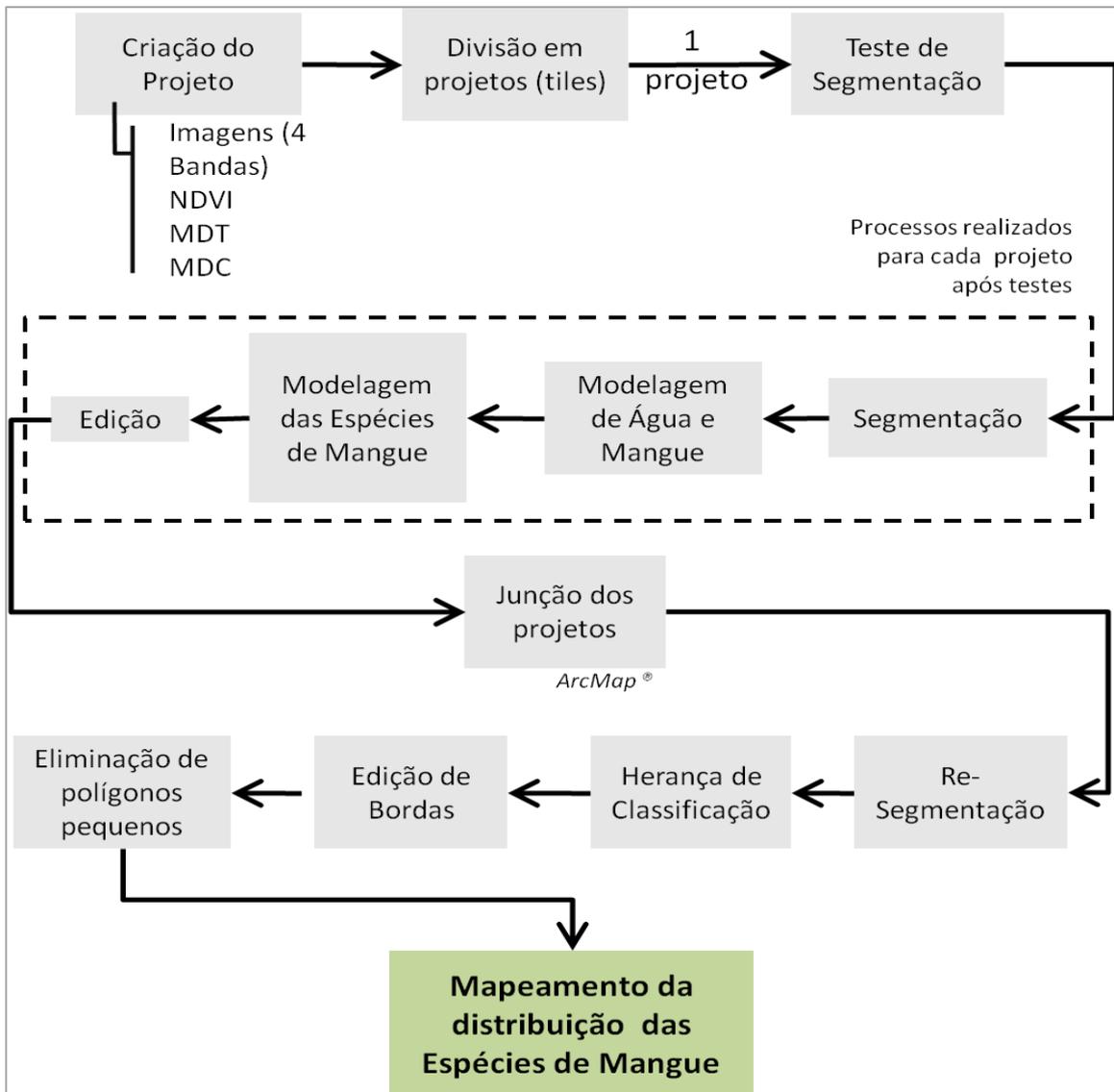


Figura 10-24: Detalhamento das etapas envolvendo o mapeamento da distribuição das espécies de mangue.

Quase todo o procedimento para a geração do mapeamento foi realizado no programa *eCognitionDeveloper*®. No projeto criado foram inseridas as imagens de satélite (com as 4 bandas espectrais) e, para o caso específico da baía de Turiaçu e da porção norte do sistema costeiro de Soure,

foram também inseridos os modelos digitais de terreno (MDT) e os modelos digitais de copa (MDC), pois o levantamento LiDAR se encontrava disponível para essas duas áreas de estudo.

Diante das extensões das áreas a serem mapeadas e, por consequência, do tamanho dos arquivos a serem manipulados, foi necessário dividir as áreas em recortes menores (*tiles*) de trabalho, que se configuraram em projetos. Assim, cada área compreendeu um número diferente de recortes a serem mapeados. Estes *tiles* foram, posteriormente, reagrupados de forma a gerarem um mapeamento único. Assim, considerando as diferentes extensões (área e forma) das 4 áreas, estabeleceu-se a seguinte divisão de *tiles*/projetos:

- Estuário de São Caetano de Odivelas: 1 *tile*/projeto;
- Sistema Costeiro de Soure: 8 *tiles*/projetos;
- Baía de Turiaçu: 22 *tiles*/projetos;
- Sistema Costeiro de Sucuriju: 5 *tiles*/projetos.

Após a criação dos projetos, foram realizados testes empíricos (em somente um projeto por área) para se definir e elaborar uma árvore de processos representativa. A árvore de processos é definida por um conjunto de linhas de comando parametrizadas que serve como memória dos passos adotados no projeto. A Figura 10-25 mostra um exemplo de árvore de processos para a baía de Turiaçu.

Ressalta-se que as árvores de processo adotadas sofreram ajustes para cada área de estudo, incorporando os conhecimentos gerados ao longo do processo de classificação, sendo, com isso, otimizadas com o tempo. Outro fator diz respeito à inclusão dos produtos do LiDAR no processo, indisponíveis para as primeiras áreas mapeadas. Por fim, pequenas diferenças nas árvores de processo são dependentes ainda das variações consideradas necessárias para atender às especificidades de cada área.

De forma geral, um bom exemplo para entender o processo de mapeamento das classes, é a modelagem adotada para o sistema costeiro de Soure. Isto se justifica pela inclusão de uma classe adicional nesta área, “Mangue com Associadas”. Para exemplificar a lógica de elaboração da árvore de processos em si, selecionou-se a baía de Turiaçu por ser a mais completa, incluindo a revisão final dos processos e os dados LiDAR.

Para fins elucidativos de todo o caminho metodológico percorrido, traduz-se neste texto, de forma rápida, o conjunto principal de linhas de comando, que inicia com a segmentação (Figura 10-25).

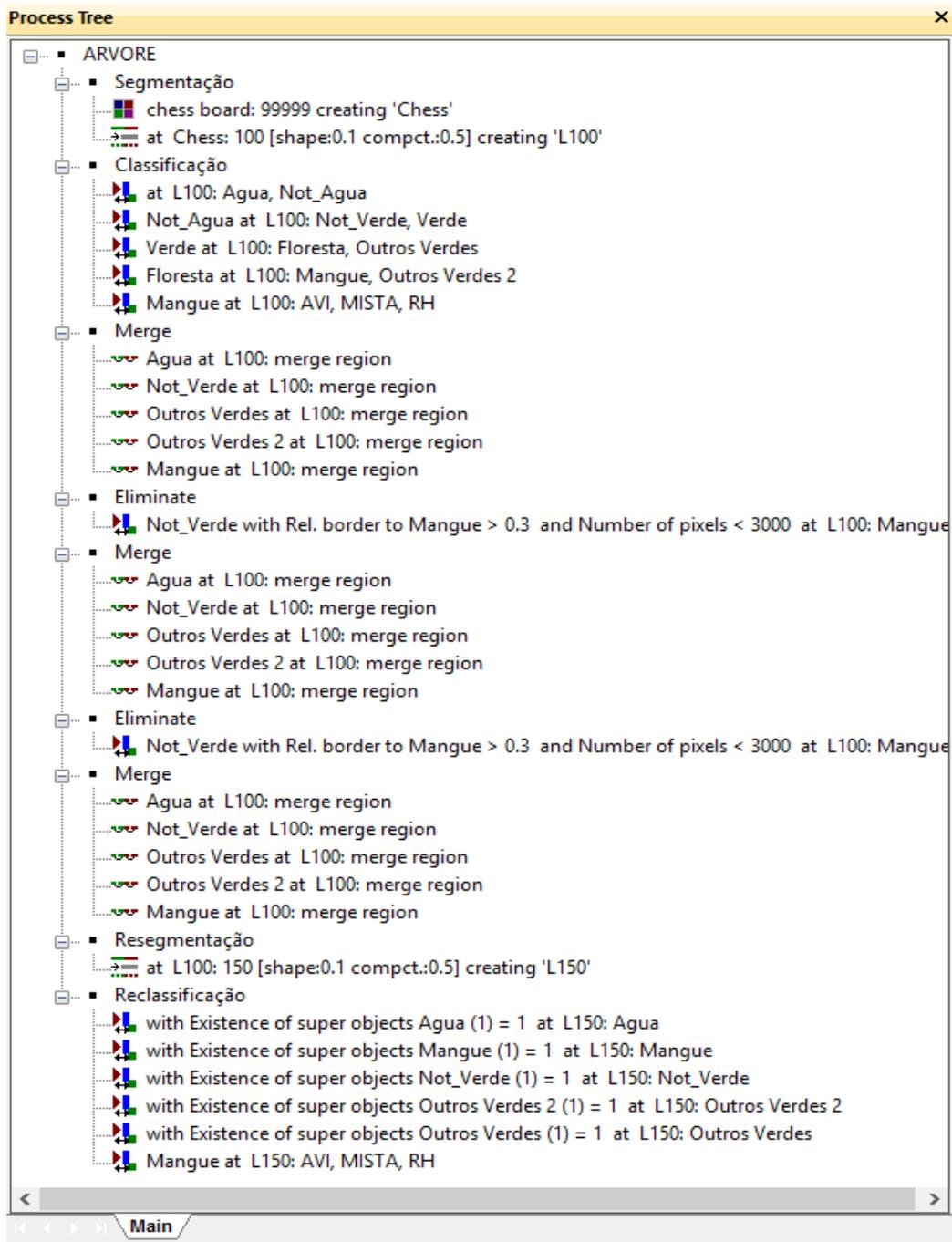


Figura 10-25: Exemplo de árvore de processo elaborada para o mapeamento de uma área na baía de Turiaçu (MA) (TUR04).

Como mencionado, a segmentação faz com que os pixels sejam agrupados em segmentos maiores (objetos), que são formados com base em sua resposta espectral e forma.

O parâmetro de escala empregados foi de 20 (Figura 10-26) para os projetos com resolução espacial de 0,5m (estuário de São Caetano de Odiveias, sistema costeiro de Sucuriçu e sistema costeiro de Soure) e 100 para baía de Turiaçu, cuja resolução espacial era de 2m.

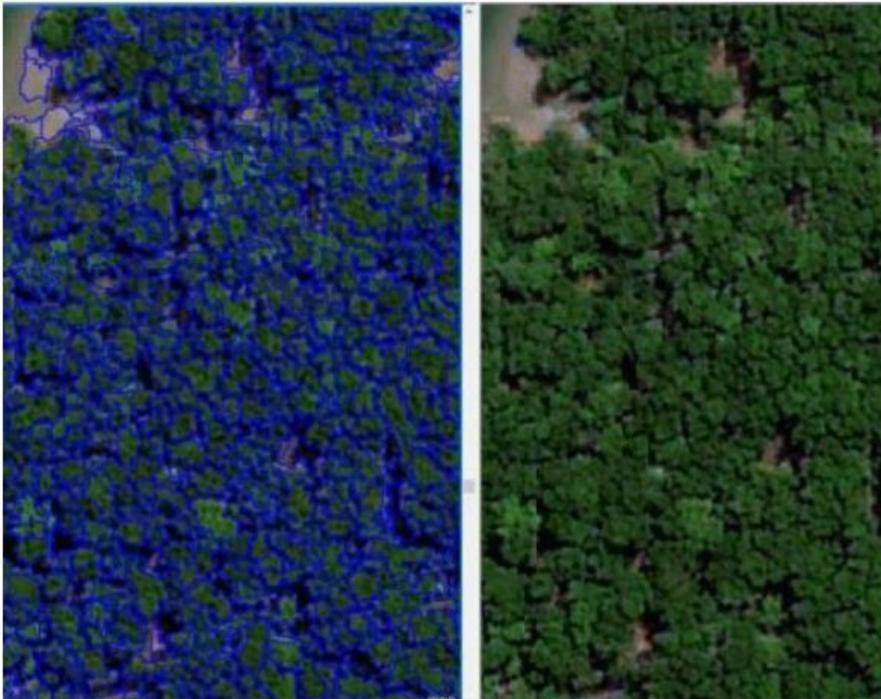


Figura 10-26: Teste de segmentação em nível mais detalhado.

Na sequência, os objetos foram classificados considerando vários parâmetros, principalmente os espectrais. A classificação baseada em objetos pode fazer uso de diferentes descritores através de critérios booleanos (*thresholds*) e/ou de funções *Fuzzy* na modelagem do conhecimento, que são regras matemáticas para que o conhecimento do operador seja sistematizado e reproduzido (CRUZ et al, 2009). A gama de parâmetros que pode ser considerada em uma classificação é bastante abrangente (o programa *eCognitionDeveloper* possui algumas centenas de possibilidades, o que dificulta escolhas). Considerando tudo isso, não só o conhecimento do operador acerca do fenômeno analisado é importante como também sempre será necessário um esforço significativo na realização de testes. Soma-se a isso outra questão: diferente dos classificadores de imagens clássicos, no caso do GEOBIA, além da escolha do tipo de função a ser empregada (*fuzzy* ou booleana), a parametrização para definição do modelo (gráfico) também pode ser definida pelo próprio operador, permitindo uma maior flexibilidade na definição de limites de pertinência. Esta gama de possibilidades pode ser entendida como um grande diferencial, mas também como uma dificuldade. Como a definição de parâmetros e limiares é sensível à resposta espectral da imagem, e estas são compostas por um mosaico de várias datas com características espectrais diferente, esses parâmetros podem precisar ser levemente alterados em cada projeto (tile). A Figura 10-27 ilustra o ambiente de parametrização dos modelos, no caso para a definição da classe dominada por *Avicennia* spp.

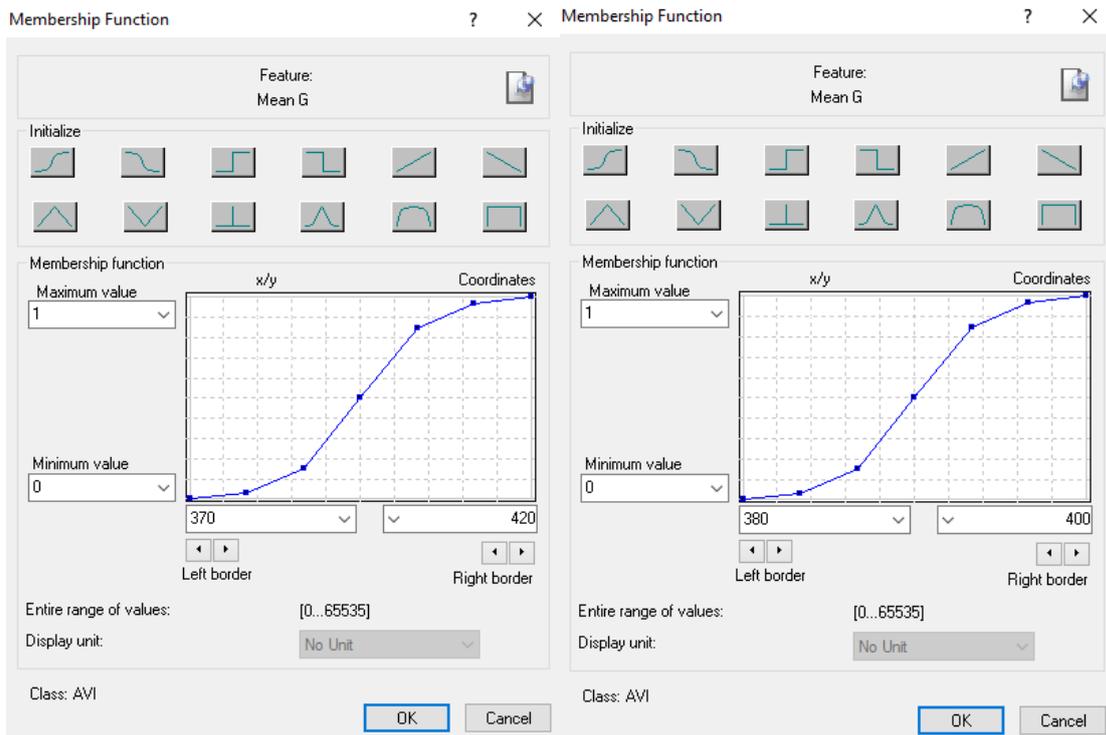


Figura 10-27: Exemplo de parâmetros (banda do verde) e limiares, para dois projetos (TUR 02 e TUR 10).

Na Tabela 10-5 são apresentados os descritores e limiares usados na modelagem da baía de Turiaçu e da parte norte do sistema costeiro de Soure. Esta modelagem foi separada em níveis hierárquicos, usando descritores diversos como os produtos do LiDAR. É importante apontar que a classe Mangue + Associadas, também apresentada na Tabela, só constou da classificação do sistema costeiro de Soure. Devido às diferenças e complexidades de cada área, os modelos adotados sofreram ajustes não só entre áreas, como também entre os tiles de uma mesma área.

Tabela 10-5: Descritores e modelos adotados na classificação das imagens da baía de Turiaçu e do sistema costeiro de Soure.

Hierarquia da Classe	Classes	Descritores	Limiares	Método de Classificação
1	Água	Modelo Digital de Terreno (MDT)	< 0	Boleano
	Continente	NOT Água	-	Boleano
2	Áreas Verdes	NDVI	> 0,4	Boleano
	Áreas Não Verdes	NOT Áreas Verdes	-	Boleano
3	Áreas Florestadas	Modelo Digital de Copas (MDC)	> 0,38	Boleano
	Áreas Não Florestadas	NOT Áreas Florestadas	-	Boleano
4	Manguezal	Modelo Digital de Terreno (MDT)	> 5,45	Boleano
	Outras Áreas Arbóreas	NOT Áreas Verdes	-	Boleano
5	Avicennia	Banda 02 - Verde	> 400	Fuzzy
		Modelo Digital de Copas (MDC)	> 10	Fuzzy
	Rhizophora	Banda 02 - Verde	< 380	Fuzzy
		Modelo Digital de Copas (MDC)	> 10	Fuzzy
	MISTA	NOT RH, NOT AVI e NOT Associadas	-	Fuzzy
MANGUE + ASSOCIADAS	Modelo Digital de Copas (MDC)	< 10	Fuzzy	

Após a modelagem, iniciou-se uma primeira rodada de edição manual no sistema *eCognition*. Nesta etapa é executada uma revisão visual do resultado obtido na modelagem, corrigindo confusões na classificação. Pelas particularidades das áreas, o esforço de edição foi diferenciado para cada caso. Na baía de Turiaçu, por exemplo, não houve dificuldades da modelagem na identificação das áreas de mangue, e sim na delimitação e classificação das espécies, sendo este o foco maior da edição. Já no sistema costeiro de Soure, a maior dificuldade da modelagem foi na identificação da classe composta Mangue+Associadas, que apresentava confusão parcial com as classes Florestas Mistas e Outras coberturas. Desta forma, no caso do sistema costeiro de Soure a edição focou mais na separação das áreas de mangue que se misturaram com a classe composta e a classe Outros.

10.2.2.4. Pós-classificação de Espécies de Mangue

A etapa de pós-classificação dos mapeamentos preliminares consiste na integração dos tiles classificados, na correção de inconsistências observadas nesta junção e na aplicação de filtros para retirada de ruídos. O processo de integração foi realizado através de ferramentas de mosaicagem disponíveis no *ArcMap*, de forma a gerar um único mosaico de todos os tiles de cada área de estudo.

A junção dos tiles possibilita a observação de pequenas inconsistências em suas bordas. Assim, uma segunda etapa de edição é necessária, focando-se agora, exclusivamente, nos limites integrados de cada tile, de modo a evitar inconsistências e descontinuidades no mapeamento. Para realização deste procedimento criou-se um novo projeto para cada área de estudo no *eCognitionDeveloper*. A edição foi realizada em objetos oriundos de uma segmentação criada com o mesmo parâmetro de escala do projeto original de classificação e, com as classes herdadas do mapeamento e edição dos projetos anteriores.

Por fim, para exclusão de ruídos - pequenos objetos menores que a área mapeável na escala adotada, ou menores do que 1500 pixels - foi aplicado um filtro que aglutina esses pequenos objetos na classe circundante.

O processo de avaliação dos resultados se deu em dois momentos distintos. Primeiro a distinção das florestas de mangue foi avaliada através de uma validação e, depois, o mapeamento de espécies de mangue foi analisado pela equipe de especialistas em ecologia de manguezais, que realizaram os levantamentos de campo, considerando para isso pontos de caracterização (quantificação) da estrutura vegetal e pontos de vistoria levantados no trabalho de campo.

10.2.3. Identificação e Mapeamento das Fitofisionomias

Como relatado em SOARES (1999), a caracterização estrutural da vegetação dos manguezais se apresenta como uma valiosa ferramenta de análise desse ecossistema, servindo de fonte de informações dos processos ali presentes. Nesse sentido, o desafio do desenvolvimento metodológico da equipe de sensoriamento remoto é convergir os esforços e abordagens (potencialidades e limitações) do levantamento em campo, com as potencialidades e também limitações dos dados oriundos de sensores remotos.

Esse contexto é bem complexo, dada a grande diferença da escala e do ponto de vista das observações. Nos estudos *in situ*, tem-se medições detalhadas de pequenas porções da floresta, com a possibilidade de se inventariar indivíduos quanto a vários parâmetros, como altura, diâmetro do tronco e identificação de espécie. Nos estudos baseados em sensoriamento remoto, por outro lado, tem-se uma cobertura ampla e contínua de toda a área de interesse através do ponto de vista vertical ou de topo, possibilitando ações de mapeamento e determinação de métricas da paisagem. Integrar estes dois conjuntos de dados de forma representativa tem sido foco de muitas experiências. Atualmente, com a possibilidade de se obter dados de outros tipos de sensores com capacidade de penetração na floresta a convergência dessas áreas tem aumentado e até potencializado.

Um dos parâmetros relacionados ao desenvolvimento estrutural das florestas de mangue é a altura das árvores da floresta. Com os produtos oriundos do levantamento do LiDAR, como o Modelo Digital de Copas, gerou-se o mapeamento do desenvolvimento estrutural das florestas de mangue. Para isso, seguiu-se os procedimentos ilustrados na Figura 10-28, para cada área de estudo.

