



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/07.13.16.47-TDI

UTILIZAÇÃO DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA NO ESTUDO DA TIPOLOGIA E DA ESTRUTURA DE BOSQUES DE MANGUE NO LITORAL SUL DE SÃO PAULO, BRASIL

Francisca Rocha de Souza Pereira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Milton Kampel, e Marília Cunha Lignon, aprovada em 29 de
julho de 2011.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A45B8P>

INPE
São José dos Campos
2011

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/07.13.16.47-TDI

**UTILIZAÇÃO DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA
NO ESTUDO DA TIPOLOGIA E DA ESTRUTURA DE
BOSQUES DE MANGUE NO LITORAL SUL DE SÃO
PAULO, BRASIL**

Francisca Rocha de Souza Pereira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Milton Kampel, e Marília Cunha Lignon, aprovada em 29 de
julho de 2011.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A45B8P>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pereira, Francisca Rocha de Souza.

P414u Utilização de Radar de Abertura Sintética no estudo da tipologia e da estrutura de bosques de mangue no litoral Sul de São Paulo, Brasil / Francisca Rocha de Souza Pereira. – São José dos Campos : INPE, 2011.

xxiv+111 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/07.13.16.47-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Milton Kampel, e Marília Cunha Lignon.

1. Radar de Abertura Sintética (SAR). 2. Manguezal. 3. Sensoriamento Remoto. I.Título.


CDU 528.8.044.2 (815.6)

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

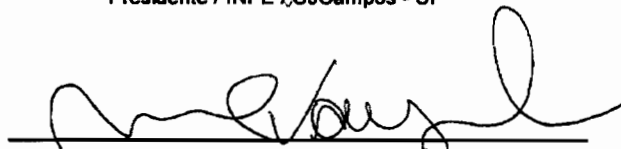
Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto


Dr. Dalton de Morisson Valeriano


Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Milton Kampel


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

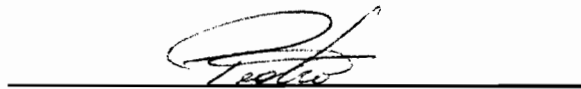
Dra. Marília Cunha Lignon


Orientadora) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Fábio Furtan Gama


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho


Convidado(a) / UFPA / Belém - PA

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Francisca Rocha de Souza Pereira

São José dos Campos, 29 de julho de 2011

A maravilhosa disposição e harmonia do universo só pode ter tido origem segundo o plano de um Ser que tudo sabe e tudo pode. Isto fica sendo a minha última e mais elevada descoberta.
(Isaac Newton)

*A meu pai Francisco,
a minha mãe Elizabeth,
a meus irmãos Emanuel, Ícaro e Fabíola.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela minha vida, saúde e por sempre colocar pessoas tão especiais em meu caminho.

Meus pais Elizabeth e Dudu por todo apoio emocional, educacional e amor incondicional. Meus irmãos Emanuel, Ícaro e Fabíola, que mesmo de longe são minha referência e me fazem muito feliz. Bem como, Tadeu, Tuca, Patrícia, vó Cida, vô Hugo, Huguinho, Mara e toda a família.

Ao Dr. Milton Kampel, meu orientador do mestrado, por ter acreditado e apoiado a realização deste trabalho e ter me possibilitado fazê-lo. Por ter as portas sempre abertas para seus alunos e com muito ânimo apoiá-los.

À Dra. Marília, co-orientadora do mestrado, por ter permitido utilizar seus os dados de estrutura de bosques de mangue, por ter-me ensinado e possibilitado vivenciar o manguezal, este ecossistema fantástico e importantíssimo. Pelo auxílio acadêmico e por todo carinho e amizade sincera.

Aos Doutores que foram essenciais para a execução deste trabalho, com importantes sugestões, auxílio e muita atenção: Arnaldo Queiróz, Cleber Oliveira.

Ao Dr. Dalton pela disponibilidade, auxílio e sugestões.

Aos Doutores(as) Camilo, Evlyn, Silvana Amaral, Corina, Sidney, pela atenção e sugestões.

Aos Doutores Pedro Walfir Souza-Filho e Fábio Furlan Gama pela disponibilidade e atenção.

A todos os docentes do curso de Sensoriamento Remoto do INPE.

Ao Dr. Waldir Paradella pelas sugestões e disponibilidade da imagem PALSAR através do projeto ALOS RA# 219: *“Geoscience Applications with L-Band PALSAR data in the Tropical Environments of Brazil”*.

À Dra. Yara Shaeffer-Novelli por me possibilitar fazer seu curso de ecologia de manguezais no IO-USP.

Ao Dr. Clemente Coelho Jr. pela disponibilidade dos dados de campo de sua tese e pelas sugestões.

A todos que estiveram durante a campanha de campo no manguezal, especialmente Dr. Ricardo Menghini e Marília, bem como Ricardo Santos e Armando.

Ao Instituto Oceanográfico (IO-USP) base de Cananéia.

Ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) pela disponibilidade dos dados cartográficos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante o mestrado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização do mestrado.

Aos tios José e Clarisse, ao Alexandre e toda a família Calvo pelo carinho.

A todos os amigos do INPE e turma do mestrado 2009. Especialmente às amigas Jana, Luciana, Natália e Laura e aos amigos Rogério pela ajuda e Thiago. Bem como à Flávia, Cibele, Darcy, Liki, Verônica, Mari, Claudia, Leidy, Roberto, Enrique, Moisés, Cesar, Gabriel, Luiz, Eduardo, Hiran, Marcus, Pedro, Kleber, Raian, Jansen e Carlos.

RESUMO

O manguezal é um ecossistema típico da zona costeira de regiões tropicais e subtropicais. Desempenha funções essenciais para a manutenção da vida de muitas espécies, além de ser um ambiente de grande estoque de carbono. Suas características estruturais estão diretamente ligadas à variabilidade das condições ambientais. Imagens de radar de abertura sintética (SAR) são úteis em estudos da vegetação devido à penetração e à interação das microondas com a estrutura vegetal, além de praticamente não sofrerem interferências atmosféricas. O presente trabalho tem como objetivo entender a relação entre os valores de retroespalhamento (σ°) de parâmetros incoerentes obtidos de uma imagem do sensor Phased Arrayed L-band SAR - PALSAR com os diferentes bosques de mangue do litoral sul do Estado de São Paulo. A partir das quatro polarizações HH, HV, VH e VV, obtidas da imagem polarimétrica PALSAR de 08/06/2009, foram gerados dez parâmetros incoerentes baseados na medida de potência do radar. Estes parâmetros foram utilizados no mapeamento dos manguezais do Sistema Costeiro Cananéia-Iguape, na distinção de tipos fisiográficos de 16 bosques de mangue e em correlações estatísticas com os parâmetros estruturais dos bosques. O mapeamento dos manguezais foi realizado com a aplicação de um classificador contextual baseado na frequência. A melhor classificação, de acordo com o maior índice *Kappa* de 0,739, foi obtida utilizando-se todos os parâmetros incoerentes como parâmetros de entrada. Os tipos fisiográficos de bosques franja em progradação, franja com bosques maduros e bacia foram identificados pela aplicação do teste estatístico Kruskal-Wallis aos valores médios e desvios padrões de σ° dos parâmetros HH, HV, potência total (Pt), VSI, BMI e razão HV/HH. A polarização HH apresentou correlação significativa com praticamente todos os cinco parâmetros estruturais considerados (altura do dossel, altura média, DAP médio, área basal e densidade). As análises de regressão múltipla mostraram uma relação linear entre os parâmetros incoerentes e os parâmetros estruturais. A altura do dossel, altura média e o DAP médio estiveram inversamente correlacionados com BMI e diretamente com CSI ($R^2 = 0,69$, $0,73$ e $0,67$, respectivamente). Pode-se concluir que os parâmetros incoerentes derivados da imagem PALSAR demonstraram o potencial dos dados SAR banda L para o mapeamento e estudo da estrutura de bosques de mangue.