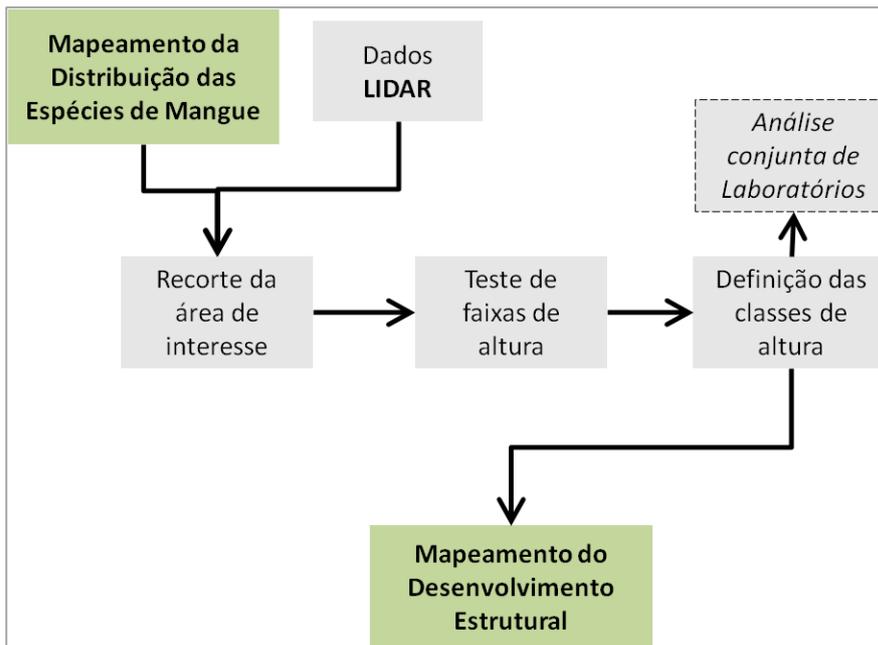


Figura 10-28: Fluxo de atividades para geração do mapa de fitofisionomias.

O processo se inicia com a definição detalhada dos contornos das áreas de mangue, adquiridos na etapa anterior de mapeamento de espécies. Essas áreas são adotadas como máscara para a extração dos dados do MDC. Assim, somente as áreas mapeadas como mangue são consideradas na análise estatística para definição da estratificação em classes de altura de árvores. Esses testes foram realizados no próprio *ArcMap*, através do método “Quebra Natural”, mais conhecido pelo termo em inglês *Natural Breaks*, desenvolvido por Jenks (1977). O *Natural Breaks* realiza uma classificação através da identificação de “quebras naturais” na variabilidade do universo de dados. Assim, “são identificadas quebras de classe que melhor agrupam valores semelhantes e que maximizam as diferenças entre as classes” (ArcGis, 2020). Os agrupamentos são calculados a partir da definição de um total de classes pré-definido pelo usuário, enquanto os limites são definidos pelo algoritmo, podendo ser ajustados posteriormente.

Para o mapeamento da estrutura da floresta de mangue, no contexto deste projeto, foram definidas 4 classes de agrupamento. Esse número foi determinado a partir da análise da metodologia empregada em Pellegrini *et al.* (2009), a partir do qual foram realizados testes empíricos para o estuário de São Caetano de Odivelas.

Pellegrini *et al.* (2009), ao caracterizar a estrutura vegetal das florestas de mangue adjacentes ao povoado de Garapuí/Cairu-BA (Figura 10-29), dividiu o ecossistema em tipos estruturais que combinavam a dominância por espécies da floresta (adotando 4 atributos) com faixas de desenvolvimento estrutural relacionadas ao DAP médio e à altura média da floresta e com a arquitetura das árvores (estabelecendo 5 faixas: níveis de desenvolvimento máximo, alto, intermediário e baixo e florestas retorcidas). Ao se observar as faixas de desenvolvimento propostas, percebe-se que a classe denominada “Florestas Retorcidas” possui a mesma faixa de altura média e DAP médio da classe “Intermediário”, sendo identificada com base na arquitetura, além da faixa de DAP médio e altura média. Por sua natureza, esta classe (caso presente) não pode ser identificada facilmente por sensores remotos. Considerando estas análises, ao invés de 5 foram definidas 4 classes de agrupamento para as faixas de altura a serem adotadas no presente estudo.

Nível de Desenvolvimento	Máximo	Alto	Intermediário	Florestas Retorcidas	Baixo
DAP medio (cm)	29,9 - 27,0	22,9 - 15,6	14,8 - 4,5		3,1 - 1,6
Altura Média (m)	21,2 - 17,7	22,7 - 11,8	13,7 - 5,7		4,7 - 2,4
<i>Rhizophora mangle</i> (florestas dominadas ou monoespecíficas)	 Tipo 1	 Tipo 3	 Tipo 6	 Tipo 7	 Tipo 11
<i>Avicennia schaueriana</i> (florestas dominadas)		 Tipo 2	 Tipo 9		
<i>Laguncularia racemosa</i> (florestas dominadas ou monoespecíficas)			 Tipo 4		 Tipo 10
Florestas Mistas			 Tipo 5	 Tipo 8	 Tipo 12

Figura 10-29: Tipos Estruturais identificados por Pellegrini *et al.* (2009) nas florestas de mangue de Garapuí (Cairu, BA). Fonte: Pellegrini *et al.* (2009).

Com o emprego das Quebras Naturais para as áreas com floresta de mangue, separadamente para as 4 áreas, foram definidos os intervalos de altura apresentados na Tabela 10-6.

Tabela 10-6: Classes de composição de espécies e faixas de altura (definidas segundo o método de Quebras Naturais do ArcMap para cada uma das áreas de estudo. Av – *Avicennia* spp., Rh – *Rhizophora* spp.

Área	Classes	Faixas de Altura
Estuário de São Caetano de Odivelas (PARÁ)	Av	Menores ou iguais a 10m
	Rh	Entre 10,1m e 17m
	Mista	Entre 17,1m e 23m
		Maiores ou iguais a 23m
Sistema Costeiro de Soure (PARÁ)	Mangue +Associadas	Menores ou iguais a 7m
	Av	Entre 7,1m e 17m
	Rh	Entre 17,1m e 25m
	Mista	Maiores ou iguais a 25m
Sistema Costeiro de Sucuriju (AMAPÁ)	Av	Menores ou iguais a 10m
	Rh	Entre 10,1m e 17m
	Mista	Entre 17,1m e 23m
		Maiores ou iguais a 23m
Baía de Turiaçu (MARANHÃO)	Av	Menores ou iguais a 6m
	Rh	Entre 6,1m e 10m
	Mista	Entre 10,1m e 15m
		Maiores ou iguais a 15m

Após a definição dos intervalos de altura, gerou-se um mapa com a estratificação desses valores. A integração deste mapa com o de espécies de mangue, possibilitou a geração do mapeamento de fitofisionomias de cada área (Figura 10-30). Pelo fato do mapa de estratificação apresentar maior detalhamento espacial, devido à escala do levantamento por LiDAR, teve-se a necessidade de executar um processo de generalização final no mapa de fitofisionomias, dado que o excesso de informação dificulta a leitura, e posterior análise, da sua distribuição espacial na escala adotada.

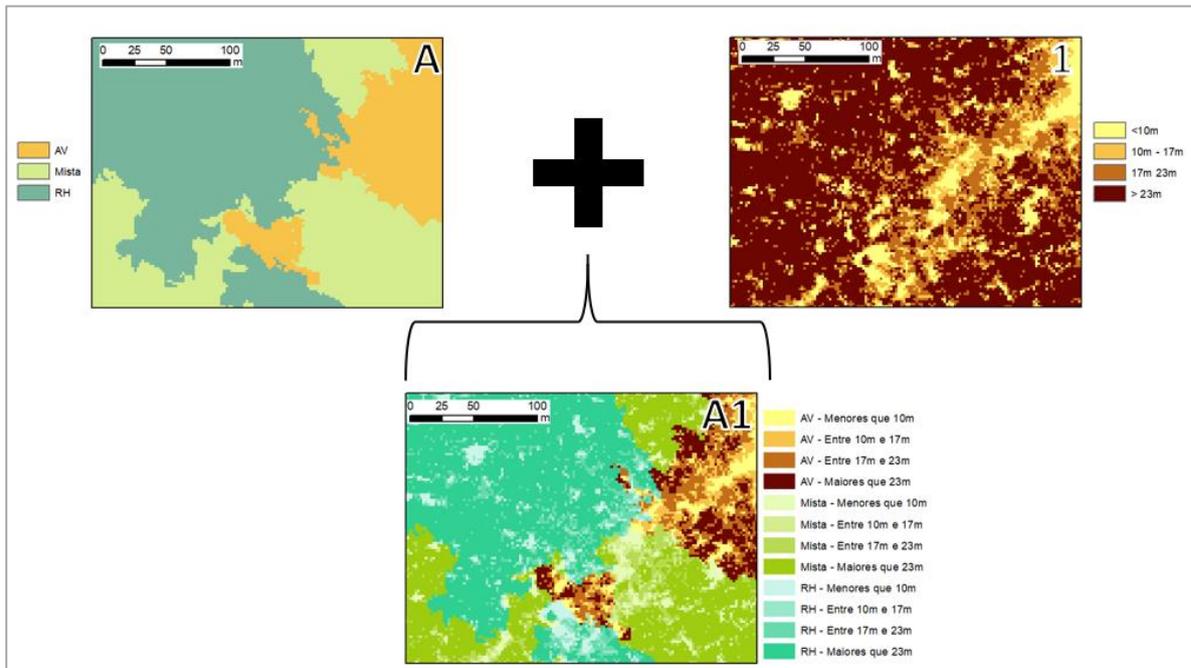


Figura 10-30: Combinação entre o mapeamento de espécies (A), a classificação de alturas de mangue (1) gerando assim o mapeamento de fisionomias (A1).

10.2.3.1. Generalização

O arranjo final do mapa de fitofisionomias ressaltou o efeito de ruídos e discontinuidades, exigindo um complexo processo de generalização cartográfica que precisou ser executado em 3 níveis para garantir melhores resultados. Esse excesso de informações é causado por um infindável número de pequenos polígonos de espécies+altura que, num contexto geral, poluem o mapa e dificultam a identificação de padrões.

O processo de generalização consiste na eliminação de pequenos polígonos a partir do agrupamento pelos vizinhos de maior fronteira. Um exemplo da importância da função da generalização cartográfica pode ser observado no mapeamento do estuário de São Caetano de Odivelas, que apresentou um total de 2.366.294 polígonos no produto inicial, dos quais 2.295.578 (ou 97%) eram menores do que 100m².

Uma importante questão para a realização da generalização foi a discontinuidade espacial que esses pequenos polígonos causam em certas classes, que apresentam, prioritariamente, expressão espacial na forma de polígonos alongados e estreitos. Os testes realizados inicialmente, em que se tentou um único procedimento de generalização, não apresentaram resultados significativos porque o conceito de vizinhança disponível nos programas comerciais não reconhece contatos por vértices, só por laterais. Este problema funcionou como pequenos diques que impediram a compreensão de áreas contínuas de

tamanhos maiores. Este fato dificultou a aplicação direta de um único processo de generalização, exigindo uma solução em 3 níveis, estabelecidos com diferentes critérios, exaustivamente testados.

A estruturação em 3 níveis permitiu um maior controle sobre a redução de ruídos, e o tratamento separado de cada classe de espécies, evitando desta forma mudanças na proporção de áreas do mapa anterior. A Figura 10-31 ilustra essa ocorrência e o processo aplicado.

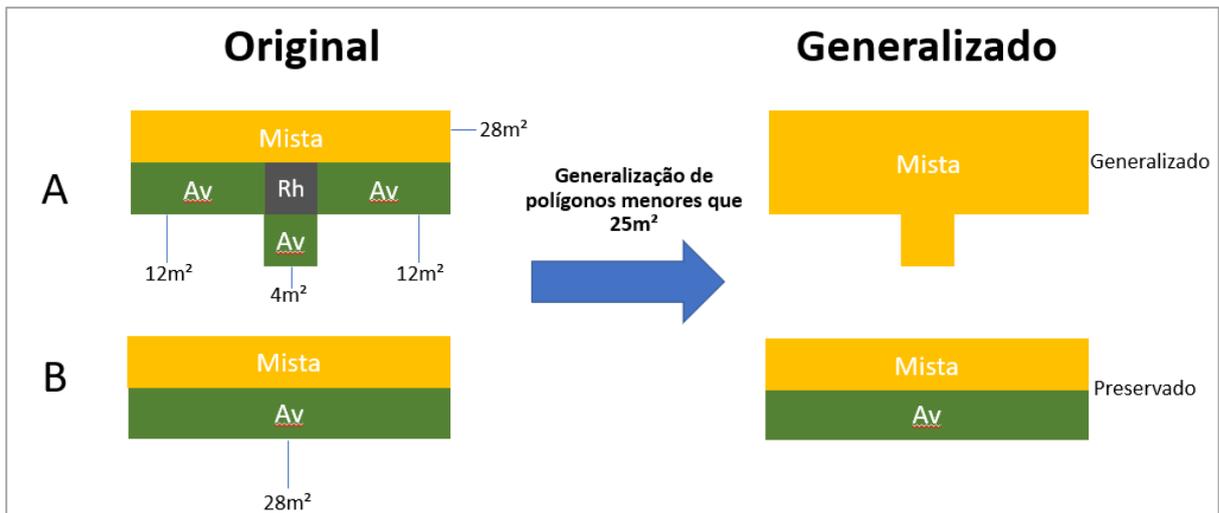


Figura 10-31: Diferença dos efeitos da generalização quando ocorre fragmentação causada pelos micros polígonos (A) e em áreas mais contínuas (B).

Para que a generalização preservasse ao máximo polígonos importantes que se encontravam fragmentados por estes micros polígonos, foi necessário generalizar em escalas crescentes de valores de área para que o processo considerasse, a cada passo, a nova dimensão dos polígonos restantes, antes da execução do passo seguinte. A sequência de filtros foi realizada até alcançar o produto final.

No processo de generalização cartográfica os micros polígonos são agrupados aos vizinhos mais presentes, permitindo uma continuidade espacial maior, evitando a perda de polígonos grandes. A Figura 10-32 ilustra esse processo.

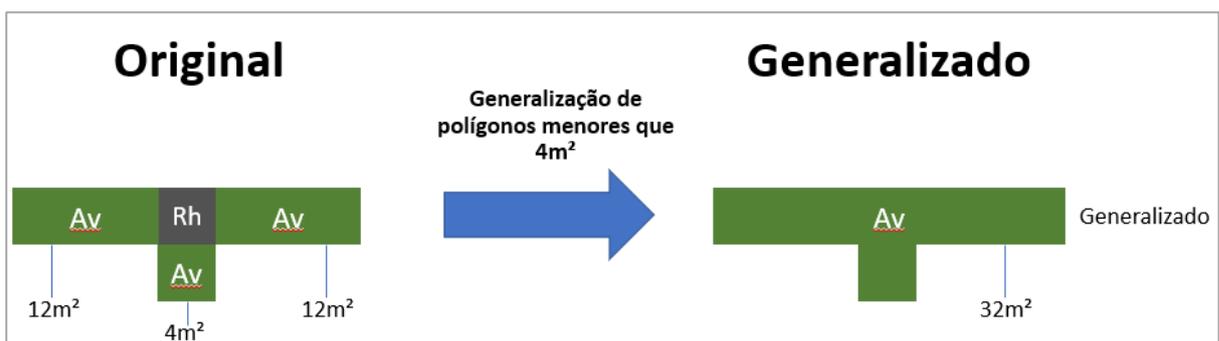


Figura 10-32: Eliminação dos micros polígonos.

Devido ao excesso de polígonos que seriam generalizados em cada área e a necessidade de repetir o processo diversas vezes de forma progressiva, foi necessário automatizar essa etapa para todas as regiões pois seria inviável realizar esse processo de forma manual.

A generalização foi feita no software *ArcMap* 10.3 usando dados vetoriais das fitofisionomias a partir de um conjunto de ferramentas apresentadas na Figura 10-33.

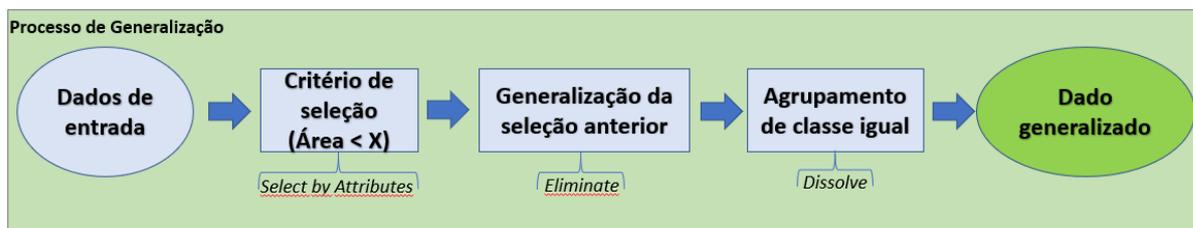


Figura 10-33: Processo de generalização com as ferramentas utilizadas, onde o X é o valor de área a ser generalizado.

Além da definição do fluxo da generalização, outras medidas foram tomadas para evitar que ocorresse uma desproporção das classes temáticas das espécies de mangue. Esses desarranjos no mapeamento são representados por situações em que um pequeno polígono mapeado como uma classe passa a pertencer a outra classe, determinada por critérios de vizinhança.

Logo, para que o processo automático de generalização não fizesse mudanças de classes de espécies distintas, essa etapa foi dividida em três subprocessos a fim de diminuir a perda de informações sobre as espécies de mangue.

10.2.3.1.1. Primeira Etapa: Generalização por Espécies de Mangue

A primeira etapa da generalização foi a etapa mais sensível pois estaria responsável pela execução do primeiro filtro e onde seria tratado o maior número de polígonos pequenos. Além disso, havia o perigo e o receio de que as classes de espécies pudessem ser alteradas entre si devido aos vizinhos maiores. Caso todas as espécies de mangue fossem tratadas juntas, não se poderia ter controle com restrições sobre as mudanças consideradas plausíveis.

Dessa forma, optou-se por tratar o conjunto de dados de uma espécie e suas respectivas alturas independentemente das outras classes de mangue nesse processo. Assim, os pequenos polígonos de uma espécie mudariam apenas a classe de altura, conservando a espécie de mangue mapeada originalmente. A Figura 10-34 esquematiza o conceito por trás do tratamento individual por espécie.



Figura 10-34: Diferenças entre a generalização considerando todas as espécies (A) e por espécie (B).

Para isso, criou-se um fluxo que tratasse individualmente cada conjunto de dados de espécie com suas alturas, aumentando as áreas a serem generalizadas progressivamente, começando por 4m² até 1.000m² (0,1ha, considerado como área mínima). O fluxo teve como base a disposição das ferramentas, conforme apresentado na Figura 10-34, sendo constituído de 8 conjuntos de ferramentas encadeadas. A Figura 10-35 apresenta o fluxo utilizado nesta etapa para a generalização por espécies de mangue, evidenciando o extenso fluxo criado para preservar o máximo os pequenos objetos.

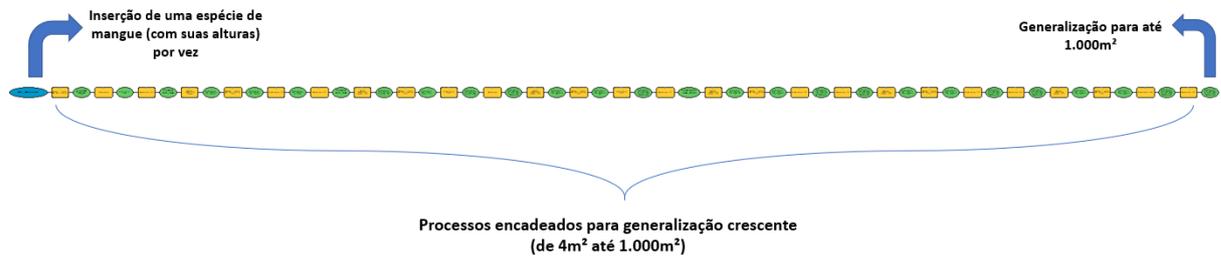


Figura 10-35: Fluxo de processos para generalização por espécie de mangue até 1.000m².

Os valores usados como critério para generalização de forma progressiva foram 4m², 16m², 32m², 64m², 128m², 256m², 512m² e 1.000m². Este último foi considerado um tamanho máximo para que franjas e pequenos grupos de indivíduos dispostos ao longo dos rios não sumissem e fossem englobados pelos vizinhos. Estas franjas são feições importantes no estudo do ecossistema manguezal.

Por fim, após todas as espécies de uma área terem passado por essa etapa, seria necessário ainda integrá-las e passar pelo processo de generalização seguinte.

10.2.3.1.2. Segunda Etapa: Generalização entre Espécies de Mangue

Após o processo anterior, grande parte dos micros polígonos foram incorporados por seus vizinhos maiores. Entretanto, pelo fato da generalização anterior ter sido feita de forma separada por espécie, sobraram pequenos polígonos de uma espécie que estavam totalmente contidos dentro de outra e, por isso, não foram generalizados por não terem vizinhos da sua própria espécie. A Figura 10-36 a seguir ilustra esses casos e o processo adotado.

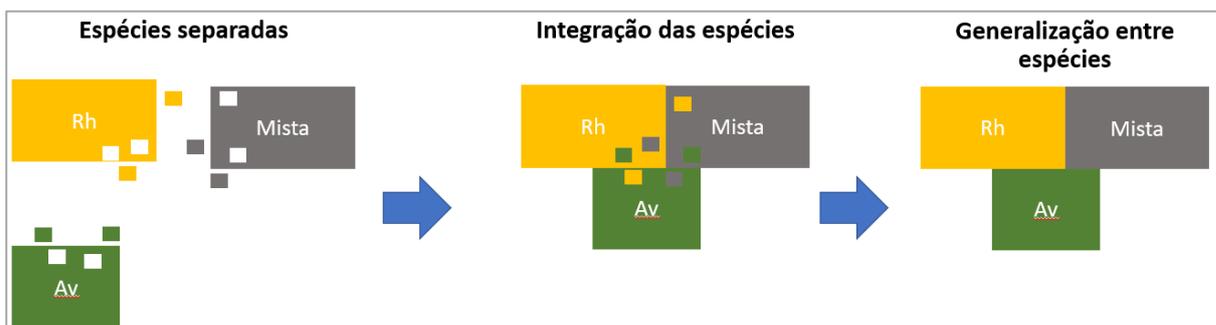


Figura 10-36: Generalização de pequenos polígonos de uma espécie dentro da outra.

Após a integração das espécies de mangue, foi iniciado um novo fluxo de generalização para incorporar esses pequenos polígonos remanescentes, sendo usado o mesmo conceito da etapa anterior de áreas progressivas. Entretanto, para não permitir que polígonos muito grandes fossem generalizados, o novo fluxo limitou a generalização até um valor de 300m². Essa etapa teve 7 conjuntos de ferramentas encadeadas da Figura 10-36 anterior e considerou os valores 4m², 16m², 32m², 64m², 128m², 256m² e 300m². A Figura 10-37 a seguir é o fluxo utilizado nesta etapa para a generalização entre espécies de mangue.

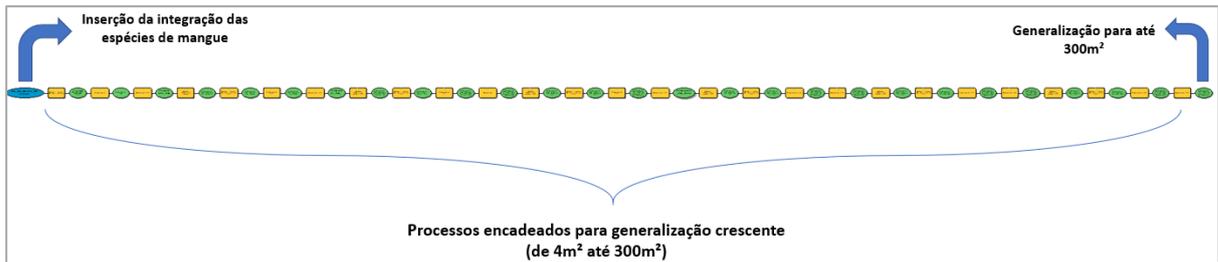


Figura 10-37: Fluxo de processos para generalização por espécie de mangue até 300m².

Após as espécies estarem integradas e novamente generalizadas, elas eram encaminhadas para a etapa seguinte, que envolvia a integração e generalização final.

10.2.3.1.3. Terceira Etapa: Generalização entre as Classes de Uso e Cobertura

A última etapa consiste na integração das espécies de mangue processados na etapa anterior com as outras classes de uso e cobertura do mapeamento. Além da integração também foi necessário passar um último processo de generalização para agregar pequenos polígonos que não foram eliminados anteriormente por não terem como vizinhos espécies de mangue, mas sim outras classes do mapeamento.

Essa etapa, por permitir que espécies de mangue virem outras classes, foi mais restritiva no tamanho dos polígonos que poderiam ser generalizados, indo de forma progressiva até somente 100m². Tais cuidados garantiram que pequenos polígonos das classes não-mangue fossem generalizados sem alterar profundamente o mapeamento de fitofisionomia de mangue. Além disso, a classe Água foi a única que não foi selecionada para ser generalizada, de forma a preservar os corpos hídricos existentes em cada área.

Essa etapa teve 5 conjuntos de ferramentas encadeadas e considerou os valores 4m², 16m², 32m², 64m² e 100m². A Figura 10-38 a seguir é o fluxo utilizado nesta etapa para a generalização entre espécies de mangue.

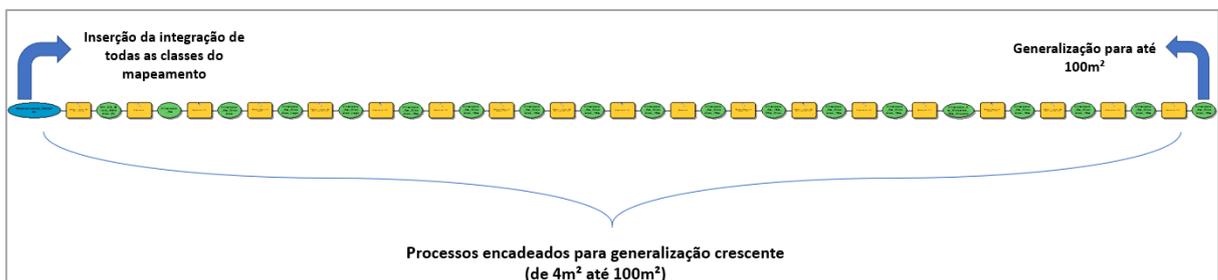


Figura 10-38: Fluxo de processos para generalização por espécie de mangue até 100m².

Ao final dessa etapa, tem-se o mapeamento de fitofisionomias generalizado para cada uma das áreas no formato *raster*, adequado para futuras integrações na análise da vulnerabilidade.

Gerou-se ainda um produto em formato vetorial, sobre o qual foi efetuada uma suavização das bordas pela ferramenta “*SmoothPolygon*” do *ArcMap* 10.3 que visa diminuir o aspecto “pixelado” do vetor, dando-lhe

contornos mais suaves. A Figura 10-39 a seguir mostra a diferença entre os produtos generalizado sem e com suavização.

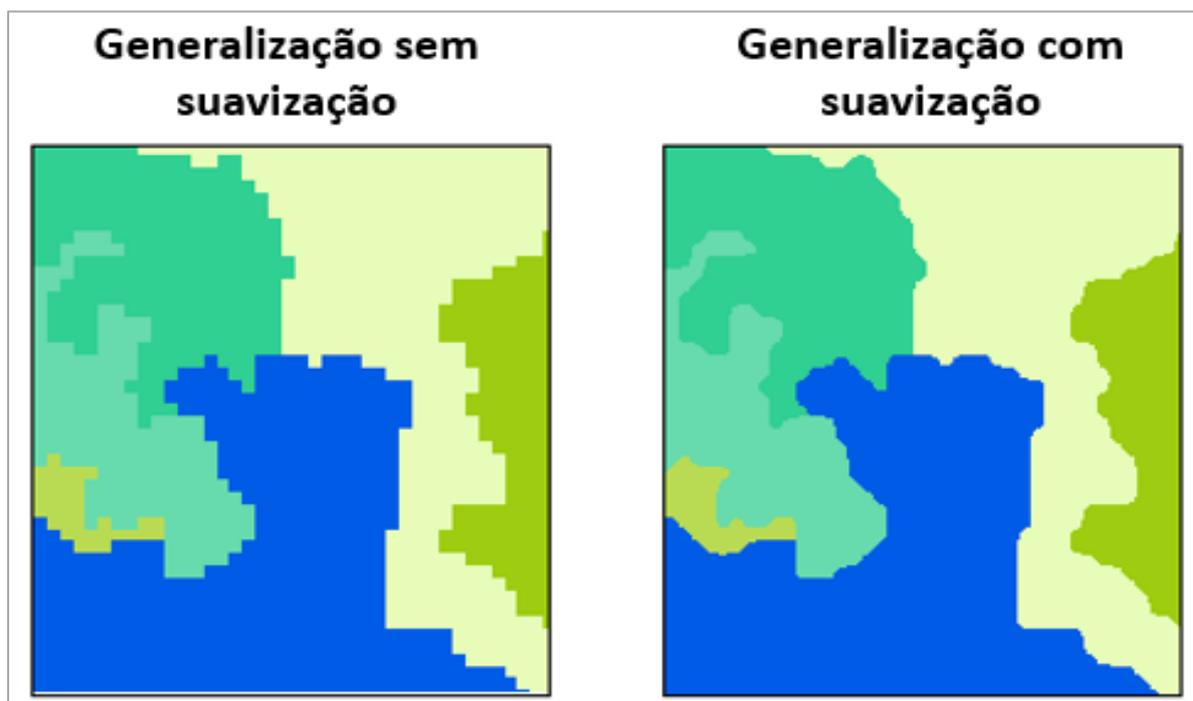


Figura 10-39: Diferenças do produto vetorial final sem e com suavização.

10.3. Mapeamento das áreas de manguê em meso resolução

Como resultado do mapeamento das áreas de manguê em meso resolução, gerou-se um mapa para cada área de estudo, o que totalizou 4 mapas na abordagem em meso resolução. As Figura 10-40, Figura 10-41, Figura 10-42 e Figura 10-43 mostram, respectivamente, as áreas do estuário de São Caetano de Odivelas (PA), sistema costeiro de Soure (PA), baía de Turiaçu (MA) e sistema costeiro de Sucuriçu (AP). A classificação focou nas classes Sedimentos Expostos, Corpos Hídricos, Manguezal, Vegetação Herbácea com Presença de Manguê, Área Urbana e Outras Classes. A Tabela 10-7, assim como o gráfico apresentado na Figura 10-44, sintetizam a distribuição de classes observadas em cada uma das 4 áreas mapeadas em valores absolutos.

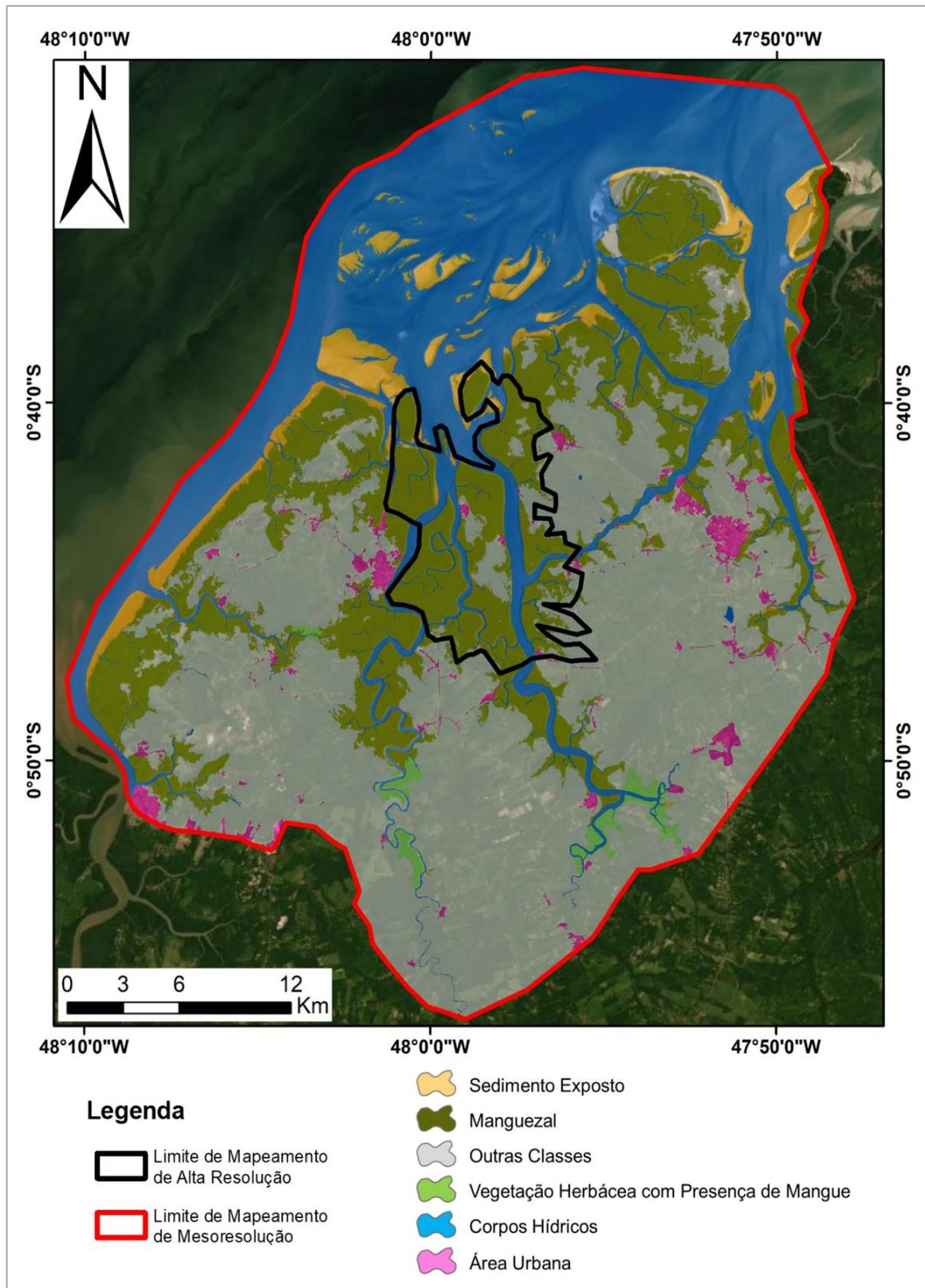


Figura 10-40: Mapeamento de meso resolução do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

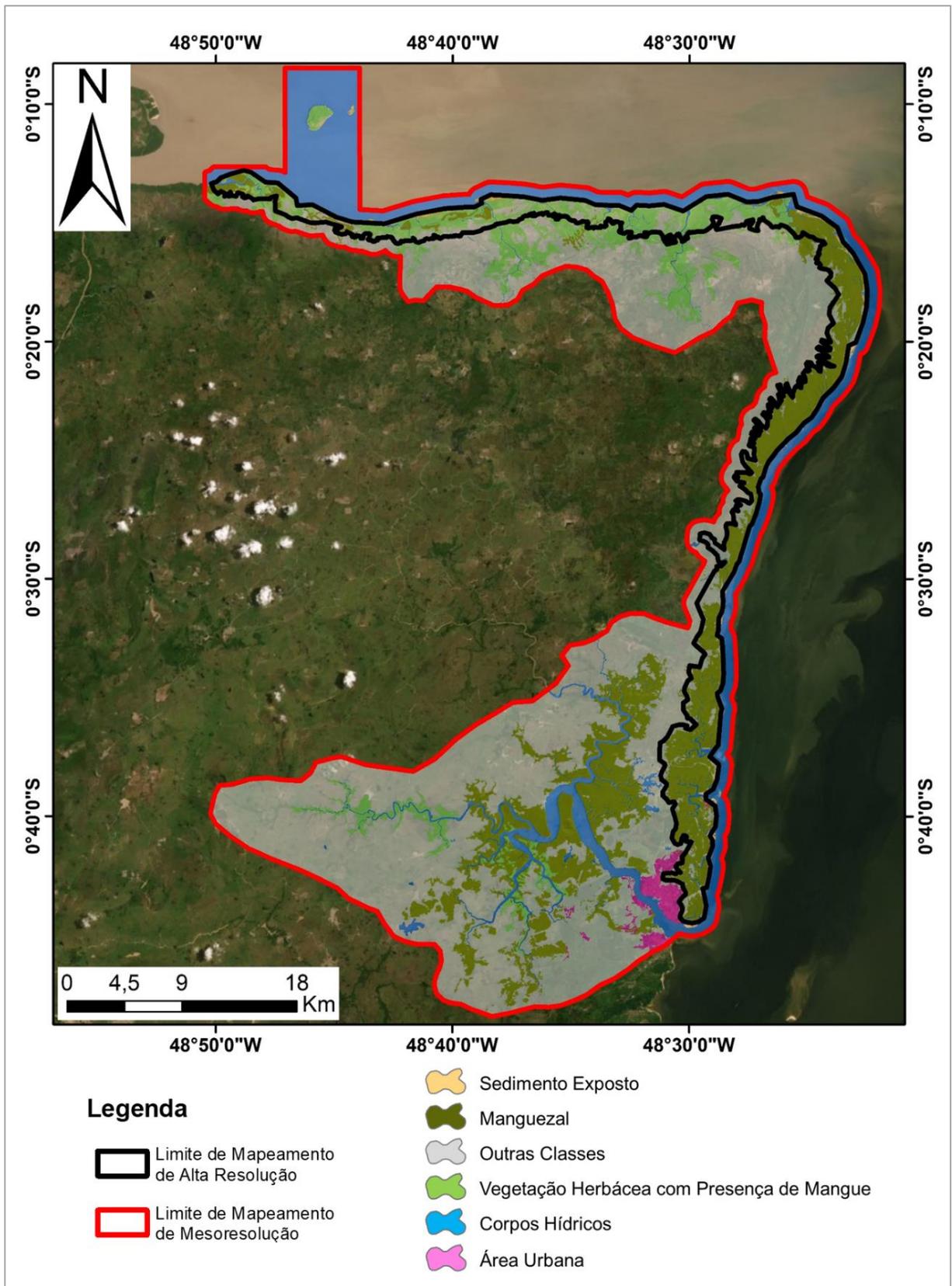


Figura 10-41: Mapeamento de meso resolução do sistema costeiro de Soure (PA).

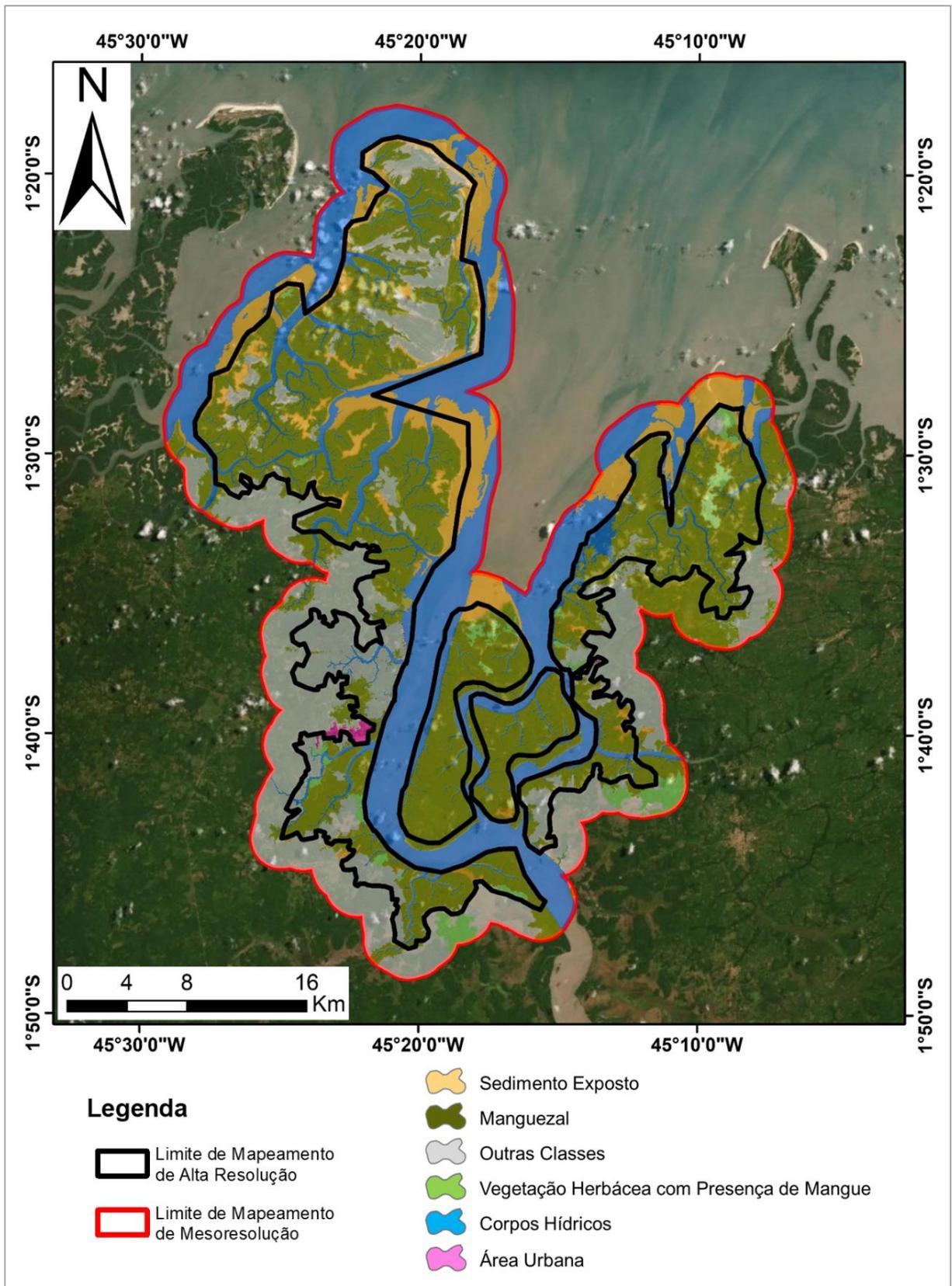


Figura 10-42: Mapeamento de meso resolução da baía de Turiaçu (MA).

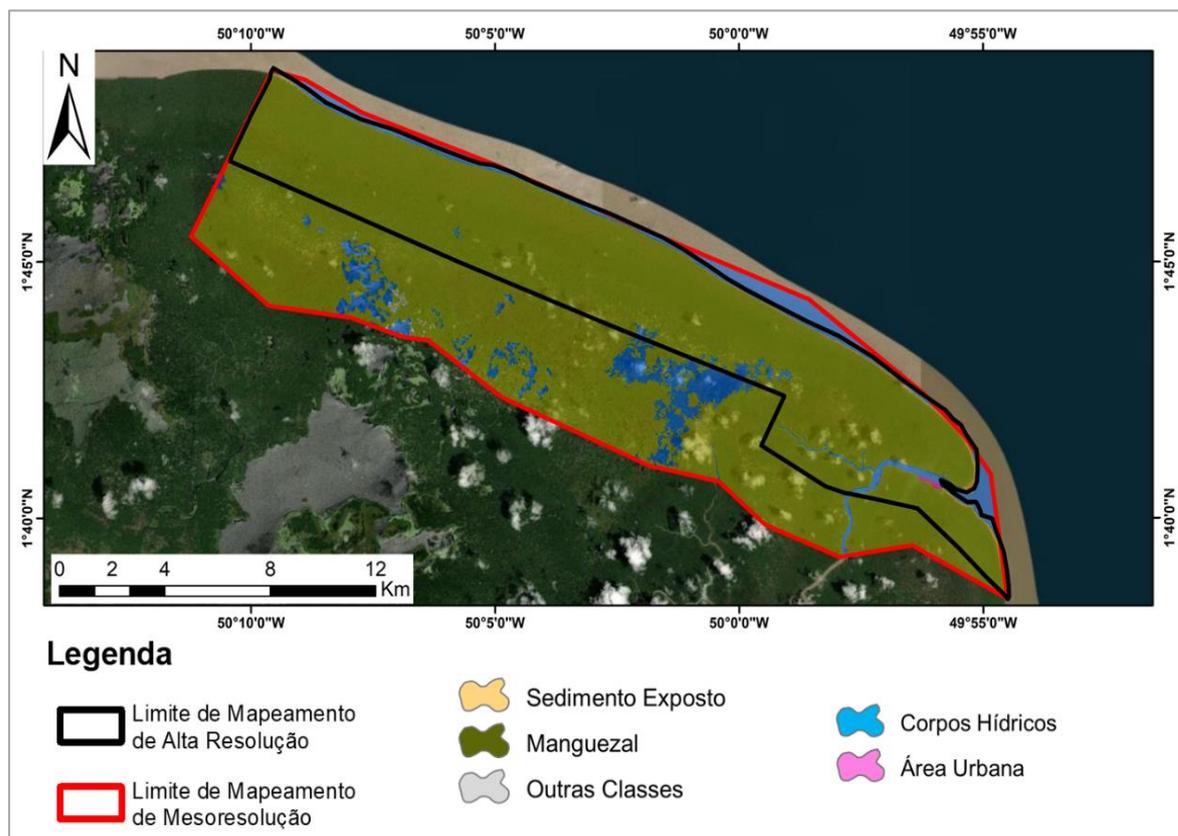


Figura 10-43: Mapeamento de meso resolução do sistema costeiro de Sucuriçu (AP).