THE USE OF SYNTHETIC APERTURE RADAR TO STUDY MANGROVE FORESTS TIPOLOGY AND STRUCTURE IN THE SOUTHERN COAST OF SÃO PAULO, BRAZIL

ABSTRACT

Mangroves are a typical ecosystem of tropical and subtropical coastal regions. Mangrove wetlands perform numerous essential functions for maintenance of life of many species, in addition to be a high carbon stock environment. Their structural characteristics are directly linked to the variability of environmental conditions. Synthetic aperture radar (SAR) images are useful for vegetation studies due to microwave penetration and interaction with plant's structure, besides not being very susceptible to atmospheric interference. The present work aims to understand the relationship between backscatter coefficient (σ°) of incoherent parameters derived from a Phased arrayed L-band SAR – PALSAR image, and different mangrove forests of the southern coast of São Paulo. Using four polarizations - HH, HV, VH and VV, from a polarimetric image of 06/08/2009, ten incoherent parameters were generated based on radar power measurements. These parameters were used for mangrove mapping in the Cananéia-Iguape Coastal System region, for the distinction of physiographic types of mangroves, and for statistical correlations with structural parameters of the mangrove stands. The mapping was based on a frequency-based contextual classification. The best result, according to the highest kappa index (0.739), was obtained using all the incoherent parameters as input. The physiographic types of mangrove progradation fringe, mature fringe and basin were identified with the application of the Kruskal-Wallis statistical test to the σ° means and standard deviation values of the HH, HV, total power (Pt), volume scattering index (VSI), biomass index (BMI), and HV/HH. The HH polarization showed significant correlation with almost all the 5 structural parameters considered - canopy height, mean height, mean diameter at breast height (DBH), basal area and density. A multiple regression analysis showed linear relation between the incoherent parameters and the structural parameters. The canopy height, mean height and mean DBH were inversely correlated with BMI and inversely with canopy structure index ($R^2 = 0.69, 0.73$ and 0.67 , respectively). We conclude that the incoherent parameters derived from the PALSAR image demonstrated the potential of L-band SAR data for the mapping and study of mangrove forests structure.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2. 1- a) Divisão da costa brasileira em oito seguimentos de acordo com Schaeffer-Novelli et al. (1990) com destaque em vermelho para o seguimento VII, onde está inserida a área de estudo; b) Cananéia, Litoral sul do Estado de São Paulo - Imagem Landsat TM-5, Composição R(5)G(4)B(3) de 05/03/2009. 6
- Figura 2. 2 - Modos de observação do sensor PALSAR. Exemplificação dos parâmetros como ângulo de incidência, largura da faixa imageada, direção de vôo e direção em azimute. 9
- Figura 2.3 - Tipos de superfície-espalhamento associado: (a) lisa-especular, (b) lisa-reflexão de canto, (c) rugosa-difuso. 11
- Figura 2.4 - Mecanismo e comportamento do retroespalhamento de florestas: (a) rertoespalhamento da superfície do dossel (b) espalhamento interior do dossel, volumétrico; (c) interação dossel/solo (d) *double-bounce*, interação do tronco/solo; (e) espalhamento do tronco; (f) espalhamento do solo. 13
- Figura 2. 5 - Prognóstico do modelo na banda L-HH para o manguezal inundado e não inundado da área de estudo. Onde a= *double bounce* interação do solo e raízes aéreas; c= espalhamento volumétrico do dossel; d= *double bounce* interação tronco solo; m= interação múltiplos caminhos do solo e dossel; s= retroespalhamento da superfície; t=total. O termo de interação solo e raízes aéreas foi modelado apenas para a floresta não inundada. 15
- Figura 2. 6 - Medidas do coeficiente de retroespalhamento versus biomassa total para a banda C, L e P onde dossel fechado está representado por círculo preto e dossel aberto por círculo com uma cruz. A linha corresponde a linha de regressão para os 12 dosséis fechados. 16
- Figura 3. 1 – (I) Imagem PALSAR (08/06/2009) composição colorida R(HH)G(HV)B(VV), onde são destacadas as localizações dos bosques. (II) indicação dos bosques a) Baguaçu bosques 1 e 2; b) Nóbrega bosques 3, 4, 5; c) Sítio Grande bosques 6 e 7; d) Cardoso bosques 8, 9, 10, 11; e) Prainha bosque 12, 13; f) Batatal bosque 14; g) Main Gap bosque 15 e bosque adjacente ao main gap 16. 23
- Figura 3. 2 - Imagem obtida pela fusão da imagem multiespectral do sensor CCD/CBERS 2B e pancromática do sensor HRC/CBERS 2B (02/02/2008), na qual são indicados os polígonos referentes aos 16 bosques de mangue. a) Baguaçu bosques 1 e 2; b) Nóbrega bosques 3, 4, 5; c) Sítio Grande bosques 6 e 7; d) Cardoso bosques 8, 9, 10, 11; e) Prainha bosque 12, 13; f) Batatal bosque 14; g) Main Gap bosque 15 e bosque adjacente ao main gap 16. 24

Figura 3. 3 - Imagem PALSAR combinação colorida R(HH)G(HV)B(VV), região de Cananéia, SP (08/06/2009).	29
Figura 3. 4 - Fluxograma resumindo as etapas do trabalho.....	31
Figura 3. 5 – Fluxograma das etapas efetuadas na classificação contextual baseada na frequência.	34
Figura 4. 1 – Média, erro padrão (SE) e desvio padrão (SD) dos tipos fisiográficos de bosques de mangue- franja em progradação, franja bosque maduro, bacia e clareira (<i>main gap</i>) referentes aos parâmetros estruturais altura do dossel, altura média, DAP médio, área basal e densidade.....	42
Figura 4. 2 - Análise de agrupamento, utilizando distância Euclidiana, das variáveis estruturais: DAP médio, altura do dossel, densidade (escala logarítmica), referentes aos 16 bosques de mangue. Onde: bosque de franja em progradação (FBP), franja com bosque maduro (FBM) e bosque de bacia (BB).	44
Figura 4. 3 – Diagrama de correlação entre os parâmetros estruturais altura do dossel, DAP médio, área basal, densidade (escala logarítmica) e altura média. ...	47
Figura 4. 4 - Imagem PALSAR de 08/06/2009. Polarizações a) horizontal HH e b) cruzada HV.	48
Figura 4. 5 - Imagem PALSAR de 08/06/2009. Polarização a) vertical VV e b) Pt.	49
Figura 4. 6 – Imagem PALSAR de 08/06/2009. a) BMI e b) CSI.	50
Figura 4. 7 – Imagem PALSAR de 08/06/2009. a) VSI e b) HV/HH.	51
Figura 4. 8 – Imagem PALSAR de 08/06/2009. a) HV/VV e b) VV/HH.....	52
Figura 4.9 – Média, desvio padrão (SD) e erro padrão (SE) para os valores médios de retroespalhamento para cada parâmetro incoerente referentes aos polígonos dos alvos: urbano (Ub), vegetação não-mangue (NMg), água (Ag), mangue (Mg) e solo exposto (S).	54
Figura 4. 10 - Classificação contextual baseada na frequência utilizando todos os parâmetros incoerentes como entrada. Destaque para o manguezal em amarelo.	58
Figura 4. 11 - Média, desvio padrão (SD) e erro padrão (SE) para os valores de retroespalhamento dos parâmetros incoerentes referentes aos tipos de bosque de mangue plotados sequencialmente, onde: progradação (P), maduro (M), bacia (B) e gap (G).	65