Uma análise rápida e conjunta desses resultados ressalta as diferenças nas proporções das áreas de manguezal e de outras classes em cada área, assim como outros aspectos interessantes.

Em relação à distribuição de manguezais, as áreas do estuário de São Caetano de Odivelas e baía de Turiaçu se assemelham por sua distribuição mais estuarina, típica de baía, onde os rios desenham também a ocupação da floresta. Já as áreas dos sistemas costeiros de Soure e de Sucuriçu apresentam a ocupação de manguezais em faixas paralelas à costa.

O estuário de São Caetano de Odivelas (PA) - Figura 10-40, segunda maior área de manguezal, dentre as estudadas, apresentou nesta escala de mapeamento, 276,01km² de área de manguezal. O contato da floresta com outros usos é diverso, encontrando-se áreas de campo, urbanas e outros tipos de vegetação, o que acabou determinando que a classe outros ocupasse 586,20 km².

A baía de Turiaçu (MA), embora tenha sido a terceira maior área mapeada, apresentou a maior área de manguezal, 474,75 km². Ao longo do estuário, a ocupação desse ecossistema possui padrões distintos, caracterizados pela presença de manguezais entremeados por cordões arenosos na porção mais a oeste, e uma ocorrência mais contínua das florestas na porção mais a leste e nas ilhas do estuário. Outra característica dessa área é que se tem, em porções mais à jusante do estuário, a presença de faixas de areia e colonização (121,51 km² no total), o que indica certa dinâmica no ambiente e a presença de áreas de planícies hipersalinas (apicuns), feição também contemplada nessa classe.

A região do sistema costeiro de Soure (PA) foi a maior área mapeada (1.073,52 km²), isso porque mesmo que os manguezais dessa região se apresentem, de maneira geral, em faixas estreitas, eles têm ampla distribuição espacial. Essa ampla ocupação (latitudinal e longitudinal) em faixas, totaliza 225,79 km² de floresta distribuídas em duas faces distintas quanto à orientação: norte-sul e leste-oeste.

Na porção com orientação norte-sul, os manguezais se apresentam de forma mais contínua e homogênea. Além de estarem paralelos à costa, são encontradas faixas ocupando canais e rios mais à montante. Nessa vertente, a classe “outros”, que totaliza 711,68 km² no mapeamento, surge mais no interior do continente e em pequenos trechos da costa.

Na porção com orientação leste-oeste, ao norte da Ilha de Marajó, os manguezais ocorrem de forma mais rarefeita, normalmente num arranjo em mosaico associado a outras espécies não típicas deste ecossistema. Por isso, a classe mais identificada foi “vegetação herbácea com presença de mangue”, classe que corresponde a quase 10% da área mapeada (113,80 km²).

O sistema costeiro de Sucuriju (AP) foi a menor área mapeada e, dentre as quatro, a mais homogênea em termos de ocupação espacial, apresentando majoritariamente duas classes: corpos hídricos e manguezal. As áreas de florestas de mangue ocupam 197,29 km² e estão presentes em toda margem da costa. Na porção mais interiorana significativas áreas com presença de água foram identificadas em meio à floresta, registro de arranjo hídrico característico do sistema costeiro de Sucuriju.

Tabela 10-7: Quantificação de classes por área analisada.

Valores absolutos da área (km ²) de cada classe no mapeamento de meso resolução						
Área	Área Urbana	Sedimentos Expostos	Manguezal	Outras Classes	Vegetação Herbácea com Presença de Mangue	Total
SCO	23,94	54,37	276,01	586,20	11,55	952,07
SOU	13,70	8,55	225,79	711,68	113,80	1073,52
SUC	0,13	0,95	197,29	0,39	0	198,76
TUR	3,18	121,41	474,75	304,74	24,57	928,65
Total	40,96	185,28	1173,84	1603,00	149,91	3153,00

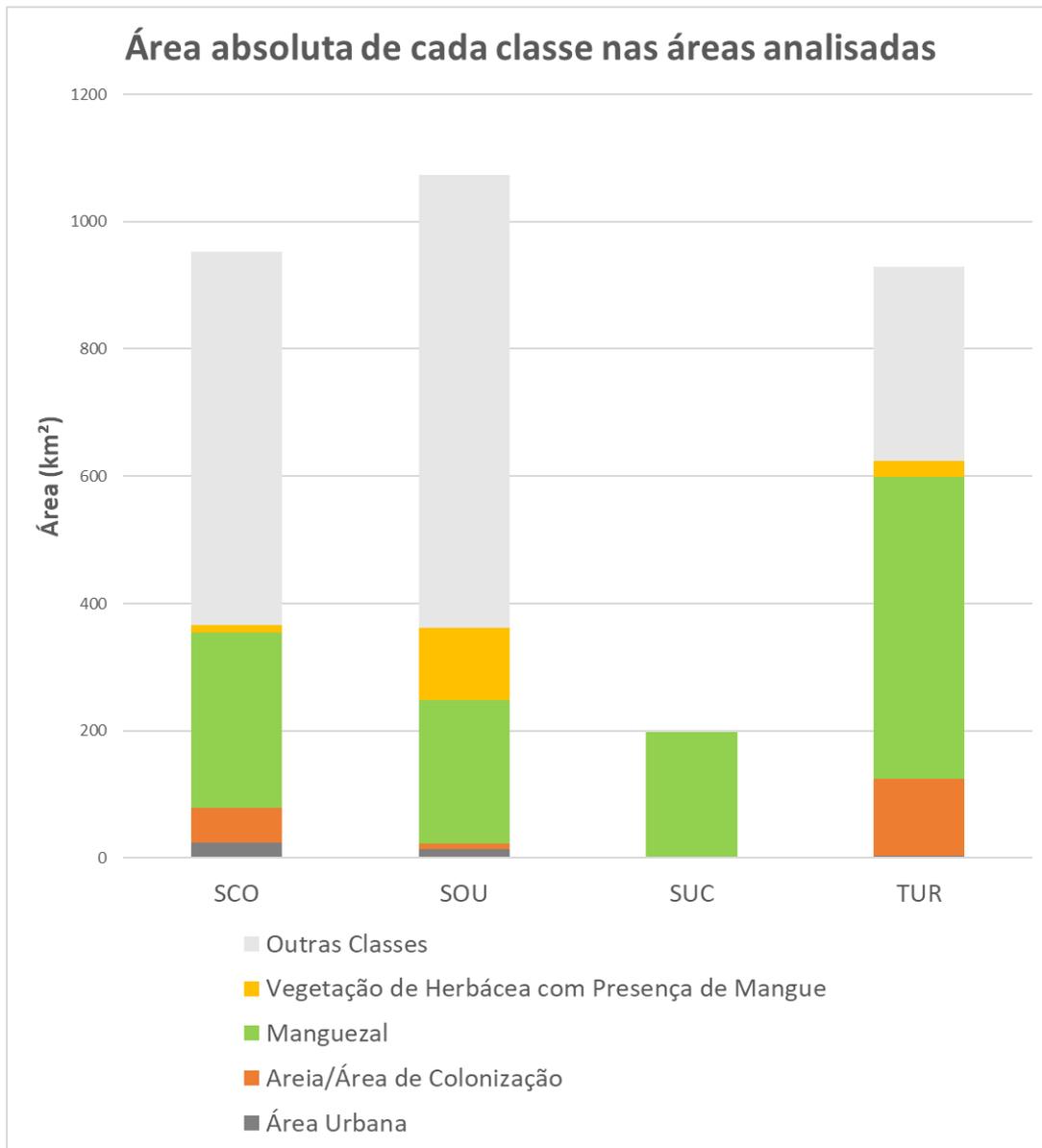


Figura 10-44: Distribuição proporcional de classes por área de estudo.

10.4. Mapeamento da composição de espécies

Como resultados do mapeamento da composição de espécie, a Tabela 10-8 e a Figura 10-45 sintetizam a distribuição de classes observada em cada uma das 4 áreas mapeadas em valores absolutos e relativos. Conforme mencionado no item 10.2.2.1, embora registre-se a presença de florestas compostas por *Laguncularia racemosa* nas áreas de estudo, estas não foram mapeadas por essa espécie apresentar assinatura espectral semelhante aos bosques de *Rhizophora* spp.

Tabela 10-8: Quantitativos de áreas (km²) de cada região mapeada.

Área	Florestas dominadas por <i>Rhizophora</i>	Florestas dominadas por <i>Avicennia</i>	Florestas Mistas	Mangue + Associadas	Corpos Hídricos	Outras Classes	Sem Informação
Estuário de São Caetano de Odivelas (PA)	42,80	4,37	20,34	0	27,63	15,37	0
Sistema Costeiro de Soure (PA)	53,03	2,45	15,87	25,33	41,08	183,95	0
Baía de Turiaçu (MA)	270,79	24,34	60,61	0	130,75	220,50	48,29
Sistema Costeiro de Sucuriju (AP)	66,86	12,35	29,37	0	6,23	3,29	0

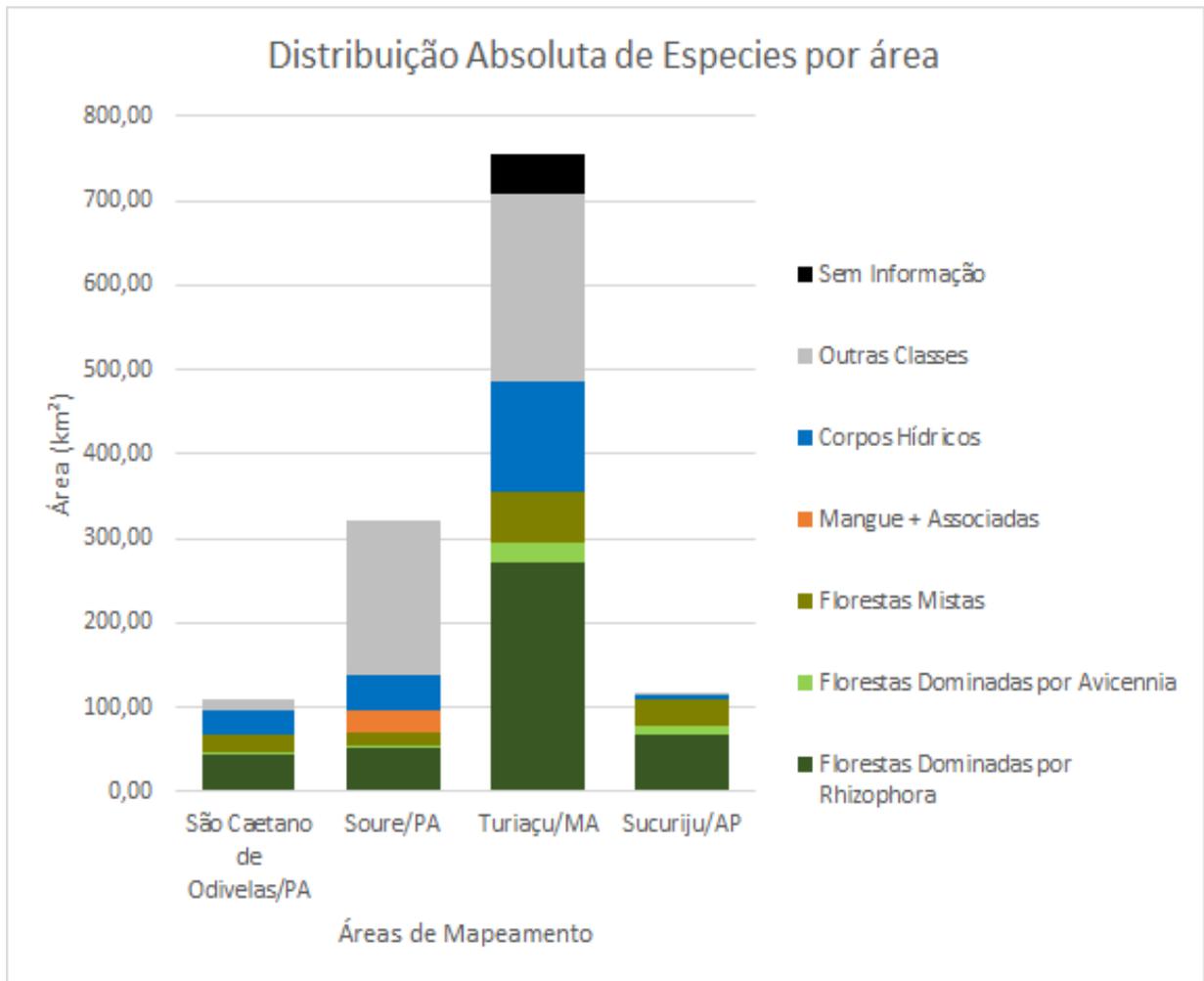


Figura 10-45: Distribuição absoluta por classe do mapeamento de cada uma das áreas.

O mapeamento em alta resolução do estuário de São Caetano de Odivelas (Figura 10-46 e Figura 10-47), que compreende 110,51 km², mostra que as florestas dominadas por *Rhizophora* spp. e as florestas mistas são as que ocupam as maiores áreas; com respectivamente, 42,80 km² e 20,34 km², enquanto as florestas de *Avicennia germinans* (4,37 km²) são encontradas somente em áreas bem específicas do estuário (Tabela 10-8).

A distribuição de espécies indica um comportamento espacial distinto de ocupação das florestas ao longo do estuário, principalmente nas porções leste e oeste. A porção leste do estuário, às margens do rio Mocajuba, apresenta maior contribuição de florestas dominadas por *Rhizophora* spp., que está presente em quase toda extensão das margens. As florestas mistas estão presentes mais no interior da floresta, em manchas menores que as observadas na porção oeste.

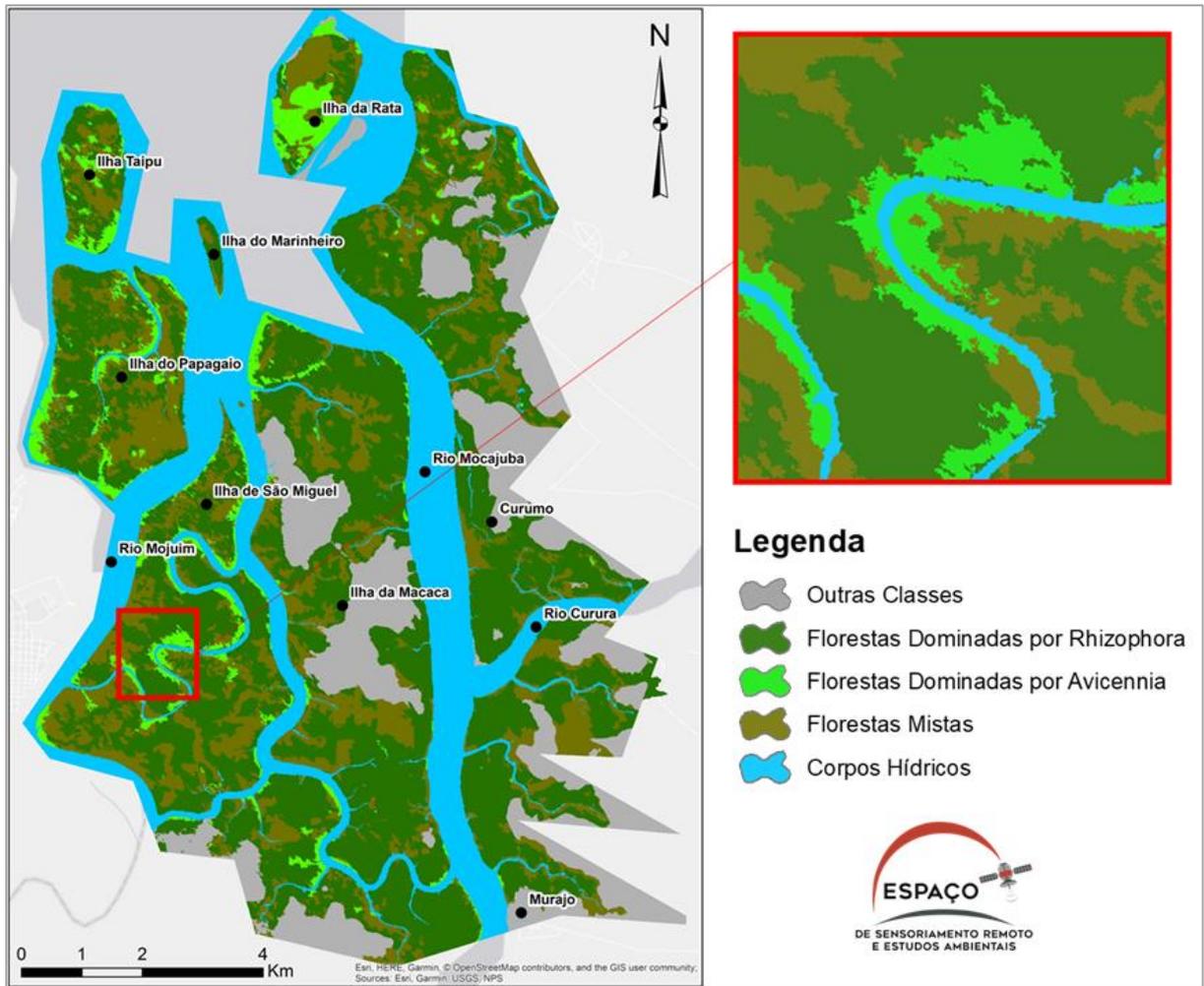


Figura 10-46: Mapeamento das florestas de mangue segundo a composição de espécies no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), em destaque área dominada por *Rhizophora* e *Avicennia*.

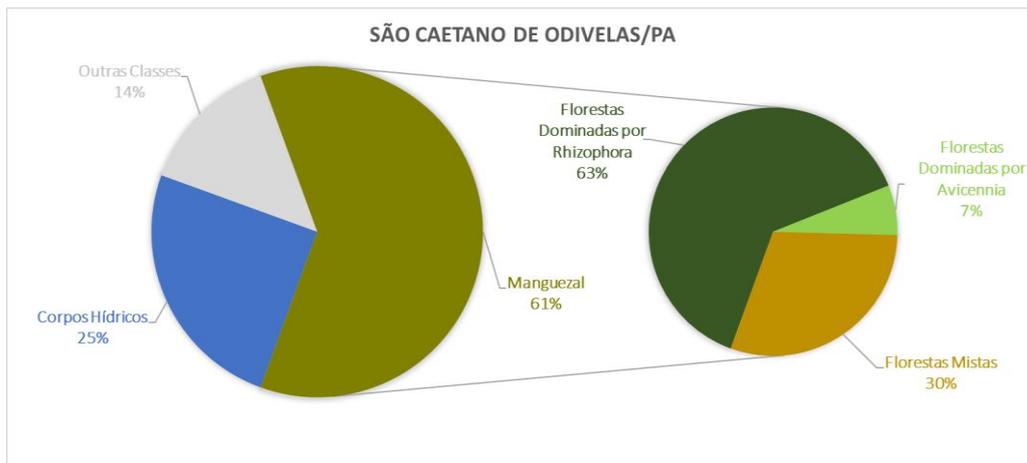


Figura 10-47: Distribuição relativa das classes no estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

A distribuição de espécies indica um comportamento espacial distinto de ocupação das florestas ao longo do estuário, principalmente nas porções leste e oeste. A porção leste do estuário, às margens do rio

Mocajuba, apresenta maior contribuição de florestas dominadas por *Rhizophora* spp., que está presente em quase toda extensão das margens. As florestas mistas estão presentes mais no interior da floresta, em manchas menores que as observadas na porção oeste.

Outra diferença é a presença de florestas dominadas por *Avicennia germinans*, que aparecem exclusivamente na porção oeste e em áreas a jusante do estuário. Ressalta-se que estas florestas são observadas nas maiores ilhas (Ilha do Papagaio, São Miguel e da Macaca), nas ilhas e porções norte do estuário e em uma pequena porção no fundo do estuário.

A baía de Turiaçu, cujos resultados estão apresentados nas Figura 10-48 e Figura 10-49, foi a maior área mapeada em alta resolução (755,28 km²). Uma dificuldade no mapeamento dessa área foi a presença constante de nuvens, que impossibilitou o acesso à informação de cobertura de certas porções da baía, sendo essas áreas mapeadas como "sem informação".

A ocupação entre as espécies nesse estuário apresenta características semelhantes às descritas para o estuário de São Caetano de Odivelas, na qual florestas dominadas por *Rhizophora* spp. e florestas mistas são as que ocupam as maiores áreas, com 270,19 km² e 60,61 km², respectivamente. A diferença, entretanto, é que, embora sejam as classes predominantes, não apresentam a mesma proporcionalidade da área anteriormente descrita. Na baía de Turiaçu, as florestas de *Rhizophora* spp. ocupam mais de 75% dos manguezais, enquanto que no estuário de São Caetano de Odivelas esta proporção é de 60%.

As florestas dominadas por *Avicennia* spp. ocupam a menor área (24,34 km²) e estão presentes somente em certas localidades do estuário. Enquanto as florestas de *Rhizophora* spp. e mistas se distribuem por todo o estuário, variando de proporção, mas sem um padrão perceptível, as florestas de *Avicennia* spp. se restringem às ilhas do estuário principal, no fundo da baía do rio Turiaçu, e nas reentrâncias do rio Bitiua, próximo a Ponta Seca, além de serem observadas em pequenos fragmentos nas proximidades de Turiaçu.