Figura 4. 12 - Gráfico de dispersão do retroespalhamento dos 16 bosques de mangue comparando os 10 parâmetros incoerentes. Franja em progradação (FBP), franja com bosques maduros (FBM), Bosque de bacia (BB).	68
Figura 4. 13 – Diagrama de correlação para os parâmetros altura do dossel vs Pt; BM, HH e altura média vs HV.....	76
Figura 4. 14 - Diagrama de correlação para o parâmetro altura média vs Pt, BMI, HH, VV.....	77
Figura 4. 15 - Diagrama de correlação para o parâmetro DAP médio vs CSI, BMI, VV/HH, HH.	78
Figura 4. 16 - Diagrama de correlação para o parâmetro Área basal vs Pt, HH.	79
Figura 4. 17 - Gráfico da função de regressão obtido para a altura do dossel com as variáveis explicativas BMI e CSI.	81
Figura 4. 18 - Gráfico da função de regressão obtido para a altura média com as variáveis explicativas BMI e CSI.	81
Figura 4. 19 - Gráfico da função de regressão obtido para a DAP médio com as variáveis explicativas BMI e CSI.	82
Figura A 1- Bosque de franja em progradação Baguaçu 1. a) Troncos finos e altura intermediária. b) Dossel pouco espesso.....	99
Figura A 2 – Franja com bosques maduros Baguaçu 2. a) bosque com menor densidade e árvores de maior porte. b) Dossel denso.....	100
Figura A 3- Bosque de franja em progradação Nóbrega 1. (a) Bosque denso com troncos finos. (b) Dossel pouco espesso.....	100
Figura A 4 – Franja com bosques maduros Nóbrega 2. (a) Bosque desenvolvido com troncos grossos e rizóforos grandes. (b) Dossel denso.	101
Figura A 5 – Bosque de bacia Nóbrega 3. Bosque denso com muitos galhos pequenos entrelaçados.	102
Figura A 6 – Bosque de franja em progradação Sítio Grande 1. (a) Bosque denso com indivíduos jovens e troncos finos. (b) Dossel pouco espesso.....	102
Figura A 7 – Bosque de franja maduro Sítio Grande 2. (a) Bosque desenvolvido com árvores grandes e trocos grossos. (b) Dossel espesso.....	103

Figura A 8 – Bosque de franja maduro Cardoso 1. (a) Árvores em torno de 8 m com muitos rizóforos expostos e troncos inclinados (b) Dossel com bromélias e esparso.	104
Figura A 9 – Bosque de franja maduro Cardoso 2. (a) Bosque desenvolvido com muitas raízes expostas. (b) Dossel aberto.....	104
Figura A 10 – Bosque de bacia Cardoso 3. (a) Bosque denso com troncos retorcidos (b) Dossel esparso.	105
Figura A 11 – Bosque de bacia Cardoso 4. (a) Bosque de bacia com troncos retorcidos. (b) Dossel aberto.....	105
Figura A 12 – Bosque de franja maduro Prainha 1. (a) Bosque desenvolvido com troncos grossos. (b) Dossel denso.....	106
Figura A 13 – Bosque de franja maduro Prainha 2. (a) Bosque desenvolvido com árvores inclinadas. (b) Dossel denso com algumas lacunas.	107
Figura A 14 – Bosque de bacia Batatal. (a) Bosque denso com árvores baixas e retorcidas (b) folhas de <i>L.racemosa</i>	107
Figura A 15 – Bosque de clareira main gap. (a) Clareira com presença de indivíduos adultos mortos e novos indivíduos recolonizando área. (b) folhas e propágulos de <i>L. racemosa</i>	108
Figura A 16 – Bosque de franja maduro adjacente ao <i>main gap</i> . (a) e (b) Bosque desenvolvido, árvores grandes e espaçadas.	108

LISTA DE TABELA

Tabela 2. 1- Faixas do espectro de microondas em que operam os sistemas SAR.	11
Tabela 3. 1- Dados estruturais referentes aos 16 bosques de mangue, obtidos com o agrupamento das parcelas estudadas por Coelho-Jr (2003) e Cunha-Lignon et al. (2010). <i>L. racemosa</i> (Lg); <i>A. schaueriana</i> (Av); <i>R. mangle</i> (Rh). Bosque franja em progradação: 1, 3 e 6; franja com bosque maduro: 2, 4, 7, 8, 9, 12, 13, 16; bosque bacia: 5,10, 11, 14; clareira 15.	26
Tabela 3. 2– Características originais da imagem PALSAR utilizada.	28
Tabela 3. 3- Valores referentes ao resultado da correção geométrica obtido pelo programa PCI e valores obtidos para a validação da correção geométrica.	32
Tabela 3. 4- Qualificação do índice kappa.	36
Tabela 3. 5- Pontos amostrais para cada classe utilizados na validação da classificação.	36
Tabela 4. 1 - Correlação entre os parâmetros estruturais altura do dossel, DAP médio, área basal, densidade (escala logarítmica) e altura média. Destaque em negrito para as correlações significativas (ao nível de 95% de confiança).	46
Tabela 4.2 – Valores da média, mínimo, máximo e desvio padrão referente ao retroespalhamento dos alvos urbano, vegetação não-mangue, água e solo-exposto.	55
Tabela 4.3 – Valores da acurácia global, índice Kappa, acurácia do produtor e acurácia do usuário para todas as quatro classificações.	57
Tabela 4.4 - Matriz de confusão para as classes das quatro classificações contextuais baseadas na frequência.	59
Tabela 4.5 - Valores do retroespalhamento- σ° (dB) para os 10 parâmetros incoerentes referentes aos polígonos dos 16 bosques de mangue.	62
Tabela 4.6 - Matriz de correlação (Pearson) entre os parâmetros incoerentes (95% confiança), obtida a partir dos valores de retroespalhamento dos 16 bosques de mangue. Destaque em negrito para os parâmetros que apresentam correlação significativa.	63
Tabela 4. 7 - Valores de retroespalhamento (dB) de cada parâmetro incoerente referentes as médias, mínimo, máximo e desvio padrão para os tipos de	

bosque de mangue franja em progradação (FP), maduro (FM) bacia (B) e clareira (C).	66
Tabela 4.8 – Comportamento dos parâmetros incoerentes quanto aos tipos fisiográficos de bosque de mangue: Franja em progradação, franja com bosques maduros, bacia e clareira.	69
Tabela 4. 9 - Coeficiente de correlação R (Pearson) entre os parâmetros incoerentes e os parâmetros estruturais dos 16 bosques de mangue, com 95% de confiança.	75
Tabela 4.10 - Valores de R, R ² e R ² ajustado, referentes às funções de regressão para os parâmetros altura do dossel, altura média, DAP médio, área basal e densidade (log).....	80
Tabela 4. 11 – Função de regressão linear explicativa para cada parâmetro estrutural: altura do dossel, altura média, DAP médio, área basal e densidade.....	80
Tabela 4. 12 – Outliers em Y e em X e distância Cook detectados nas funções de regressão dos parâmetros estruturais.	82
Tabela 4. 13 – Valores referentes ao teste de normalidade Shapiro - Wilk e seu respectivo valor <i>p</i>	82
Tabela 4. 14 – Valores referentes ao PRESS e SSE e porcentagem da diferença entre os valores para a validação dos modelos de regressão para cada parâmetro estrutural.	83
Tabela B 1 - Valores de H e p referentes ao teste Kruskal-Wallis (5% de significância).	109
Tabela B 2 - Valores de p valor para o teste Comparação Múltipla entre os tipos de bosques progradação (P), maduro (M), bacia (B). Em destaque em negrito os valores de p significativos.....	110
Tabela B 3– Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para a altura do dossel.	111
Tabela B 4 - Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para a altura média.	111
Tabela B 5 - Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para DAP médio.....	111
Tabela B 6- Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para área basal.	111

Tabela B 7 - Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para a densidade (log). 111

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	3
1.1.2	Objetivos Específicos.....	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1	Ecosistema manguezal	5
2.2	Sistema SAR.....	8
2.2.1	SAR e vegetação	12
2.2.2	Parâmetros incoerentes e coerentes.....	18
3	MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1	Área de estudo	21
3.2	Coleta dos dados de campo.....	22
3.3	Imagem SAR.....	27
3.4	Condições climáticas e de maré na ocasião da aquisição da imagem SAR.....	30
3.5	Processamento da imagem SAR	30
3.6	Classificação contextual baseada na frequência	34
3.7	Validação da classificação digital de imagens.....	35
3.8	Análises estatísticas	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Análise da estrutura dos bosques de mangue.....	41
4.2	- Parâmetros SAR	47
4.3	Classificação contextual baseada na frequência	56
4.4	Análise dos parâmetros incoerentes.....	61
4.5	Análise da relação entre os parâmetros estruturais e os parâmetros incoerentes	74
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	88

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
APÊNDICE A – Descrição dos 16 bosques de mangue.....	99
APÊNDICE B.....	109

1 INTRODUÇÃO

O ambiente costeiro localiza-se em áreas de contato entre oceano e continente, sendo formado por ecossistemas marinhos e terrestres. Um dos ecossistemas característicos da zona costeira de regiões tropicais e subtropicais é o manguezal. Segundo Schaeffer-Novelli (1991), este ecossistema é considerado um ambiente de transição, possuindo características de ambientes terrestres e marinhos, e com dinâmica vinculada principalmente ao regime de marés. Proporcionam condições para a alimentação, proteção e reprodução de muitas espécies animais e são considerados importantes transformadores de matéria orgânica e geradores de bens e serviços. Os manguezais estão entre as florestas tropicais mais ricas em estoque de carbono (C), relacionado tanto com a biomassa como com os sedimentos abaixo do solo (DONATO et al., 2011).

As alterações causadas por ações antrópicas ou causas naturais nos ecossistemas manguezais são normalmente observadas devido às mudanças na composição das comunidades e espécies, estrutura e biomassa (SAENGER; SNEDAKER, 1993; LUGO, 2002). A ocupação humana desordenada, assim como as diversas atividades agrícolas, industrial e aquicultura realizadas em áreas costeiras, têm implicado em impactos negativos sobre os ecossistemas (VALIELA et al., 2001). Identificar as mudanças ocorridas nos manguezais necessita o conhecimento e informações de sua extensão, da distribuição de espécies dominantes, estrutura da vegetação e biomassa dos estágios de desenvolvimento. Informações obtidas por satélites e por pesquisas de campo podem subsidiar os estudos destes ambientes (LUCAS et al., 2009; HEUMANN, 2011). Nesse contexto, estudos que visem contribuir para a conservação e o aumento de informações sobre estes ambientes são de grande importância (LUGO, 2002).

Alguns autores têm procurado entender as características e a dinâmica dos manguezais através do estudo de propriedades biofísicas de seus principais tipos vegetais. Este tipo de abordagem tem sido beneficiado pela grande quantidade de dados de sensoriamento remoto disponíveis. O uso de imagens obtidas por radar de abertura sintética (SAR) tem sido utilizado para o estudo de manguezais (LUCAS et al., 2004, 2007, 2009;

MITCHELL, 2003; MOUGIN et al., 1999; PROISY et al., 2000, 2002), principalmente devido às características deste tipo de sensor que permitem obter informações de estratos vegetais localizados abaixo dos dosséis. Segundo Mitchell (2003), a interação entre a onda incidente do radar e o dossel do bosque de mangue é indicada na relação entre o retroespalhamento SAR e a biomassa e os parâmetros estruturais. Desta forma as características estruturais do manguezal incluindo a extensão inundada sob o dossel, a abertura deste e a densidade de troncos, induzem uma resposta relativa do retroespalhamento que mostram um efetivo uso dos sensores SAR para caracterizar e mapear áreas de manguezal. Outra vantagem importante do uso de dados SAR é pelo fato destes sensores adquirirem imagens sob condições atmosféricas e de iluminação quaisquer (TOWNSEND et al., 2002; SIMARD et al., 2002), visto que manguezais são ecossistemas típicos tropicais e ocorrem em regiões com constante cobertura de nuvens.

Devido a importância do ecossistema manguezal tanto para os aspectos ambientais como econômicos, o monitoramento da dinâmica de florestas deste ecossistema por meio da análise de seus parâmetros estruturais pode ser efetivado com uso de técnicas de sensoriamento remoto. O sensor PALSAR (*Phased Arrayed L-band SAR*) é um SAR banda L que tem sido importante fonte de informações para as observações globais, caracterização, mapeamento e monitoramento dos manguezais, principalmente, por promover a obtenção de informações estruturais da vegetação (LUCAS et al., 2007, 2009). Desta forma, informações deste sensor foram utilizadas no presente trabalho a fim de identificar quais parâmetros SAR possibilitaram maior interação com diferentes tipos estruturais de bosques de mangue.

1.1 Objetivo

O presente trabalho investigou a relação entre os valores de retroespalhamento (σ°) dos parâmetros incoerentes derivados de uma imagem multipolarizada PALSAR banda L, com os diferentes bosques de mangue e seus parâmetros estruturais, no Sistema Costeiro Cananéia-Iguape, litoral sul do Estado de São Paulo. Desta forma pretendeu-se averiguar quais parâmetros incoerentes apresentam maior potencial para o mapeamento, distinção fisiográfica e estudos sobre a estrutura de bosques de mangue. A delimitação de áreas de manguezal também foi realizada.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Gerar 10 parâmetros incoerentes a partir de uma imagem PALSAR, tais como: coeficiente de σ° nas três polarizações (HH, HV, VV), potência total (Pt), índice de biomassa (BMI), índice de estrutura do dossel (CSI) e índice de espalhamento volumétrico (VSI) e razão de polarização cruzada (HV/HH e HV/VV) e paralela (VV/HH).
- Mapear as áreas de manguezais na área de estudo com base na classificação da imagem SAR banda-L.
- Verificar quais parâmetros incoerentes possibilitam distinguir tipos fisiográficos de bosques de mangue na área de estudo.
- Relacionar estatisticamente parâmetros estruturais de bosques de mangue medidos *in situ* com os parâmetros incoerentes derivados da imagem SAR.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ecossistema manguezal

Manguezal é um ecossistema típico costeiro de regiões tropicais e subtropicais adaptado às influências das variações das marés. Representa a interface entre as comunidades terrestre e marinha que recebe entrada de água oceânica, juntamente com água doce, nutrientes e sedimentos provenientes dos rios (DAHDOUH-GUEBAS, 2002; SCHAEFFER-NOVELLI, 1991). Os manguezais são importante fonte de suporte para a conservação da biodiversidade biológica e fornece habitat, local para desova, viveiros e nutrientes para diversos animais.