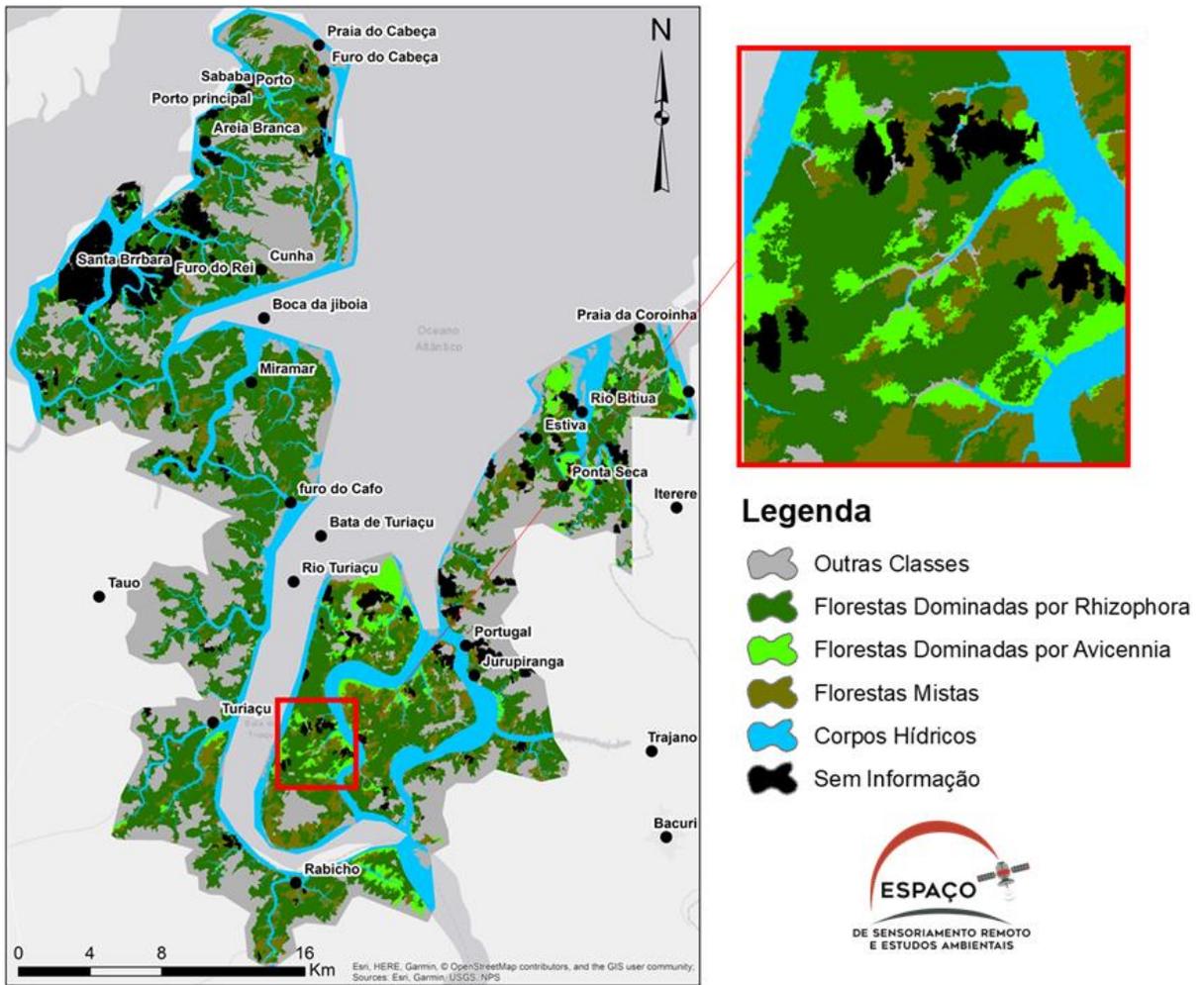


Figura 10-48: Mapeamento das florestas de mangue segundo a composição de espécies na baía de Turiçu (MA), em destaque uma área com ocorrência de *Avicennia* spp.

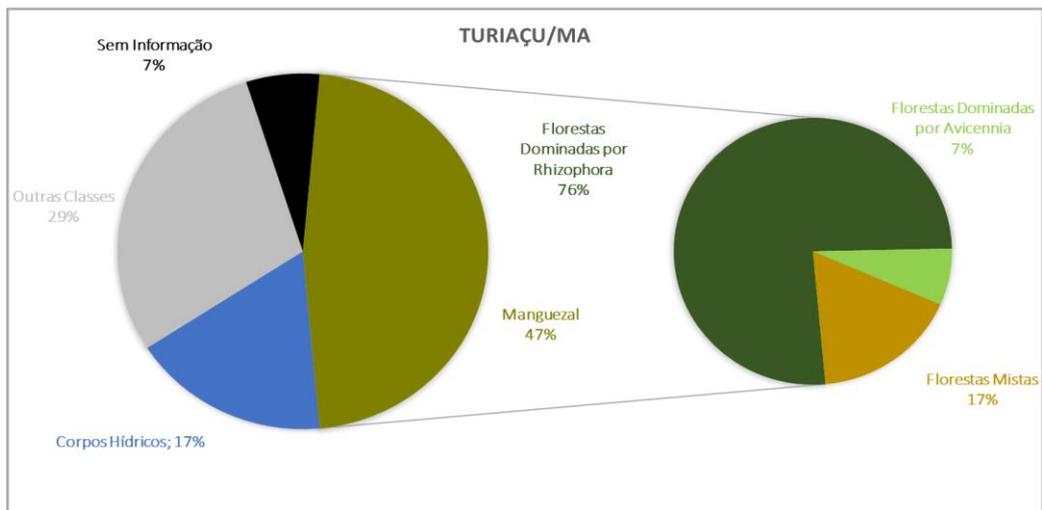


Figura 10-49: Distribuição relativa das classes na baía de Turiçu (MA).

No sistema costeiro de Soure (Figura 10-50, Figura 10-51 e Figura 10-52), segunda maior área mapeada (321,71 km²) o padrão de distribuição das florestas de mangue é característico por apresentar uma classe adicional: vegetação associada com presença de mangue. Nessa área as florestas de *Rhizophora* spp. dominam o ambiente (com 53,03 km²), enquanto a classe vegetação associada com presença de mangue, a segunda maior área (com 25,33 km²), ocupa 8% da área mapeada. As florestas mistas e dominadas por *Avicennia germinans* têm áreas de 15,87 km² e 2,45 km², respectivamente.

Como apresentado no mapeamento de meso resolução, esse sistema possui características distintas nos dois compartimentos estudados (costa leste e costa norte). Somente na vertente leste encontram-se florestas dominadas por *Avicennia germinans*, ocorrendo desde o limite a sul do mapeamento (próximo a Soure) até o final (ao norte) das margens do rio Pará (ponto mais a jusante do estuário). É também às margens desse rio que se encontram as maiores áreas de manguezais, presentes de maneira contínua ao longo de toda essa margem.

Na vertente norte, só as duas classes mais mapeadas (florestas dominadas por *Rhizophora* spp. e vegetação associada com presença de mangue), são encontradas, normalmente de forma conjunta e descontínua ao longo da costa. Nesse segmento da costa, indivíduos de grande porte de *Avicennia germinans* são encontrados de forma isolada ou em pequenas populações em meio a vegetação de várzea, como veremos em maior detalhe na descrição das fitofisionomias no Capítulo 11.

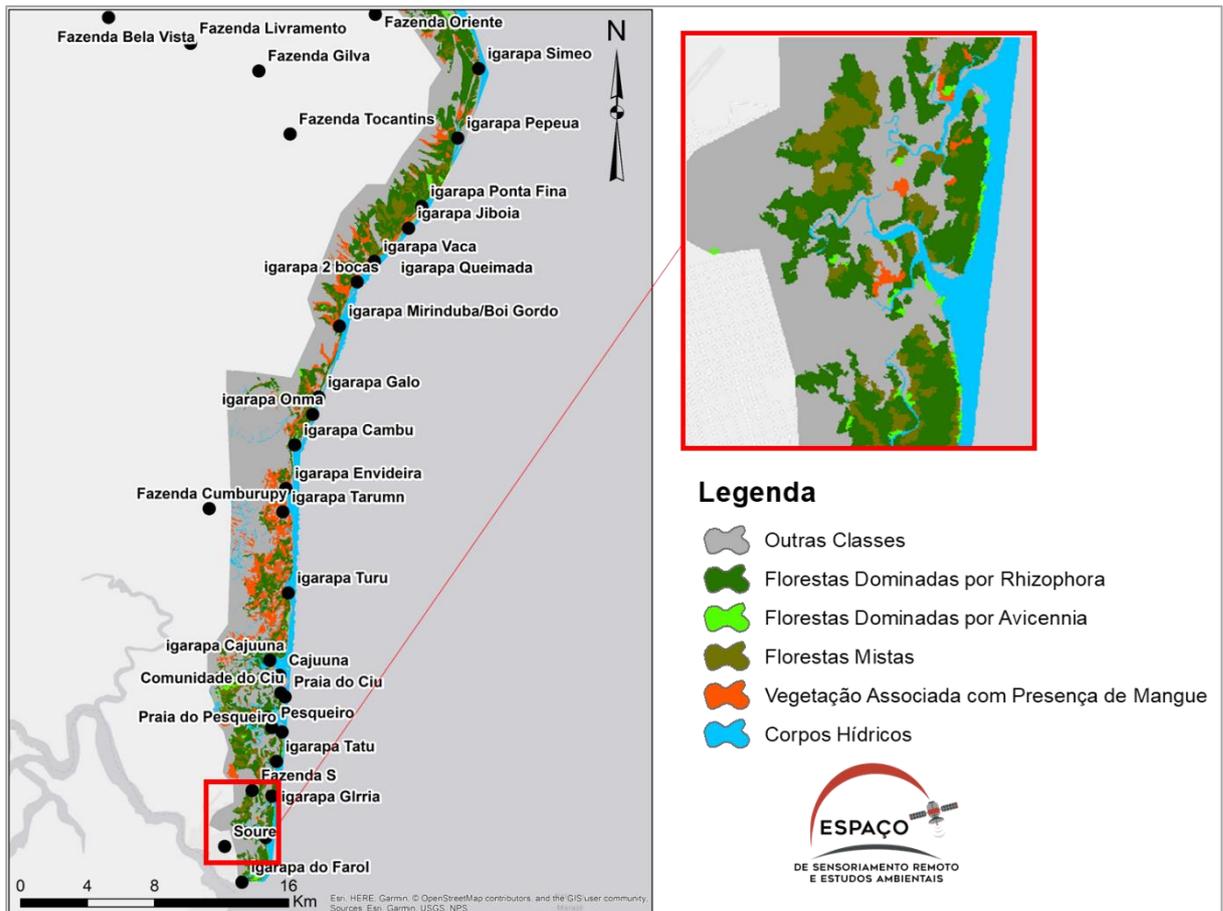


Figura 10-50: Mapeamento das florestas de mangue segundo a composição de espécies na vertente leste do sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA), em destaque área próxima a Soure com ocorrência das 4 (quatro) classes de vegetação.

Como apresentado no mapeamento de meso resolução, esse sistema possui características distintas nos dois compartimentos estudados (costa leste e costa norte). Somente na vertente leste encontram-se florestas dominadas por *Avicennia germinans*, ocorrendo desde o limite a sul do mapeamento (próximo a Soure) até o final (ao norte) das margens do rio Pará (ponto mais a jusante do estuário). É também às margens desse rio que se encontram as maiores áreas de manguezais, presentes de maneira contínua ao longo de toda essa margem.

Na vertente norte, só as duas classes mais mapeadas (florestas dominadas por *Rhizophora* spp. e vegetação associada com presença de mangue), são encontradas, normalmente de forma conjunta e descontínua ao longo da costa. Nesse segmento da costa, indivíduos de grande porte de *Avicennia germinans* são encontrados de forma isolada ou em pequenas populações em meio a vegetação de várzea, como veremos em maior detalhe na descrição das fitofisionomias no Capítulo 11.

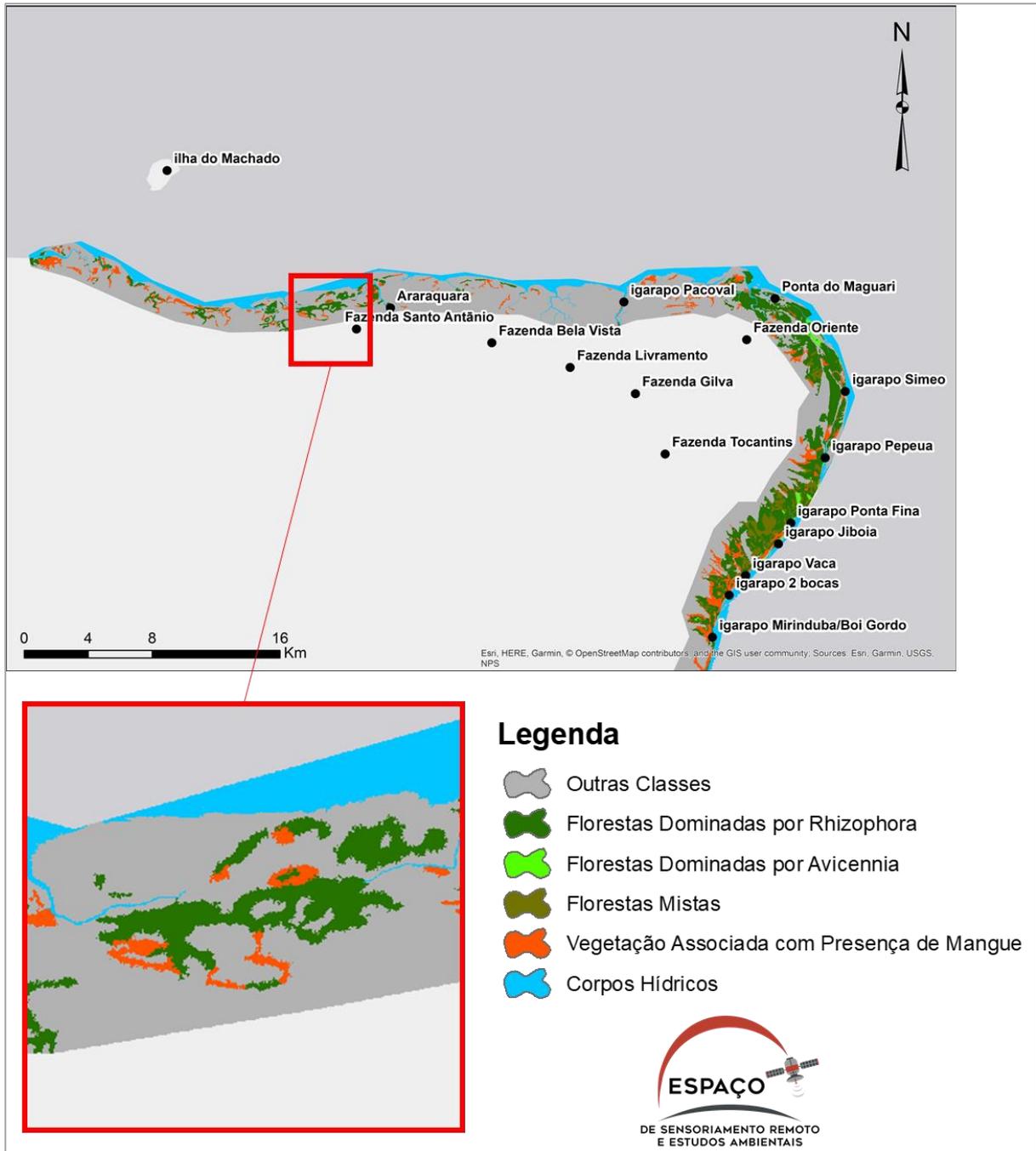


Figura 10-51: Mapeamento das florestas de manguê segundo a composição de espécies na vertente norte do sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA), em destaque área com concentração de florestas dominadas por *Rhizophora* spp.

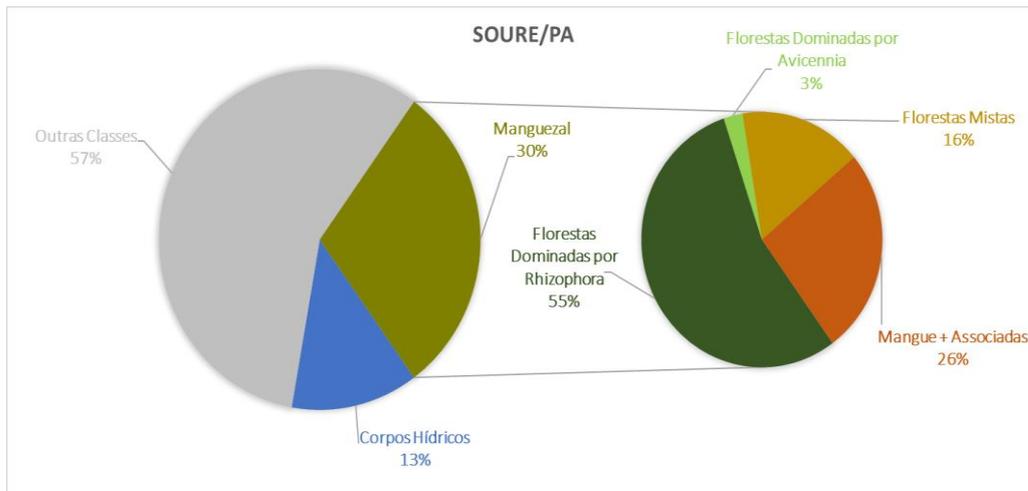


Figura 10-52: Distribuição relativa das classes no sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA).

O sistema costeiro de Sucuriju (Figura 10-53 e Figura 10-54) foi o menor em área mapeada (118,1 km²), apresentando proporcionalidade de ocupação entre os tipos de florestas, de forma semelhante ao estuário de São Caetano de Odivelas. As áreas de florestas dominadas por *Rhizophora* spp., florestas mistas e florestas dominadas por *Avicennia germinans* no sistema costeiro de Sucuriju ocupam, respectivamente, 66,86 km², 12,35 km² e 29,37 km².

O mapeamento apresenta ainda uma distribuição das classes em faixas paralelas à costa iniciando, do sentido da margem para o interior do continente, com as florestas dominadas por *Avicennia germinans*, seguidas pelas florestas mistas, até as áreas dominadas por *Rhizophora* spp.

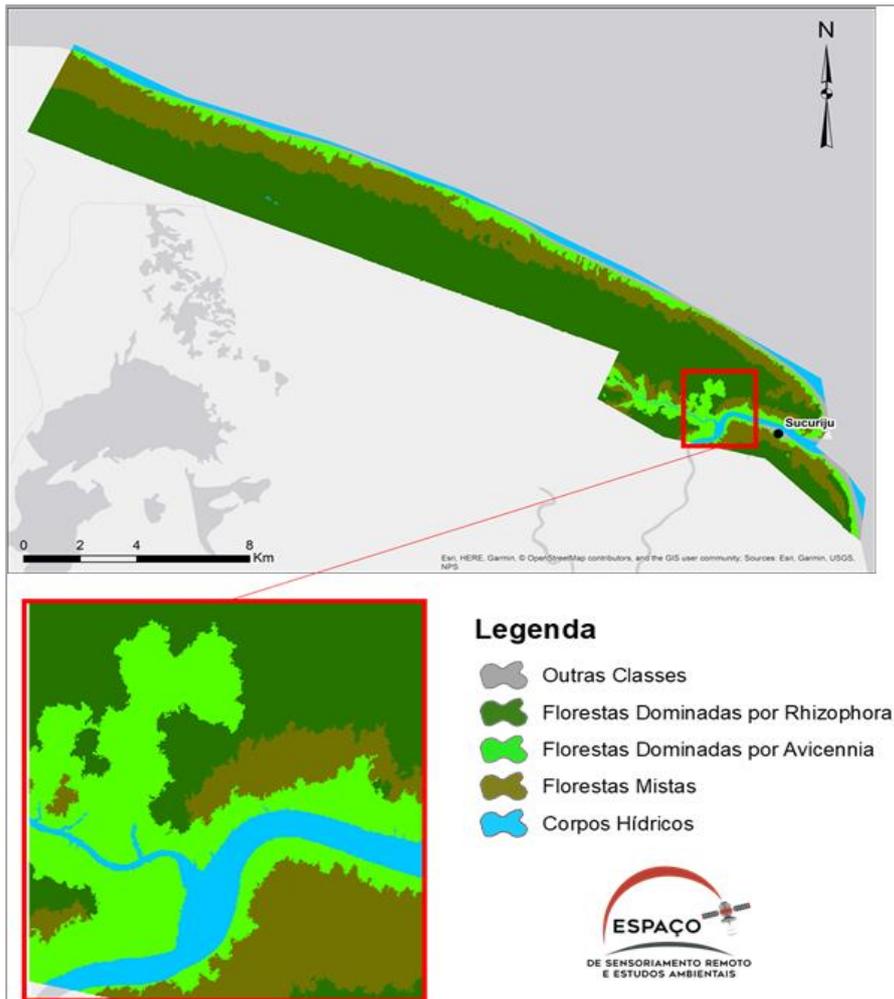


Figura 10-53-Mapeamento das florestas de manguê segundo a composição de espécies no sistema costeiro de Sucuriçu (AP), em destaque a distribuição de espécies próximo a Sucuriçu.

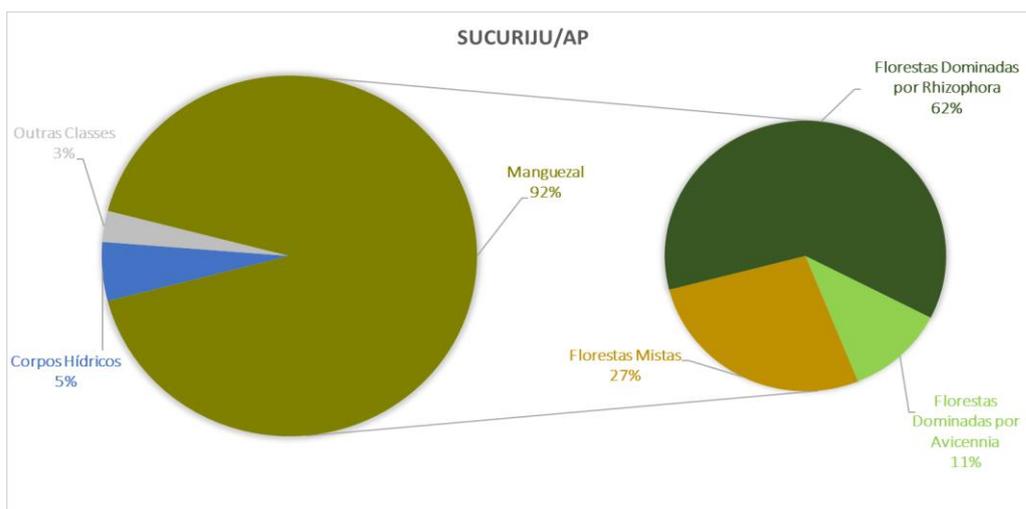


Figura 10-54: Distribuição relativa das classes no sistema costeiro de Sucuriçu (AP).

10.5. Mapeamento das fitofisionomias de manguezal

Antes da apresentação dos mapas e resultados provenientes dos mapeamentos de fitofisionomias, a Tabela 10-9 apresenta os resultados obtidos com o processo de generalização criado no âmbito desse projeto.

A redução no número de polígonos foi de cerca de 99% para todas as áreas, não só pela eliminação de polígonos menores, como pela aglutinação desses, elevando assim a área média de polígonos em cada uma das áreas e diminuindo significativamente a presença de polígonos pequenos que pudessem interferir na compreensão do mapeamento de fitofisionomias.

Tabela 10-9: Comparativo do número de polígonos antes e depois da generalização.