Schaeffer-Novelli et al. (1990) dividiram o litoral brasileiro em oito segmentos (Figura 2.1a) de acordo com a uniformidade de condições hidrológicas, oceanográficas, fisiológicas e climáticas, descrevendo a ocorrência, distribuição e as características estruturais dos bosques de mangue em cada segmento. Ao norte, do Cabo Orange ao Cabo Norte compreende o segmento I; o segmento II, do Cabo Norte a Ponta Curuçá; o segmento III, da Ponta Curuçá a Ponta Mangues Secos; o segmento IV, da Ponta Mangues Secos ao Cabo Calcanhar; o segmento V, do Cabo Calcanhar ao Recôncavo Baiano; o segmento VI, do Recôncavo Baiano ao Cabo Frio; o segmento VII, de Cabo Frio a Torres; o segmento VIII, de Torres ao Chuí. O limite sul de ocorrência dos manguezais ocorre em Laguna (SC) no segmento VII. De todos os estados litorâneos, apenas o Rio Grande do Sul não apresenta vegetação típica de mangue (SCHAEFFER-NOVELLI, 1991). A Figura 2.1b mostra a região de Cananéia, litoral sul do Estado de São Paulo, que se localiza no segmento VII.

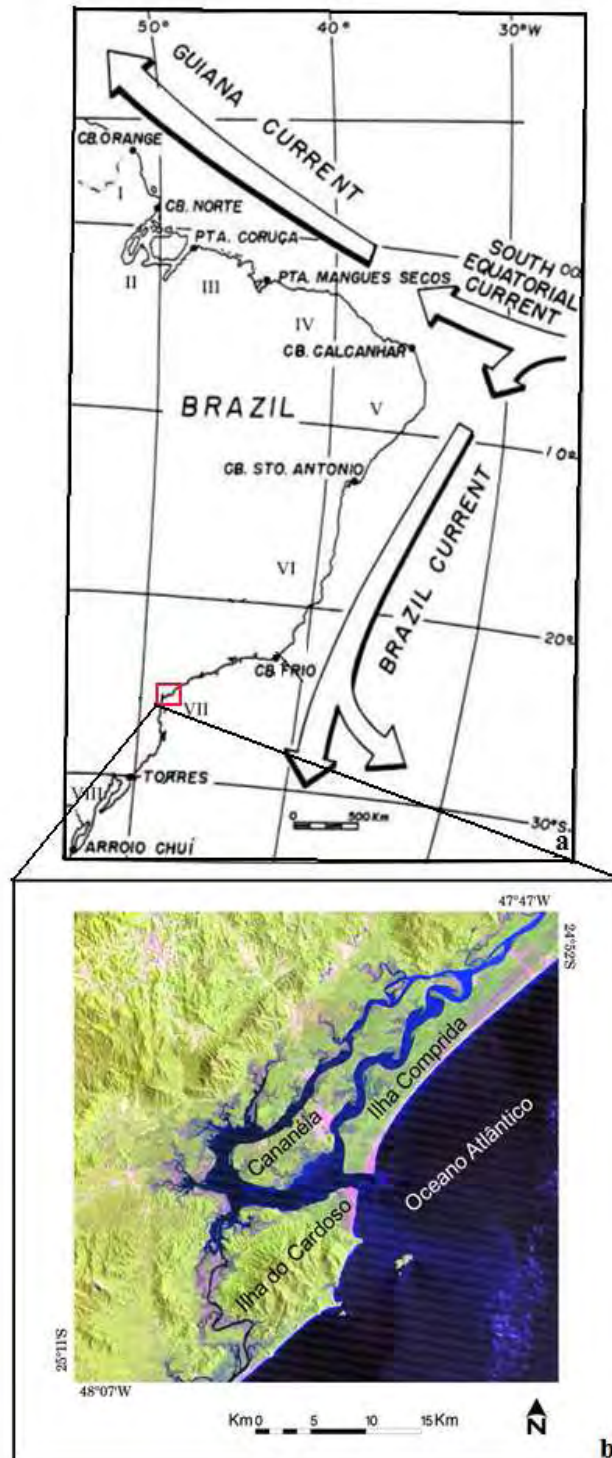


Figura 2. 1- a) Divisão da costa brasileira em oito segmentos de acordo com Schaeffer-Novelli et al. (1990) com destaque em vermelho para o segmento VII, onde está inserida a área de estudo; b) Cananéia, Litoral sul do Estado de São Paulo - Imagem Landsat TM-5, Composição R(5)G(4)B(3) de 05/03/2009. Fonte: INPE (2009).

Bosques de mangue podem ser classificados segundo suas características fisiográficas. A classificação está relacionada principalmente com a hidrodinâmica local. Lugo e Snedaker (1974) apresentaram uma classificação fisiográfica dos bosques de mangue, a saber: bosques ilhote, ribeirinho, de franja, de bacia, arbustivo e anão. Cintrón et al. (1985) apresentaram outra classificação mais simplificada a partir da proposta anterior, considerando apenas três tipos fisiográficos: franja e ilhote, ribeirinho e bacia. Finalmente, Schaeffer-Novelli et al. (2000) sugerem dois tipos principais: franja e bacia. Bosques de franja ocorrem ao longo das bordas das costas mais protegidas nos estuários, sendo induzidas por movimentos verticais da maré, expostas a condições de alta salinidade e nutrientes. O movimento vertical das marés ajuda na ventilação das raízes e facilita a remoção de material tóxico. Os bosques de bacia ocupam terrenos com menos frequência de inundação de maré, que muitas vezes se limitam às altas marés no ano. Por isso necessitam da água da chuva para melhor se desenvolverem.

Segundo Schaeffer-Novelli e Cintrón (1986) as espécies vegetais que habitam o mangue possuem adaptações ao ambiente, como por exemplo, habilidade de extrair água doce da água do mar, órgãos especiais para a excreção de sal, pneumatóforos e lenticelas nas raízes-escora permitindo a respiração da planta, raízes-escora e adventícias que ajudam a sustentar a árvore em solos lodosos e sementes que flutuam na água salgada. No Brasil, a espécie *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae), conhecida como mangue vermelho normalmente é encontrada na franja, com bosques variando de 5 a 30 m de altura. Os bosques maduros dominados pela espécie *Avicennia schaueriana* Stapf. & Leechman (Acanthaceae, Avicenniacea), conhecida como mangue preto apresentam estrutura entre 6 a 25 m de altura. A espécie *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. F. (Combretaceae), conhecida como mangue branco normalmente ocupam terrenos mais firmes e arenosos no manguezal apresentando porte arbustivo ou arbóreo variando de 2 a 8 m (CINTRÓN; SCHAEFFER-NOVELLI, 1983; SCHAEFFER-NOVELLI, 1991; SCHAEFFER-NOVELLI et al., 2000). As espécies associadas a bosques de mangue na área de estudo são: *Hibiscus tiliaceus* L. (Malvaceae), *Acrostichum aureum* L. (Polypodiaceae) e *Spartina alterniflora*, Loisel (Poaceae) (SCHAEFFER-NOVELLI, 1991).

No Brasil, entre 1980 e 2005, ocorreu redução de cerca de 50.000 ha de área de manguezais, sobretudo no litoral da região Sudeste, decorrente do desenvolvimento urbano (FAO, 2007). Cunha-Lignon et al. (2009a) analisando estudos de caso em manguezais ao longo do litoral do Estado de São Paulo, afirmam que esse ecossistema sofreu distintas alterações ao longo do tempo, em cada trecho de segmento de costa. Segundo estes autores, os manguezais do litoral sul de São Paulo são os mais conservados do estado.

As características estruturais de um bosque de mangue estão diretamente ligadas com a variabilidade das condições ambientais, tais como clima, geomorfologia, fatores edáficos, marés, entre outros (SOARES; SCHAEFFER-NOVELLI, 2005). A descrição estrutural de um bosque de mangue permite averiguar o grau de desenvolvimento deste, bem como a identificação e delimitação de bosques com semelhantes propriedades permitindo compará-los com outros bosques (SCHAEFFER-NOVELLI; CINTRÓN, 1986). Segundo estes autores as características que normalmente são utilizadas para a descrição de um bosque de mangue são o diâmetro da árvore, área basal da árvore, altura média do bosque, densidade, índice de área foliar e espaço ocupado pela copa.

2.2 Sistema SAR

Os radares imageadores ou radar de abertura sintética (SAR) são sistemas ativos que operam na região das microondas do espectro eletromagnético. Este sistema opera com uma geometria de visada lateral e iluminação perpendicular à trajetória de vôo. O sensor envia um pulso que atinge a superfície e recebe o retroespalhamento referente à superfície iluminada. Desta forma, não depende da energia de iluminação proveniente do sol, pois possui sua própria energia para iluminar o alvo, obtendo imagens durante o dia e noite. Os radares possibilitam aquisição de dados em variadas condições atmosféricas pois a faixa de microondas apresenta elevado coeficiente de transmissão através das nuvens (LEE; LEE, 2009). Os principais parâmetros relacionados à geometria de imageamento do SAR são: ângulo de incidência, resoluções espaciais em *slant range* (direção oblíqua perpendicular à direção de vôo), em *ground range* (direção

no solo perpendicular à direção de vôo), resolução espacial no solo em azimute, largura do feixe, entre outros (DUTRA et al., 2003; ULABY, 1982). A Figura 2.2 exemplifica esquematicamente a geometria de imageamento do sensor PALSAR.

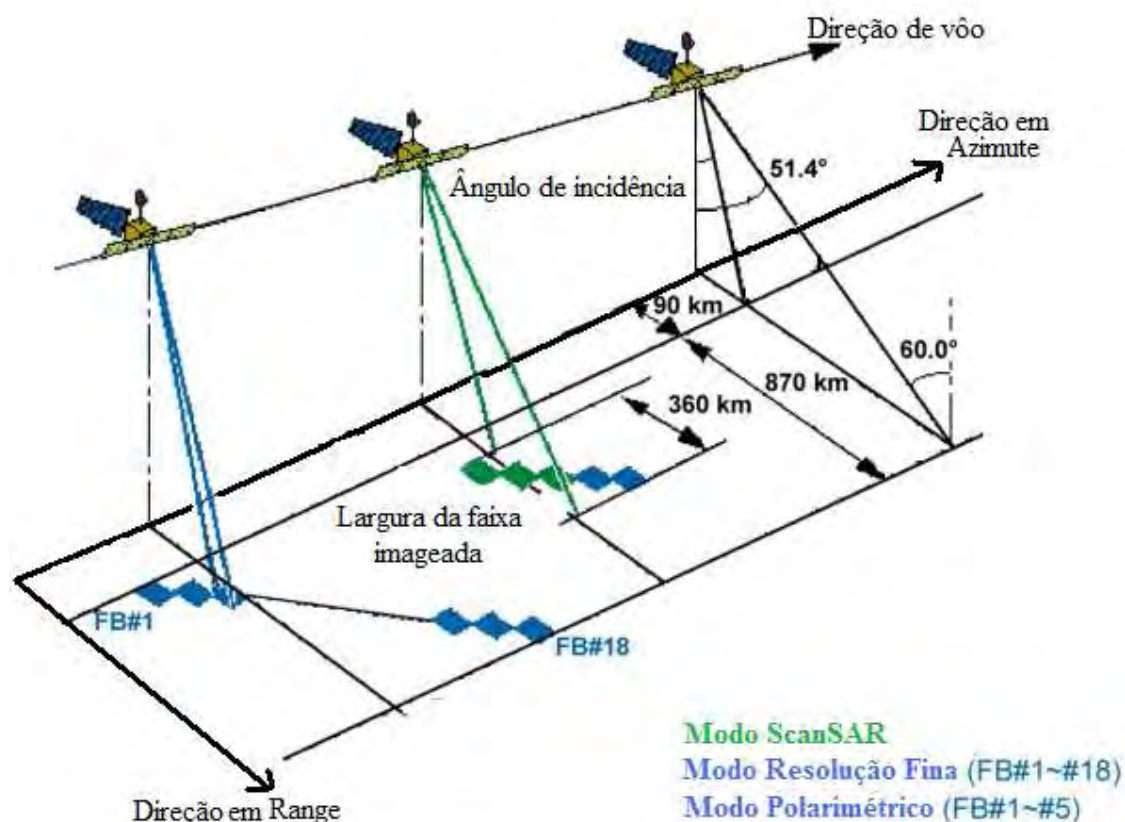


Figura 2. 2 - Modos de observação do sensor PALSAR. Exemplificação dos parâmetros como ângulo de incidência, largura da faixa imageada, direção de vôo e direção em azimute.

Fonte: adaptado de Rosenqvist et al. (2007).

As imagens de radar apresentam um ruído, *speckle*, devido à natureza coerente das microondas. Este ruído causa uma interferência aleatória construtiva e destrutiva, formando áreas claras e escuras na imagem (JENSEN, 2009). O *speckle* pode ser reduzido por meio do processamento *multilook* que processa porções da imagem e recombinações destas. O uso de filtros pode ser uma ferramenta efetiva na redução do *speckle*. Existem vários filtros para esta finalidade. Os filtros transformam as imagens originais visando obter uma nova imagem com melhoras em suas características, como a redução de ruídos (FRERY et al., 1999). Devido à geometria de imageamento, a

imagem SAR apresenta inerentes distorções geométricas, conhecidas como sobreposição, encurtamento e sombreamento. Estas distorções são induzidas pela topografia do terreno (LEE; LEE, 2009).

A imagem radar é uma representação bidimensional da potência de retorno do radar por unidade de área. A potência recebida é o produto da potência por unidade de área iluminada, multiplicada pela área de espalhamento efetivo do alvo. A Equação 2.1 a seguir, representa a equação fundamental do radar (JENSEN, 2009, LECKIE; RANSON, 1998):

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma A_r}{(4\pi)^2 R^4} \quad (2.1)$$

Onde P_r é a potência recebida; P_t é a potência transmitida para o alvo; G_t é o ganho da antena na direção do alvo; R é a distância na direção ortogonal (ou direção em *range*) do transmissor ao alvo; σ é a área de retroespalhamento efetivo do alvo (seção transversal de radar) e A_r é a área da antena receptora.