Generalização		Mapeamento de Fitofisionomias			
		SCO	SOU	SUC	TUR
Quantidade de polígonos totais	Sem Generalização	2.366.294	2.302.460	3.159.558	12.122.773
	Com Generalização	9.959	13.118	11.146	46.058
	Redução (%)	99,58	99,43	99,65	99,62
Quantidade de polígonos <100m ²	Sem Generalização	2.295.578	2.194.867	3.027.202	11.704.805
	Sem Generalização (%)	97,01	95,33	95,81	96,55
	Com Generalização	589	72	16	141
	Com Generalização (%)	5,91	0,55	0,14	0,31
Área média dos polígonos (m ²)	Sem Generalização	44,31	101,07	36,98	56,27
	Com Generalização	10.530,10	17.740,16	10.485,38	14.813,08

As Figura 10-55, Figura 10-56, Figura 10-57 e Figura 10-58 apresentam o mapeamento das faixas de altura das florestas de mangue a partir dos de LiDAR para cada uma das áreas. Destaca-se o grande detalhamento que o LiDAR permitiu na análise do desenvolvimento estrutural das florestas estudadas, onde é possível ver áreas consolidadas de uma determinada faixa de altura, mas com grande detalhamento em seu interior, demonstrando a grande diversidade estrutural em ambientes de manguezal. Entretanto, a complexidade que esse dado traz em termos de informação estrutural é proporcional ao detalhamento alcançado, representado por inúmeros polígonos pequenos. O processo de generalização é considerado fundamental para a compreensão de padrões, mensuração de classes e integração com outros dados.

Por isso nos aprofundaremos aqui na apresentação dos resultados generalizados e combinados com o mapeamento das espécies de mangue, ou seja, no mapeamento das fitofisionomias em si.

As Figura 10-55, Figura 10-56, Figura 10-57 e Figura 10-58 apresentam os resultados finais dos testes realizados para classificação das faixas de altura das florestas de mangue. Com exceção do sistema costeiro de Sucuriju, todas as demais áreas foram estruturadas em 4 classes de alturas. No sistema costeiro de Sucuriju foi acrescentada uma classe para delimitar a zona de franja da floresta que está submetida a

processo erosivo. A definição destes limites, conforme o já apresentado, foi feita através do *Natural Breaks*. Este produto, extremamente detalhado, apresenta uma riqueza de informação muito grande que pode ser retomada para outras finalidades. A observação das 4 áreas, a partir de uma visão geral e de pequenos recortes em Zoom, permite a percepção de diferenças significativas entre elas. O detalhamento destas variações estruturais será realizado a partir dos mapas de fitofisionomias de cada área, a seguir.

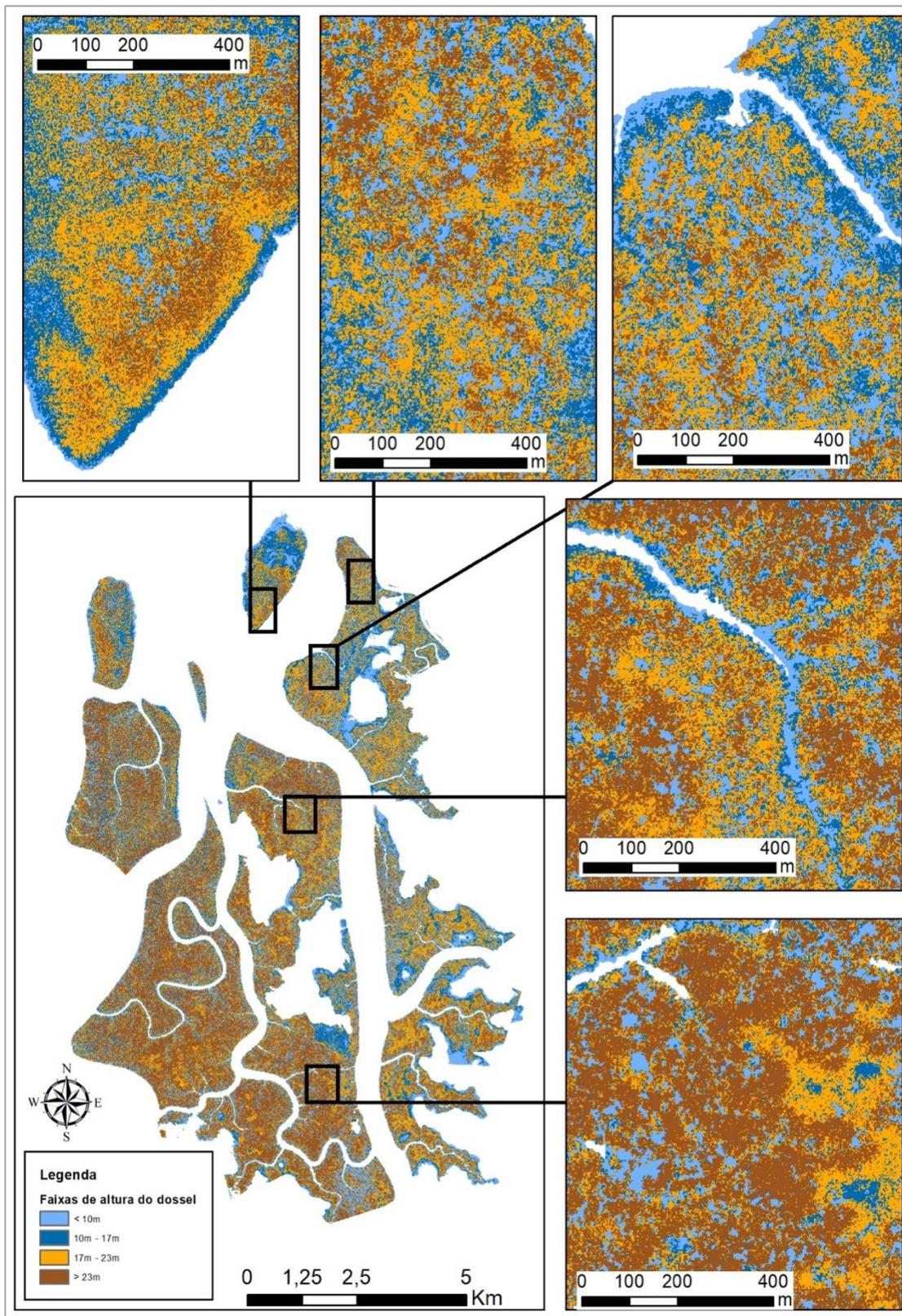


Figura 10-55: Mapeamento das faixas de altura do dossel das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

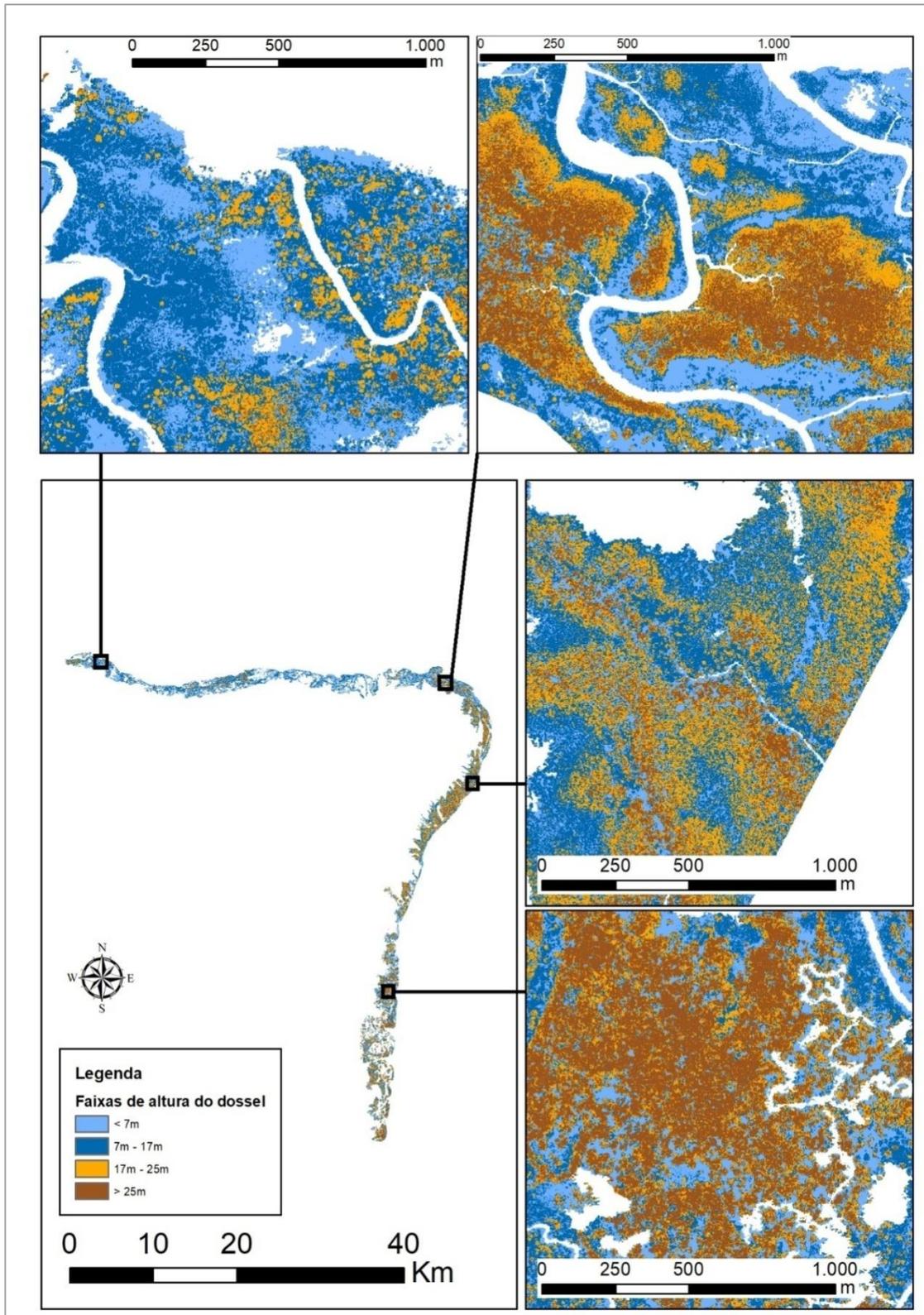


Figura 10-56: Mapeamento das faixas de altura do dossel das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó, (PA).

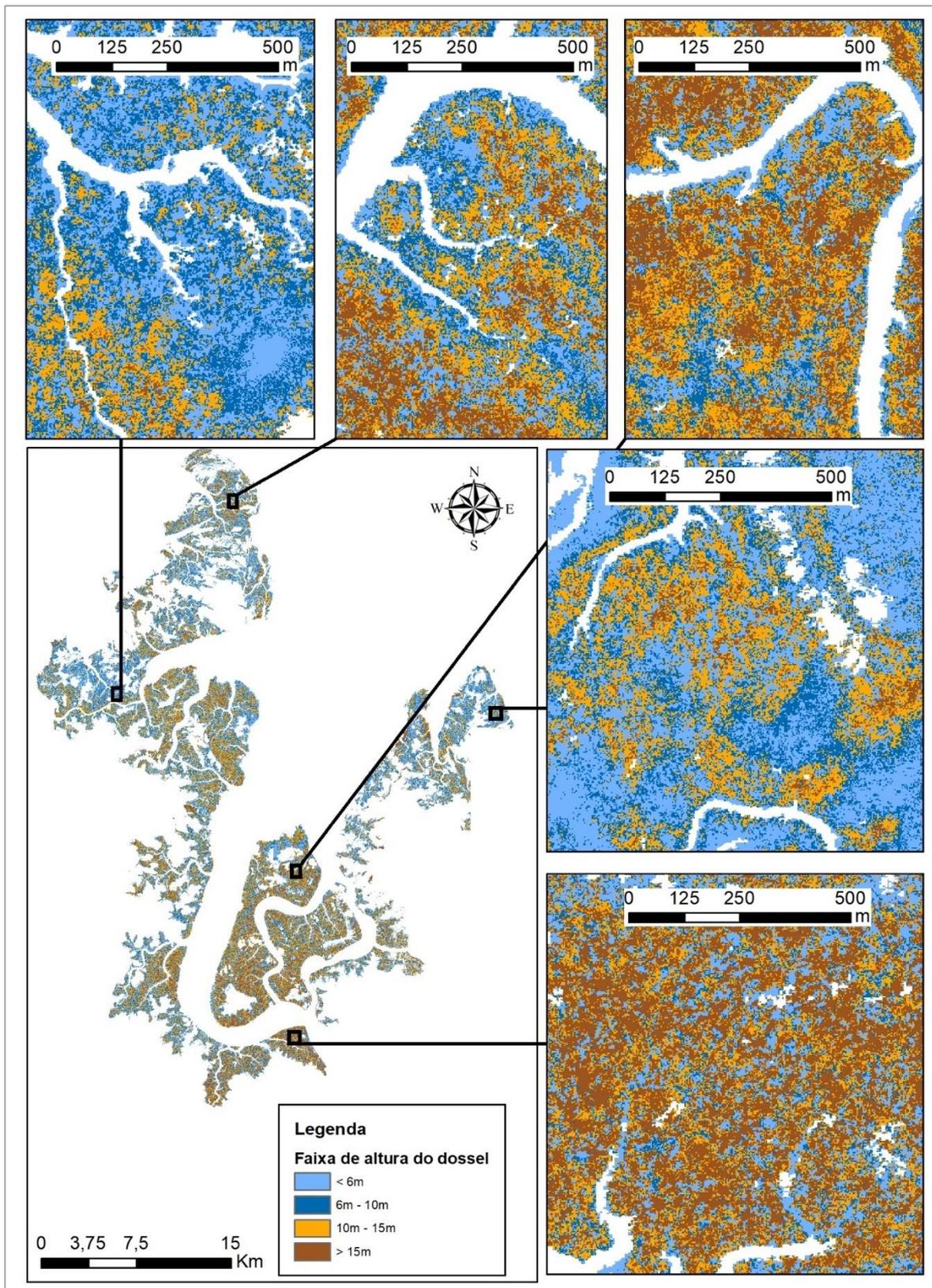


Figura 10-57: Mapeamento das faixas de altura do dossel das florestas de mangue na baía de Turiaçu (MA).

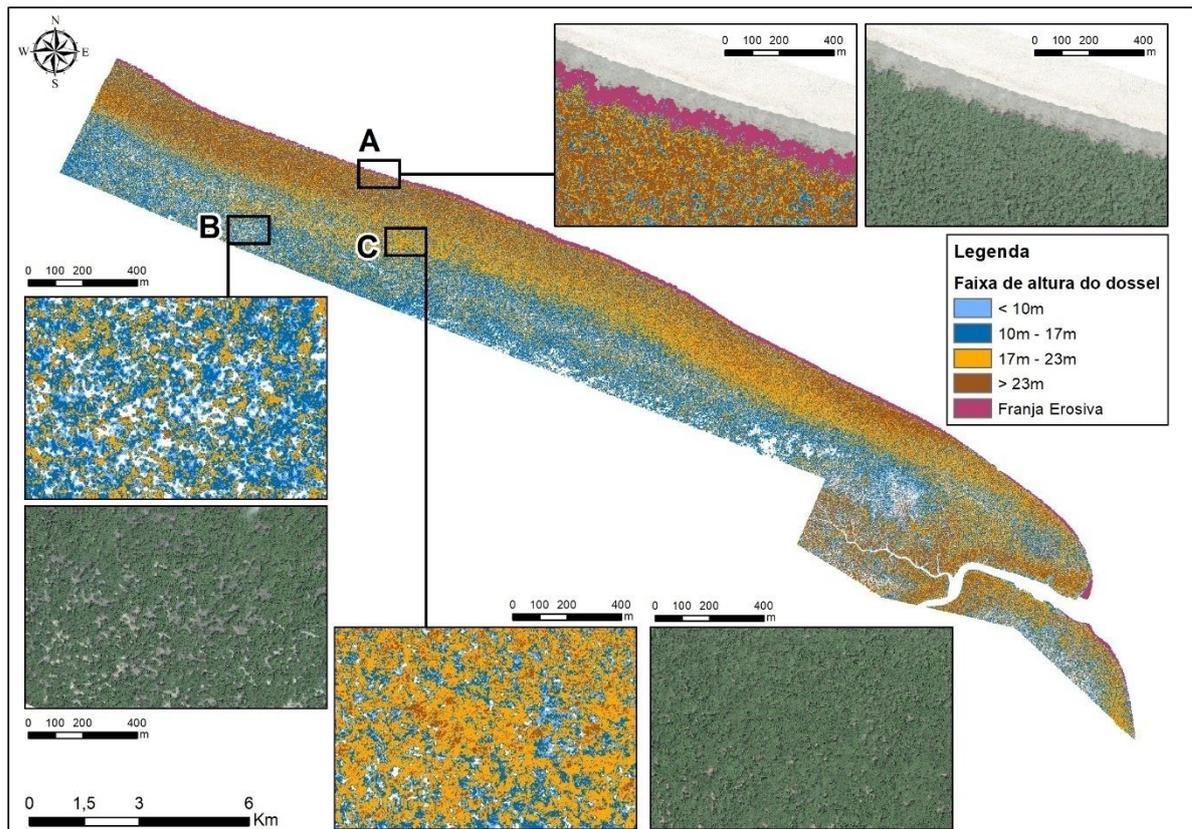


Figura 10-58: Mapeamento das faixas de altura do dossel das florestas de mangue no sistema costeiro de Sucuriju (AP).

Conforme mencionado na metodologia, após o mapeamento do desenvolvimento estrutural (utilizando os dados de altura das árvores adquiridos pelo levantamento por LiDAR) estes foram combinados com os mapeamentos de espécies de mangue para a definição das fitofisionomias. As Figura 10-59, Figura 10-61, Figura 10-63 e Figura 10-65 mostram os mapeamentos de fisionomias (generalizados) das áreas do estuário de São Caetano de Odivelas, sistema costeiro do Soure, baía de Turiaçu e sistema costeiro de Sucuriju, respectivamente. Na mesma ordem, as Figura 10-60, Figura 10-62, Figura 10-64 e Figura 10-66 ilustram graficamente a proporção de ocupação de cada uma das fitofisionomias mapeadas.

Também como parte dos resultados, a Tabela 10-10 e a Figura 10-67 sintetizam os resultados numéricos por classe de altura de dossel em cada uma das 4 áreas. Cabe lembrar que, para viabilizar a comparação entre as áreas, foram adotadas as classes qualitativas segundo apresentado por Pellegrini *et al.* (2009), sendo esta a razão das faixas de altura serem substituídas na Tabela 10-10 e na Figura 10-67 pelas classes de desenvolvimento estrutural: Máximo; Alto; Intermediário e Baixo.

No estuário de São Caetano de Odivelas, a Figura 10-60 indica que a maior contribuição nas áreas dominadas por *Rhizophora* spp. são florestas com dossel com altura superior a 23 metros (19,53 km²), máximo desenvolvimento estrutural, seguido por florestas com alto desenvolvimento estrutural (entre 17 e 23 metros). Entre essas duas classes e a de menor desenvolvimento, tem-se os indivíduos entre 10 e 17 metros (desenvolvimento estrutural intermediário) que são menos presentes nas florestas dominadas por essa espécie, ocupando uma área de 7,76 km².

As florestas Mistas possuem proporcionalidade de classes de altura semelhante às dominadas por *Rhizophora* spp., com maior presença de indivíduos com máximo desenvolvimento estrutural (7,75 km²), enquanto as florestas entre 17 e 23 metros são a segunda maior área (6,05 km²). Há diferença, entretanto, na proporção das florestas mistas menos desenvolvidas, onde a menor ocupação é de árvores menores que 10 metros.

As florestas dominadas por *Avicennia germinans* apresentam comportamento diferente, com uma ocupação ligeiramente maior de florestas com alto desenvolvimento estrutural (entre 17 e 23 metros), estando as outras classes com contribuições muito semelhantes, de 0,96 km², 1,02 km² e 0,82 km² para florestas com desenvolvimento estrutural máximo, intermediário e baixo, respectivamente. Essa análise demonstra que a maior parte das florestas do estuário de São Caetano de Odivelas são bem desenvolvidas estruturalmente (florestas de alto e máximo desenvolvimento estrutural), com cerca de 70% da área de mangue nas duas classes mais desenvolvidas.

Uma análise espacial de distribuição dessas classes também indica certos padrões interessantes (Figura 10-59). Em relação ao estuário, percebe-se que é na porção leste, às margens do rio Mocajuba, que as florestas possuem um desenvolvimento estrutural menor. Isto se dá principalmente em relação às florestas dominadas por *Rhizophora* spp., já que estas ocupam grande parte dessa região. Ali, as florestas de *Rhizophora* spp. apresentam predominantemente um dossel intermediário, enquanto nas Ilhas da Macaca e de São Miguel foram mapeadas amplas áreas que alcançam um desenvolvimento estrutural máximo.

A distribuição espacial por espécie também se mostra interessante na medida que indica um grau de desenvolvimento estrutural na direção margem dos rios/canais para o interior. Tal comportamento é perceptível para todos os tipos de dominância de espécies. Assim, o que se percebe são florestas menos desenvolvidas na margem (baixos, intermediários ou altos), seguidas por florestas com maior desenvolvimento estrutural (intermediários, altos ou com máximo desenvolvimento).

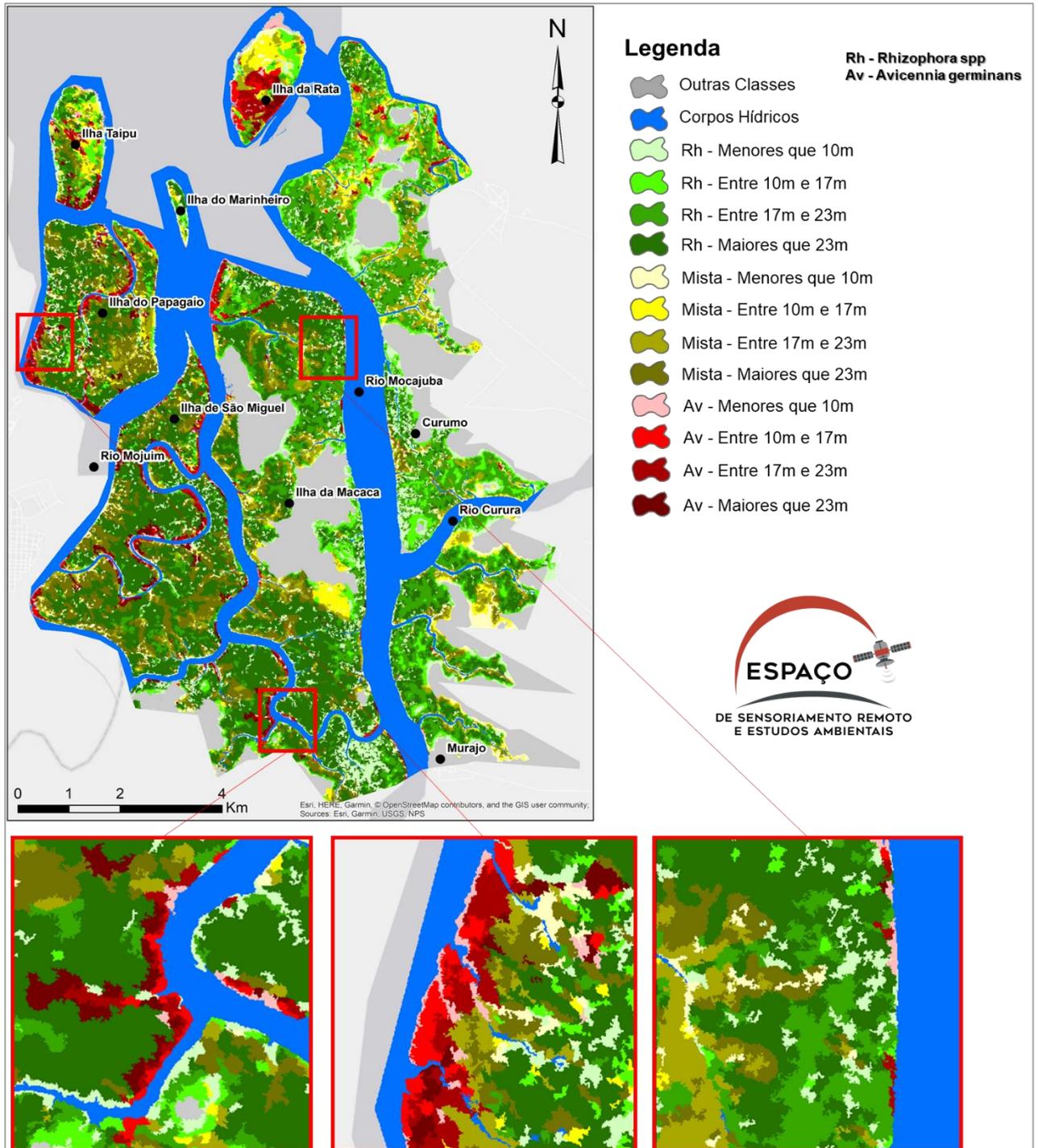


Figura 10-59: Mapeamento de fitofisionomias dos manguezais do estuário de São Caetano de Odivelas (PA), em destaque exemplos da ocupação das fitofisionomias nas margens dos rios e no interior do continente. Rh: *Rhizophora* spp.; Av: *Avicennia* spp.