A equação de radar é o produto dos parâmetros do sistema e de parâmetros do alvo que produzem o retroespalhamento na secção transversal σ . Ao dividir σ pela unidade de área do terreno, obtém-se o sigma zero (σ^0) ou coeficiente de retroespalhamento do radar. O coeficiente de retroespalhamento σ^0 é expresso como logaritmo em unidades decibéis (dB) e determina a quantidade de energia eletromagnética refletida por uma célula de resolução para o radar.

A intensidade de energia que retorna para o radar pode variar, basicamente, em função dos parâmetros do sensor como a frequência ou comprimento de onda (Tabela 2.1), polarização e ângulo de incidência, além dos parâmetros do alvo como constante dielétrica, rugosidade e geometria. Existem quatro combinações de polarização distintas em uso, HH, HV, VH e VV, onde H indica a orientação horizontal do campo elétrico e V a orientação vertical. A primeira letra refere-se à polarização da radiação transmitida

e a segunda à polarização da radiação recebida pela antena. A rugosidade e orientação da superfície governam a direção de reflexão (LECKIE; RANSON, 1998; HENDERSON; LEWIS, 2008). A superfície rugosa em relação ao comprimento de onda incidente gera o espalhamento difuso da onda eletromagnética. Por isso as superfícies lisas proporcionam o espalhamento do tipo especular e ocorre reflexão de canto quando há interação entre duas superfícies lisas (Figura 2.3). As microondas podem ser espalhadas por diferentes mecanismos, como o mecanismo de espalhamento superficial, espalhamento volumétrico e *double bounce*. O espalhamento superficial ocorre na superfície dos objetos. O espalhamento volumétrico ocorre quando o retroespalhamento é proveniente do interior, incluindo a interação entre os componentes dos objetos como o dossel vegetal. Neste tipo de espalhamento assume-se que o retorno para o radar é derivado de espalhadores cilíndricos, finos e aleatoriamente orientados. No espalhamento *double bounce* os componentes que o modelam são reflectores de canto, na qual as superfícies reflectoras podem ser feitas de materiais com diferentes constantes dielétricas, por exemplo a interação do solo e do tronco nas florestas (FREEMAN; DURDEN, 1998).

Tabela 2. 1- Faixas do espectro de microondas em que operam os sistemas SAR.

Banda	Frequência (GHz)	Comprimento de onda (cm)
P	0,4 - 1,0	30 - 75
L	1,0 - 2,0	15 - 30
S	2,0 - 4,0	7,5 - 15
C	4,0 - 8,0	3,7 - 7,5
X	8,0 - 12,0	2,5 - 3,7

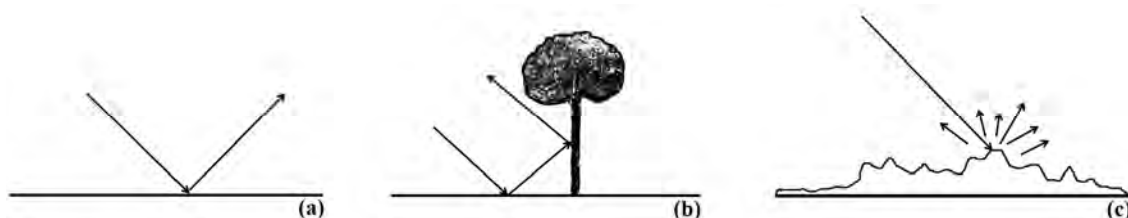


Figura 2.3 - Tipos de superfície-espalhamento associado: (a) lisa-especular, (b) lisa-reflexão de canto, (c) rugosa-difuso.

Fonte: adaptado de Leckie e Ranson (1998).

2.2.1 SAR e vegetação

Muitos estudos têm utilizado dados SAR de variados sensores para caracterizar, classificar, avaliar e monitorar a estrutura florestal, bem como, estimar sua biomassa, entre outros aspectos (GAMA et al., 2010; IMHOFF, 1995; KASISCHKE, et al., 1994, 1995, 1997; LE TOAN et al., 1992; LUCAS et al., 2004; LUCKMAN et al., 1997; MOREAU; LE TOAN, 2003; MOUGIN et al., 1999; MITCHELL, 2003; POPE et al., 1994; PROISY et al., 2000, 2002; SANTOS et al., 2002, 2003; SIMARD et al., 2002; TOWNSEND, 2002; VALERIANO, 1996).

O uso do SAR em estudos florestais, principalmente para análises da estrutura e biomassa florestal, tem apresentado vantagens sobre o uso de sensores que operam na faixa do visível e infravermelho, pois estes estão sujeitos a interferências atmosféricas e interagem preponderantemente com as camadas exteriores do dossel. O sistema que opera na faixa das microondas possibilita a penetração no dossel em profundidades variáveis, dependendo dos parâmetros do sensor, permitindo fornecer informações dos componentes do interior do dossel e da estrutura florestal (TOWNSEND, 2002).

Os componentes do dossel vegetal como as folhas, galhos, ramos e troncos, podem ter significativo efeito na atenuação das microondas emitidas pelo sensor. Isto depende da natureza do dossel e das características do sensor. Elementos que são menores em relação ao comprimento de onda são atenuadores. Para os comprimentos de onda maiores, a atenuação tem relação com o volume de elementos espalhadores e seu conteúdo de umidade (LECKIE; RANSON, 1998). A penetração da radiação eletromagnética das microondas no dossel florestal é diferente para cada comprimento de onda. A radiação da banda X interage somente com a parte superficial da vegetação e o retroespalhamento está relacionado com a camada superior do dossel. A banda C interage com as folhas e pequenos galhos e conseqüentemente, este comprimento de onda é mais sensível às características do dossel como densidade, tamanho, orientação das folhas, arquitetura e diversidade do dossel (MOUGIN et al., 1999). Para a banda L a penetração é maior e excede a espessura do dossel sendo mais sensível aos maiores

componentes deste. Fontes de espalhamento para esta banda incluem os componentes do dossel como também a interação entre o tronco e superfície do solo. A banda P apresenta a maior penetração quando comparada com as outras bandas. Os mecanismos de espalhamento e atenuação são resultantes da interação com os troncos e grandes galhos e também com o solo. Os pequenos galhos e as folhas agem atenuando a energia para esta frequência (KASISCHKE et al., 1997; SANTOS et al., 2003).

O retroespalhamento total proveniente de áreas florestadas inclui componentes de vários mecanismos de espalhamento. A Figura 2.4 mostra os mecanismos e comportamento do retroespalhamento florestal, que incluem: o espalhamento da superfície do dossel, espalhamento do interior do dossel (volumétrico), espalhamento da interação do dossel-solo, espalhamento direto do solo, espalhamento da interação tronco-solo (*double bounce*) e espalhamento do tronco. A energia proveniente do espalhamento abaixo do dossel será atenuada pelos componentes do dossel durante seu retorno para o sensor. Quando ocorre interação com o solo, fatores como a rugosidade, umidade e declividade, da mesma forma que a presença ou não de vegetação no solo influenciam fortemente o retroespalhamento (LECKIE; RANSON, 1998). O espalhamento e reflexão da energia de microondas são sensíveis a variação de umidade do solo e presença ou ausência de água, devido a alta constante dielétrica da água. Florestas com superfícies alagadas, como os manguezais, aumentam o retroespalhamento devido a interação solo alagado e troncos resultando no espalhamento *double bounce* (RICHARDS et al., 1987).