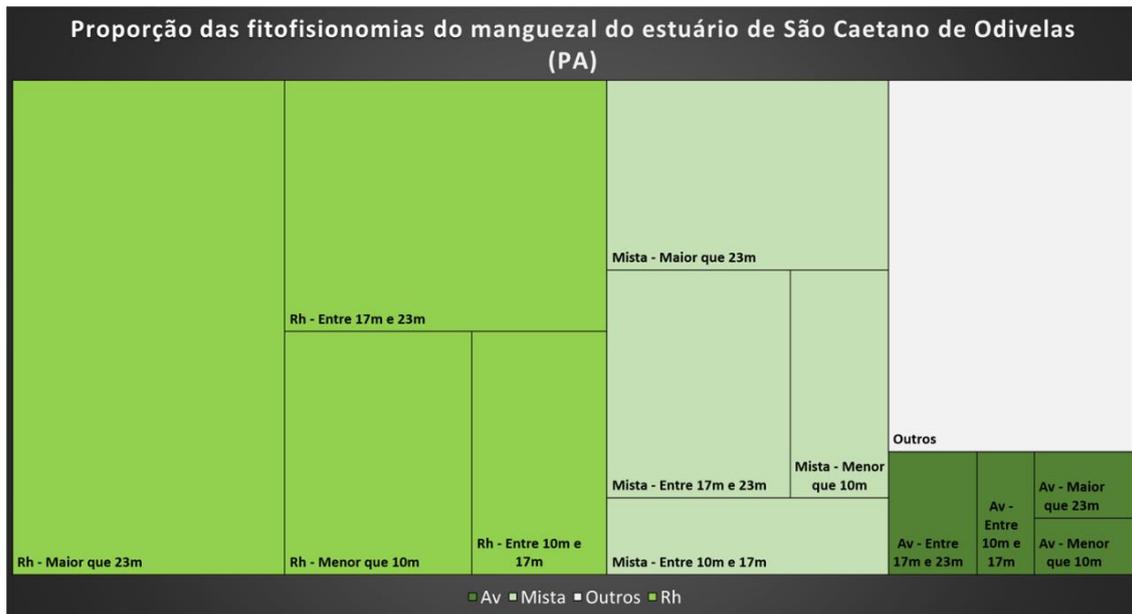


Figura 10-60: Contribuição das fitofisionomias do manguezal no estuário de São Caetano de Odivelas (PA).
Rh: *Rhizophora* spp.; Av: *Avicennia* spp.

Na baía de Turiaçu, percebe-se que nas áreas dominadas por *Rhizophora* spp. há o predomínio da classe com baixo desenvolvimento estrutural, menor que 6 metros, ocupando 107,94 km² (Figura 10-62). A segunda classe mais comum é aquela com desenvolvimento estrutural alto (89,0653 km²), entre 10 e 15 metros. As florestas com máximo desenvolvimento estrutural, com dossel superior a 15 metros, ocupam as menores áreas dominadas por *Rhizophora* spp., 29,85 km² no total.

Em relação às florestas mistas, assim como as florestas dominadas por *Rhizophora* spp., é a fitofisionomia com dossel inferior a 6 metros a mais representativa (22,13 km²). No entanto, a segunda classe mais extensa possui área muito próxima a essa, são as florestas com alto desenvolvimento estrutural (entre 10 e 15 metros), abrangendo 20,84 km². As duas fisionomias menos frequentes também apresentam valores próximos, sendo de 10,83 km² e 6,36 km², de áreas com desenvolvimento máximo e intermediário, respectivamente.

Todas as fisionomias com dominância de *Avicennia* spp. ocupam, cada uma, menos de 10 km², com contribuição de área inferior às descritas até aqui. Assim como as características identificadas para as florestas mistas e àquelas dominadas por *Rhizophora* spp., aqui também há predominância das fisionomias com baixo (menores que 6 metros) e alto (entre 10 e 15 metros) desenvolvimento estrutural, ocupando respectivamente, 9,23 km² e 7,58 km². As florestas com máximo (5,08 km²) e intermediário (2,29 km²) desenvolvimento estrutural ocupam as menores áreas desse estuário.

Considerando-se todo o manguezal mapeado na baía de Turiaçu, observa-se um predomínio de florestas com baixo desenvolvimento estrutural (59,47 %), que somadas às florestas de desenvolvimento intermediário indicam que cerca de 53,75 % das florestas mapeadas nessa região possui altura do dossel inferior a 10 metros.

A distribuição espacial das classes na baía de Turiaçu (Figura 10-61) indica ainda que porções mais expostas do estuário (mais à jusante) possuem predominância de florestas com menor desenvolvimento estrutural em comparação às florestas de mangue mais à montante. Na área entre Santa Bárbara e Sababa, por exemplo, percebe-se extensas áreas com baixo ou intermediário desenvolvimento estrutural (menor que 6 metros ou entre 6 e 10 metros), já nas proximidades de Miramar, essa proporção muda, e florestas mais desenvolvidas são mais frequentes.

Considerando a distribuição espacial de fitofisionomias com a mesma dominância de espécies, um comportamento semelhante ao do estuário de São Caetano de Odivelas é observado, na medida que florestas menos desenvolvidas são mais frequentes nas margens e em áreas de transição da floresta com o continente e planícies hipersalinas. Em contraste a isso, as florestas com maior desenvolvimento estrutural estão distribuídas em regiões mais interioranas, considerando canais e rios.

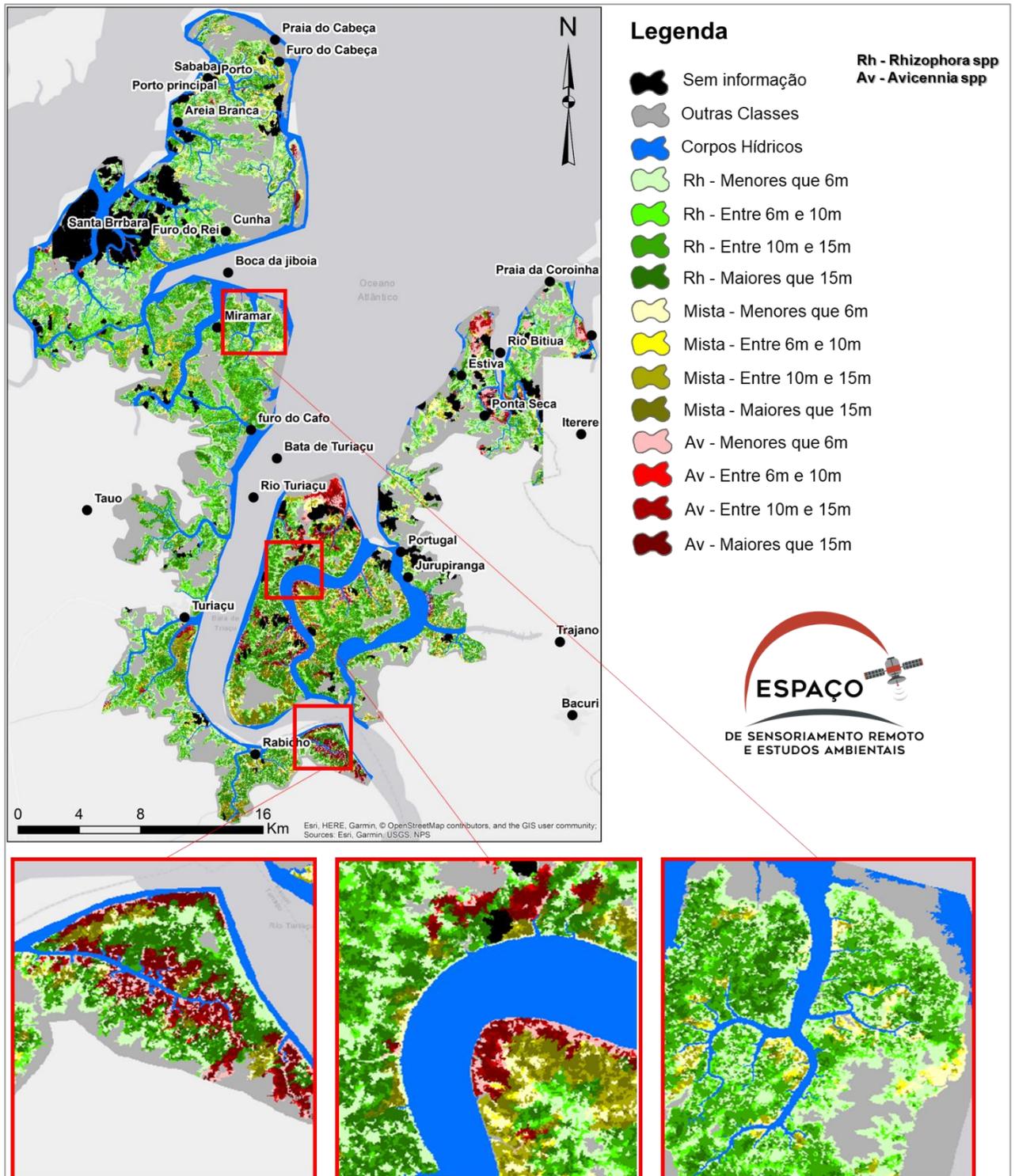


Figura 10-61: Mapeamento de fitofisionomias dos manguezais da baía de Turiçu (MA), em destaque exemplos de ocupações das fitofisionomias. Rh: *Rhizophora* spp.; Av: *Avicennia* spp.

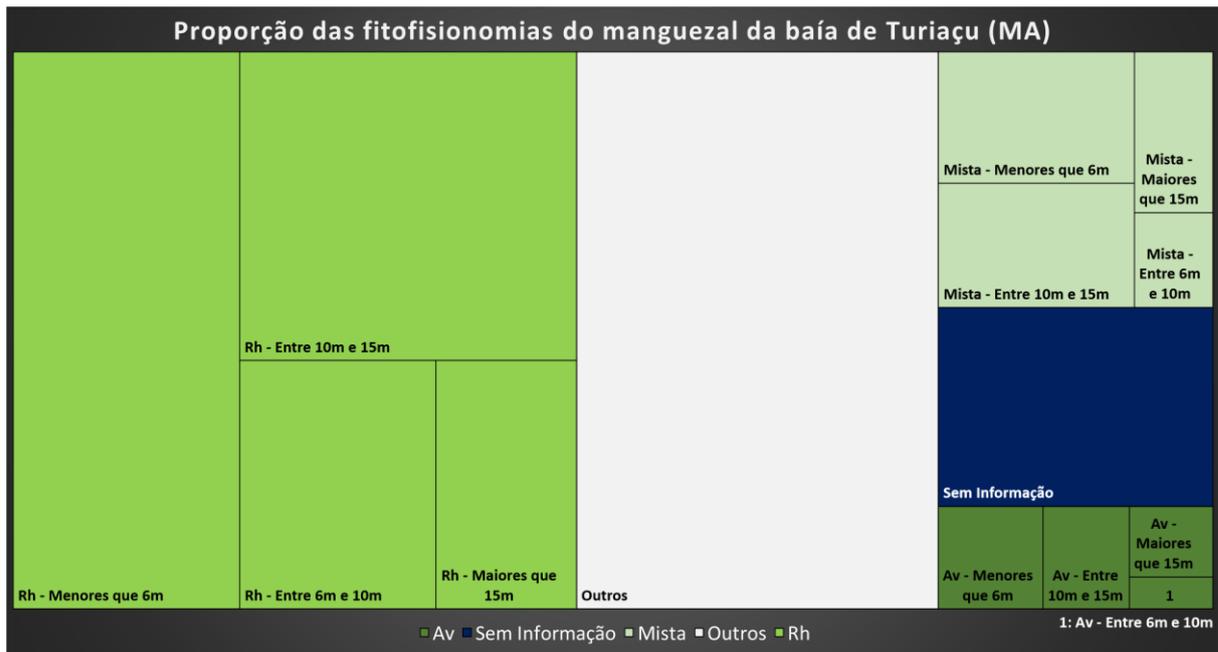


Figura 10-62: Contribuição das fitofisionomias do manguezal na baía de Turiaçu (MA). Rh: *Rhizophora* spp.; Av: *Avicennia* spp.

Em relação às florestas dominadas por *Rhizophora* spp. no sistema costeiro de Soure (Figura 10-64), as maiores áreas são ocupadas por florestas com alto desenvolvimento estrutural (de 17 a 25 metros). A segunda classe de dossel mais frequente ocupa 13,61 km² e, apresenta altura entre 7 e 17 metros (intermediário). As classes de máximo e baixo desenvolvimento estrutural ocupam as menores áreas, 11,65 km² e 8,71 km², respectivamente.

As florestas de mangue com presença de espécies associadas têm a segunda maior extensão. Nessa classe, os desenvolvimentos estruturais intermediário (com 11,06 km²) e baixo (com 7,95 km²) possuem as duas maiores extensões, estas duas classes inclusive possuem áreas muito maiores que as restantes (Figura 10-64).

As florestas mistas possuem distribuição nas classes de desenvolvimento estrutural semelhante àquelas dominadas por *Rhizophora* spp., apresentando áreas de 2,65 km², 3,32 km², 3,70 km² e 6,13 km² para florestas de máximo, baixo, alto e intermediário desenvolvimento estrutural.

Todas as classes de desenvolvimento estrutural de *Avicennia germinans* não chegam a ocupar 3 km² no total, dentro dessa pequena parcela do sistema costeiro de Soure, são as florestas com desenvolvimento estrutural baixo e intermediário que ocupam as maiores áreas, 0,85 km² e 0,84 km², respectivamente.

No sistema costeiro de Soure, constata-se um domínio de florestas com desenvolvimento estrutural intermediário (com altura do dossel entre 7 e 17 metros) e alto (entre 17 e 23m) que ocupam, cada uma, cerca de 31 % da área de manguezal.

Em virtude da alta fragmentação das florestas de mangue desse sistema costeiro, análises de padrões espaciais são mais difíceis. Mas de maneira geral, percebe-se que na vertente norte além das florestas de mangue aparecerem de maneira mais rarefeita, a maior concentração está entre Araraquara e o extremo oeste na área mapeada e nas proximidades da Ponta do Maguari (Figura 10-63). Ali, as classes dominadas

por *Rhizophora* spp., mistas e de mangue + associadas aparecem de forma entremeada, com presença de fragmentos com diferentes alturas de dossel, mas sem um arranjo espacial específico detectável na escala do presente mapeamento. Maiores detalhes sobre a ocorrência de espécies de mangue nessa porção da Ilha de Marajó serão apresentados nas descrições do levantamento de campo, apresentado no capítulo 11.

É no setor leste do sistema costeiro de Soure, a partir das proximidades da Ponta do Maguari, que se percebem maiores e mais contínuas áreas de florestas de mangue. Nesse setor as florestas com maior desenvolvimento estrutural (máximo e alto) não só são mais frequentes como mais extensas.

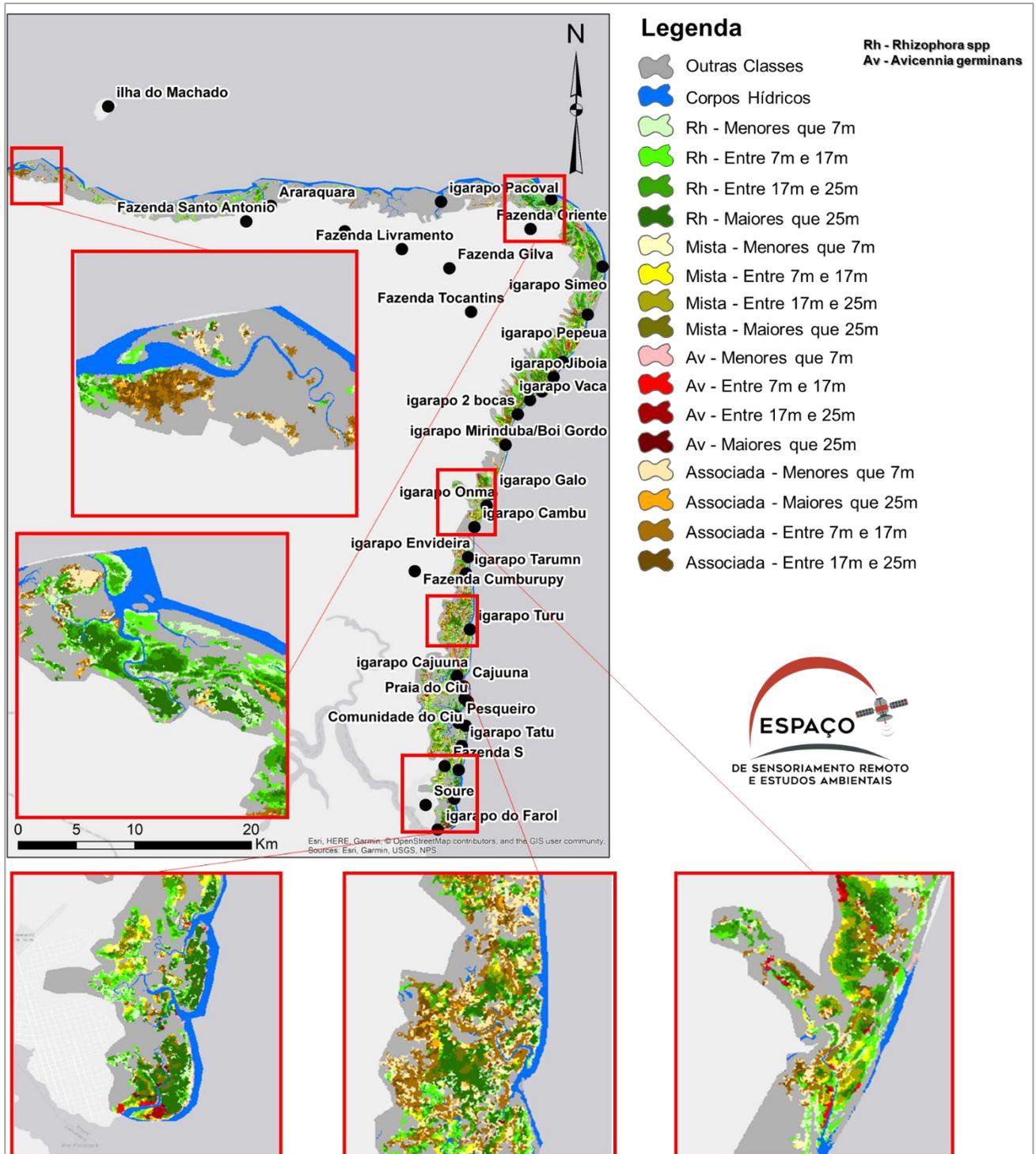


Figura 10-63: Mapeamento de fitofisionomias dos manguezais do sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA). Rh: *Rhizophora* spp.; Av: *Avicennia* spp.

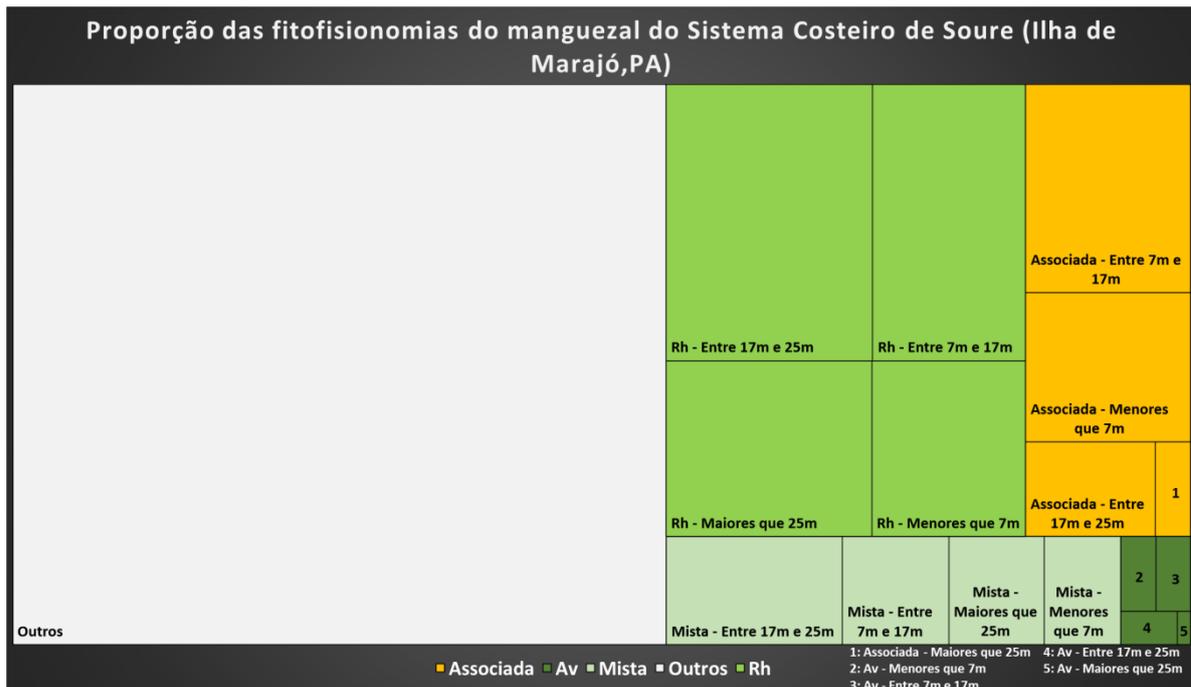


Figura 10-64: Contribuição das fitofisionomias do manguezal no sistema costeiro de Soure, Ilha de Marajó (PA). Rh: *Rhizophora* spp.; Av: *Avicennia* spp.

O mapeamento do sistema costeiro de Sucuriju foi o menor entre as 4 áreas. Nas porções dominadas por *Rhizophora* spp. (Figura 10-66), as florestas com desenvolvimento estrutural intermediário são as mais frequentes (23,75 km²), seguidas das florestas com alto desenvolvimento estrutural (30,05 km²). Cabe ressaltar que, a proporção entre as classes de desenvolvimento estrutural é distinta quando comparamos a ocupação das duas classes mais dominantes, com as duas de menor ocorrência. Enquanto as duas classes mais frequentes têm, cada uma, áreas superiores a 20 km². As restantes possuem áreas muito inferiores, sendo as áreas de florestas com máximo desenvolvimento estrutural e florestas de baixo desenvolvimento estrutural, respectivamente 5,25 km² e 2,68 km².

Para as florestas mistas, aquelas com máximo desenvolvimento estrutural apresentam a maior área (14,03 km²), seguida por florestas com alto desenvolvimento estrutural com alturas entre 17 e 23 metros (12,09 km²). As duas classes restantes são muito menos frequentes: as florestas entre 10 e 17 metros (desenvolvimento estrutural intermediário) que só ocupam 1,62 km² e as de baixo desenvolvimento estrutural com 0,58 km².

As florestas dominadas de *Avicennia germinans* apresentam distribuição em relação à altura do dossel semelhante a das florestas mistas, com florestas com máximo desenvolvimento estrutural (maiores que 23 metros) ocupando uma maior área (5,37 km²), seguidas por florestas de alto desenvolvimento estrutural (2,89 km²) e reduzida contribuição de florestas de desenvolvimento estrutural baixo ou intermediário.

Em linhas gerais os manguezais do sistema costeiro de Sucuriju são dominados por florestas com desenvolvimento estrutural intermediário e alto, que juntas representam cerca de 71 % da cobertura de manguezais da área estudada.

Nessa região, o padrão espacial é bem marcado e característico, dado que não só as classes de espécies são distribuídas em faixas quase paralelas à costa (Figura 10-65), como há também uma distribuição similar em relação às classes relacionadas à altura do dossel (desenvolvimento estrutural). Desse modo, nas margens estão dispostas as florestas dominadas por *Avicennia germinans*, embora se trate de uma faixa estreita, percebe-se que na porção noroeste da costa, as florestas mais baixas encontram-se na margem, justapostas por florestas mais altas. Também no rio à leste da área, percebe-se que as faixas de dossel com desenvolvimento máximo estão em porções mais interioranas da floresta. Após essa faixa dominada por *Avicennia germinans* tem-se as florestas mistas. Percebe-se que na porção noroeste o dossel com máximo desenvolvimento estrutural ocupa as maiores áreas, em comparação com a porção sudeste. Nas florestas dominadas por *Rhizophora* spp., pode-se observar que a altura do dossel diminui para o interior do continente.

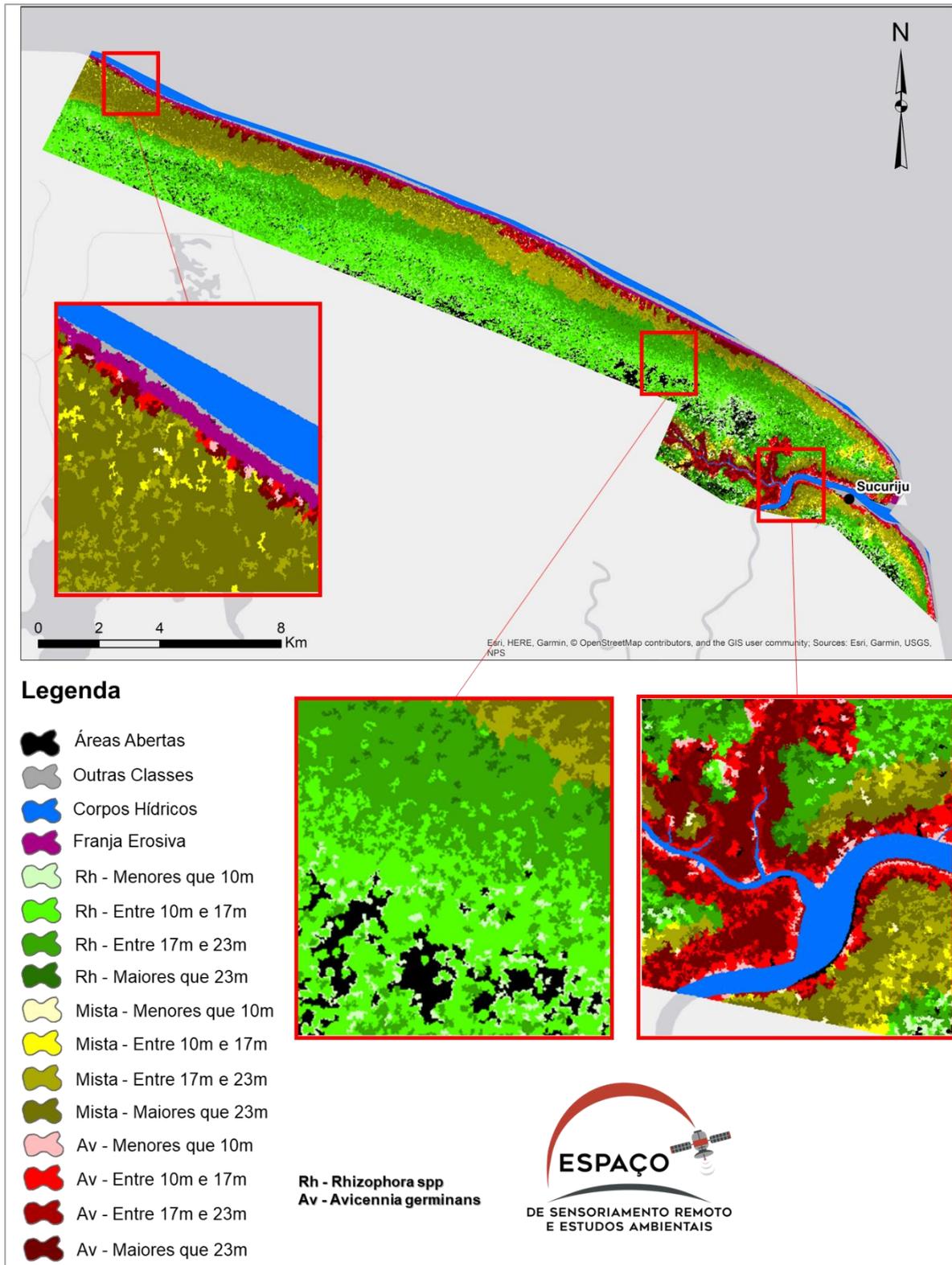


Figura 10-65: Mapeamento de fitofisionomias dos manguezais do sistema costeiro de Sucuriçu (AP). Rh: *Rhizophora* spp.; Av: *Avicennia* spp.



Figura 10-66: Contribuição das fitofisionomias do manguezal no sistema costeiro de Sucuriçu (AP). Rh: *Rhizophora* spp.; Av: *Avicennia* spp.

Tabela 10-10: Área (km²) ocupada pelas diferentes fitofisionomias (representadas pela composição de espécies e pelo desenvolvimento estrutural) para as quatro áreas de estudo.

Composição	Desenvolvimento Estrutural	SCO	TUR	SOU	SUC
Floresta Dominada por <i>Rhizophora</i>	Máximo	19,53	29,85	11,65	2,68
	Alto	11,73	89,06	18,37	23,72
	Intermediário	4,76	41,74	13,61	30,05
	Baixo	6,60	107,94	8,71	5,25
Floresta Mista	Máximo	7,75	10,83	3,32	14,03
	Alto	6,05	20,84	6,13	12,90
	Intermediário	3,13	6,36	3,70	1,62
Floresta Dominada por <i>Avicennia</i>	Baixo	3,24	22,13	2,65	0,58
	Máximo	0,96	5,08	0,15	5,37
	Alto	1,58	7,58	0,61	2,89
Vegetação Associada com Presença de Manguê	Intermediário	1,02	2,29	0,84	0,68
	Baixo	0,82	9,23	0,85	0,67
	Máximo			1,07	
TOTAL	Alto			3,96	
	Baixo			11,06	
TOTAL		60,17	352,91	94,64	100,44

Por fim, a Figura 10-67 permite uma comparação entre as quatro áreas mapeadas. Verifica-se que no estuário de São Caetano de Odíveas o quantitativo de área é proporcional ao grau de desenvolvimento estrutural: quanto maior a altura do dossel, maior a área ocupada, com exceção para a classe intermediária. Para a baía de Turiaçu, são as faixas com baixo e intermediário desenvolvimento estrutural

as que apresentam maiores extensões, mostrando que essa área não só apresenta menores classes de altura como um menor desenvolvimento quando comparada ao estuário de São Caetano de Odivelas. O sistemas costeiros de Soure e de Sucuriçu possuem as classes intermediário e alto como as mais frequentes, mas com ligeira diferença de contribuição entre as classes. No sistema costeiro de Soure a maior área é ocupada por floresta com desenvolvimento estrutural intermediário, e como a terceira maior área é a de baixo desenvolvimento, percebe-se uma tendência para a esquerda na curva de distribuição de classes de altura. Já para o sistema costeiro de Sucuriçu, observa-se o oposto, pois não só a maior contribuição é de florestas altas, como a terceira maior área é da classe de máximo desenvolvimento estrutural, mostrando uma tendência para a direita na curva de classes de altura. Não se pode afirmar aqui o porquê de cada área de estudo apresentar curvas de distribuição distinta nas classes de altura, mas tal característica pode indicar diferenças estruturais e ambientais entre as áreas observadas.

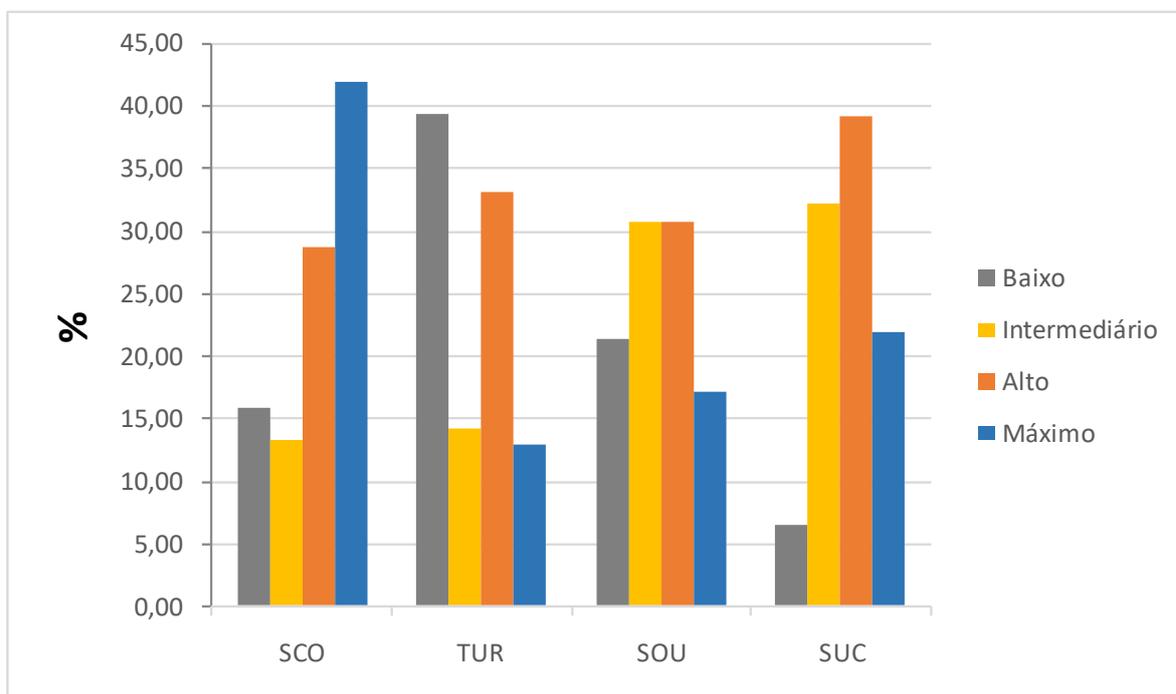


Figura 10-67: Contribuição (%) das classes de desenvolvimento estrutural (altura do dossel) para cada uma das áreas estudadas.

10.6. Considerações Finais

Os esforços para mapeamento das fitofisionomias de mangue envolvem uma complexa articulação de materiais e métodos num esquema metodológico inédito, tanto em termos do detalhamento de legenda, quanto em termos de detalhamento espacial.

O uso combinado de sensores de meso e alta resolução, passivos e ativos, e de dados de campo, viabilizou a investigação sobre modelos de classificação apoiados por Análise de Imagens Baseada em Objetos Geográficos (GEOBIA). A possibilidade de avaliar os modelos propostos em 4 áreas de estudo permitiu ainda a verificação de sua adequabilidade e representatividade, dado que poucos ajustes foram necessários nessas adaptações.

As imagens de meso resolução, adotadas numa primeira abordagem nos testes metodológicos para definição da melhor estratégia de modelagem a ser adotada, apoiaram ainda a realização dos levantamentos de campo. Para o mapeamento em maior detalhe, foram usadas imagens do satélite *WorldView*, com bandas do visível e do infravermelho próximo. Essas imagens, com 0,5m de resolução espacial, integradas aos dados provenientes de campo, possibilitaram o mapeamento das espécies de mangue. Estes modelos foram sendo testados e ajustados, conforme o projeto avançava, para as 4 áreas de interesse. Os resultados obtidos foram confrontados com os dados de campo e considerados representativos da realidade complexa e diferenciada destas áreas. Apesar de esforços de edição manual serem necessários, não há dúvidas quanto aos benefícios do uso dessa abordagem de mapeamento.

Os dados do LiDAR, por outro lado, foram fundamentais para se definir com exatidão, além das variações do terreno, a estratificação da floresta, fator fundamental para o mapeamento das fitofisionomias em escala de paisagem. Dado o alto grau de detalhamento deste produto, após integração com o mapa de espécies, teve-se que pesquisar formas de generalização seguras que não envolvessem perdas importantes no mapeamento final.

Vale ressaltar também a complexidade de processamento ao trabalhar com dados de grande detalhamento em áreas extensas, pois exigiu um grande esforço computacional para tratamento e mapeamento dos dados. Logo, o esforço de se investigar novas tecnologias de mapeamento também significa uma necessidade de aquisição de uma nova infraestrutura computacional que possa atender aos desafios da pesquisa.

De uma forma geral, cada etapa metodológica descrita neste relatório, objetivando o mapeamento das fitofisionomias dos manguezais, apresentou desafios importantes que mereceram cuidados especiais. Ressalta-se que a nossa primeira área de estudo, o estuário de São Caetano de Odivelas, ainda com a primeira versão de seu mapeamento de fitofisionomias, foi objeto de uma publicação na forma de artigo no *Journal of Coastal Research* este ano, 2020.

Os resultados possibilitaram ainda uma leitura detalhada da diversidade ecológica das 4 áreas estudadas numa perspectiva baseada na percepção das imagens verticais, obtidas por Sensoriamento Remoto em bases aérea e orbital.

10.7. Referencias Bibliográficas

- ALMEIDA, Paula Maria Moura de; CRUZ, Carla Bernadete Madureira; AMARAL, Felipe Gonçalves; FURTADO, Luiz Felipe Almeida; DUARTE, Gabriel dos Santos; SILVA, Gabriella Ferreira da; BARROS, Rafael Silva de; MARQUES, João Vitor Freitas Pereira Abrantes; BASTOS, Rita Maria Cupertino; ROSÁRIO, Edineuza dos Santos; SANTOS, Valdenira Ferreira; ALVES, Alex; CHAVES, Filipe de Oliveira; SOARES, Mario Luiz Gomes. Mangrove typology: a proposal for mapping based on high spatial resolution orbital remote sensing. *Journal of Coastal Research (JCR)*. Published by Coastal Education and Research Foundation (CERF). No.95, 2020. ISSN: 1551-5036. DOI:10.2112/SI95-001.1.
- ARCGIS. 2020. Tipos de classificação em: <https://doc.arcgis.com/pt-br>. Acessado em maio de 2020.
- BLASCO, F., T. GAUQUELIN, M. RASOLOFOHARINORO, I. DENIS, M. AIZPUMAND, V. CALDAIROU. 1998. Recent advances in mangrove studies using remote sensing data. *Mtr. Ereshzoater Res.* f9:n7-296
- CARVALHO, Marcus Vinícius; SILVA, Gabriella; CRUZ, Carla Bernadete Madureira; ALMEIDA, Paula M. M. Avaliação do mapeamento de manguezais na Região Metropolitana do Rio de Janeiro através da integração entre GEOBIA e Mineração de Dados. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE. João Pessoa, PB. ISBN: 978-85-17-0076-8. Abril, 2015.
- CRUZ, Carla Bernadete Madureira; VICENS, Raúl Sanchez; SEABRA, Vinícius da Silva; REIS, Rafael Balbi; FABER, Otto Alvarenga; RICHTER, Monika; ARNAULT, Pedro K.; ARAUJO, Marcelo. Classificação Orientada a Objetos no Mapeamento dos Remanescentes da Cobertura Vegetal do Bioma Mata Atlântica na escala 1:250.000. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE. 8 pgs (5691-5699). Florianópolis, SC. ISBN: 978-85-17-00031-7. INPE, 2007.
- CRUZ, Carla Bernadete Madureira; ROSÁRIO, Luana Santos do; ABREU, Marcelo Bueno de; ALMEIDA, Paula Maria Moura de; VICENS, Raúl Sánchez; CRONEMBERGER, Felipe Mendes. Classificação Orientada a Objetos na Geração do Mapa de Uso e Cobertura da Terra do estado do Rio de Janeiro. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE. 8 pgs (7789-7796). Natal, RN. ISBN: 978-85-17-00044-7. INPE, 2009.
- FLORENZANO, Teresa Gallotti. Geotecnologia aplicada ao estudo de objetos e fenômenos do meio físico. *Revista Geonorte, Manaus*, v. 4, n. 4, 2012.
- FONSECA, A. D., & FERNANDES, J. C. 2004. Detecção remota. Lidel.
- GIRI, C., PENGRA, B., ZHU, Z., SINGH, A., & TIESZEN, L. L. 2007. Monitoring mangrove forest dynamics of the Sundarbans in Bangladesh and India using multi-temporal satellite data from 1973 to 2000. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(1), 91-100.
- GREEN, EDMUND P., ET AL. (1997). Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. *Aquatic Botany* 58.1: 11-19.
- INPE. 2006. Material do curso de Introdução ao Spring – Teórica. São José dos Campos – SP.

- JENKS. 1977. Optimal data classification for choropleth maps. Department of Geography Occasional Paper no. 2. Lawrence: University of Kansas.
- JENSEN, J. R. 2011. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Parêntese (Ed.).
- JONES, H. G.; VAUGHAN, R. 2010. Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications. Oxford university press.
- KAMTHONKIAT, D., RODFAI, C., SAIWANRUNKUL, A., KOSHIMURA, S., & MATSUOKA, M. 2011. Geoinformatics in mangrove monitoring: damage and recovery after the 2004 Indian Ocean tsunami in Phang Nga, Thailand. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(7), 1851-1862.
- KOVACS, J.M.; FLORES-VERDUGO, F.; WANG, J.; ASPDEN, L.P. 2004. Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data. *Aquat. Bot.* 80, 13-22.
- KUENZER, C., BLUEMEL, A., GEBRARDT, S., QUOC, T. V., & DECH, S. 2011. Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*, 3(5), 878-928.
- MAHMOUD, A., SALEH. 2007. Assessment of mangrove vegetation on Abu Minqar Island of the Red Sea, *Journal of Arid Environments*, Vol. 68, Issue 2, pp. 331-336.
- MOREIRA, Mayne; ALMEIDA, Paula M. M.; CRUZ, Carla Bernadete Madureira; FURTADO, Luiz Fernando; SOARES, Mario Luiz. Modelagem do conhecimento aplicada à detecção de mudanças em ambiente costeiro. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE. João Pessoa, PB. ISBN: 978-85-17-0076-8. Abril, 2015.
- MUTTITANON, W., TRIPATHI, N.K. 2005. Land use/land cover changes in the coastal zone of Ban Don Bay, Thailand using Landsat TM data. *Int. J. Remote Sens.* 26, 231–2323.
- NOVO, E. M. 2008. Sensoriamento remoto. Princípios e Aplicações. Ed. Edgard Blücher, São Paulo.
- PELLEGRINI, J.A.C. Vulnerabilidade socioambiental dos manguezais de Guarapuá, Cairu/BA frente à inserção da indústria petroleira. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E., & Kuplich, T. M. 2007. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação (p. 127). São José dos Campos: Parêntese.
- RAMSEY, E., JENSEN, J.R., 1996. Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectral to site-specific data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 62, 939–948
- REBELO-MOCHEL, F., & PONZONI, F. J. 2007. Spectral characterization of mangrove leaves in the Brazilian Amazonian Coast: Turiaçu Bay, Maranhão State. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79(4), 683-692.
- SATYANARAYANA, B., MOHAMAD, K. A., IDRIS, I. F., HUSAIN, M. L., & DAHDOUH-GUEBAS, F. 2011. Assessment of mangrove vegetation based on remote sensing and ground-truth measurements at Tumpat,

- Kelantan Delta, East Coast of Peninsular Malaysia. *Internationaljournalofremotesensing*, 32(6), 1635-1650.
- SETO, K. C., & FRAGKIAS, M. 2007. Mangrove conversionandaquaculturedevelopment in Vietnam: A remotesensing-based approach for evaluatingtheRamsarConventiononWetlands. *Global Environmental Change*, 17(3), 486-500Soares, M. L. G. 1997. Estudo da biomassa aérea de manguezais do sudeste do Brasil - análise de modelos. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 2 vol. 560 p.
- SOUZA FILHO, C. R., AUGUSTO, V., OLIVEIRA, W. J., & LAMMOGLIA, T. 2008. Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). *Revista Brasileira de Geociências*, 38(2 suppl), 228-243.
- WANG, L. E., & SOUSA, W. P. 2009. Distinguishing mangrove specieswithlaboratorymeasurementsofhyperspectralleafreflectance. *InternationalJournalof Remote Sensing*, 30(5), 1267-1281.