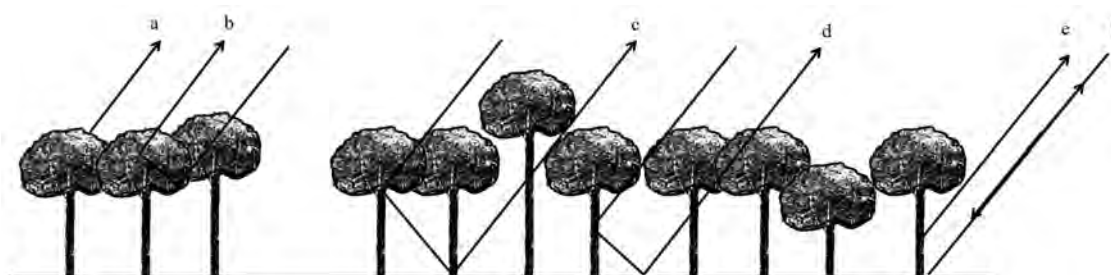


Figura 2.4 - Mecanismo e comportamento do retroespalhamento de florestas: (a) retroespalhamento da superfície do dossel (b) espalhamento interior do dossel, volumétrico; (c) interação dossel/solo (d) *double-bounce*, interação do tronco/solo; (e) espalhamento do tronco; (f) espalhamento do solo. FONTE; Adaptado de Ulaby et al. (1984).

A interação das microondas no dossel é um dos mecanismos que ocasiona a despolarização do sinal incidente. Segundo Leckie e Ranson (1998), o estado de polarização da energia que retorna ao radar é fortemente dependente do estado de polarização que a energia foi transmitida e da orientação dos elementos espalhadores presentes na vegetação. Em geral, pulsos com polarização horizontal são espalhados por elementos cilíndricos orientados horizontalmente, enquanto pulsos com polarização vertical são espalhados por elementos cilíndricos orientados verticalmente.

Wang e Imhoff (1993) utilizaram um modelo de retroespalhamento de dossel florestal para analisar o retroespalhamento de uma floresta de mangue de Ganges em Bangladesh. Os autores estudaram as diferenças no retorno do radar de florestas de mesma estrutura, porém em condições distintas, alagada e não alagada, utilizando imagem SIR-B banda L-HH. O modelo de retroespalhamento foi modificado para bosque de mangue consistindo em quatro camadas: dossel, tronco, raízes aéreas e superfície. O modelo consiste em cinco componentes de retroespalhamento, a saber: retroespalhamento superficial, espalhamento volumétrico do dossel, *double bounce* interação tronco-solo, *double bounce* interação solo e raízes aéreas, assim como múltiplos caminhos de interação entre solo e dossel, na qual o retroespalhamento total é a somatória das respostas destes cinco componentes. O resultado obtido pelo modelo de retroespalhamento no bosque de mangue estudado pelos autores mostrou a dominância do espalhamento volumétrico para o mangue com superfície não inundada e a presença de *double bounce* proveniente da interação tronco-solo foi maior com a presença de água sob as árvores. Para o bosque de mangue inundado a interação solo tronco foi dominante para ângulos de incidência menores e menor para os ângulos de incidência maiores (Figura 2.5), na qual aumenta o caminho da onda passando pelas camadas do dossel e dos troncos. Foi observado que o retroespalhamento para o bosque inundado foi maior do que para o não inundado.

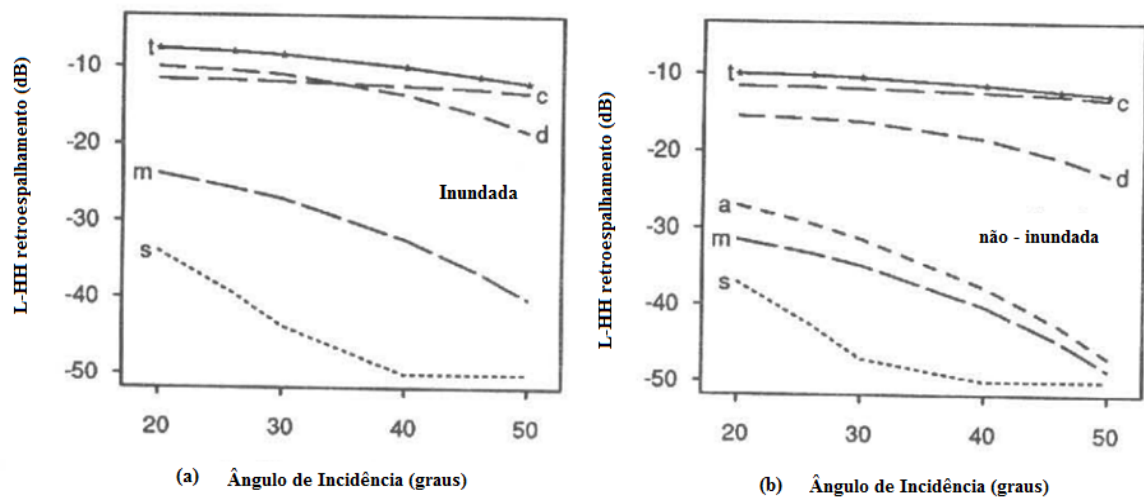


Figura 2. 5 - Prognóstico do modelo na banda L-HH para o manguezal inundado e não inundado da área de estudo. Onde a= *double bounce* interação do solo e raízes aéreas; c= espalhamento volumétrico do dossel; d= *double bounce* interação tronco solo; m= interação múltiplos caminhos do solo e dossel; s= retroespalhamento da superfície; t=total. O termo de interação solo e raízes aéreas foi modelado apenas para a floresta não inundada.

Fonte: adaptado de Wang e Imnhoff (1993).

POPE et al. (1994) desenvolveram quatro índices biofísicos derivados de dados SAR polarimétrico para análise de ecossistemas agrícolas e florestais. Os índices que se relacionam com diferentes estruturas da vegetação são: do espalhamento volumétrico (VSI), da estrutura do dossel (CSI), de biomassa (BMI) e de tipo de interação (ITI). Este último utiliza a informação de fase, enquanto que VSI, CSI e BMI são calculados utilizando valores de retroespalhamento referente as polarizações. Estes índices são baseados em razões e diferenças normalizadas, são independentes dos efeitos de *range*, sendo assim função da vegetação e das condições da superfície. Pope et al. (1994) aplicaram os índices, utilizando dados AIRSAR banda P, L e C para uma região de floresta tropical na América Central, que correspondem à quatro níveis hierárquicos de paisagem como floresta inundada, regeneração, floresta de terra firme e pântano. A importância de cada índice varia em relação a vegetação a ser estudada. Desta forma, o uso destes índices possibilita maior caracterização do tipo de cobertura vegetal. Sua análise leva em consideração, principalmente, o comprimento de onda do radar.

Proisy et al. (2002) avaliaram o efeito da estrutura do dossel de bosques de mangue em imagens SAR polarimétricas. O estudo foi feito na região da Guiana Francesa e indica para as três bandas C, L e P, a resposta do manguezal com diferentes estruturas, confirmando o grande efeito da estrutura do dossel no retroespalhamento florestal. Segundo os autores o retroespalhamento da vegetação aberta e em declínio apresentou maior valor do que a vegetação com dossel fechado, sendo ambas com a mesma biomassa, como pode ser visto na Figura 2.6. Utilizando estes dois diferentes bosques de mangue, com dossel aberto e dossel fechado, os autores simularam um modelo e observaram que a diferença do retroespalhamento dos dois bosques foi maior para a banda P, sugerindo que o alto retorno proveniente da superfície ou o espalhamento múltiplo entre os componentes da floresta foram as principais causas observadas para o aumento do retroespalhamento.

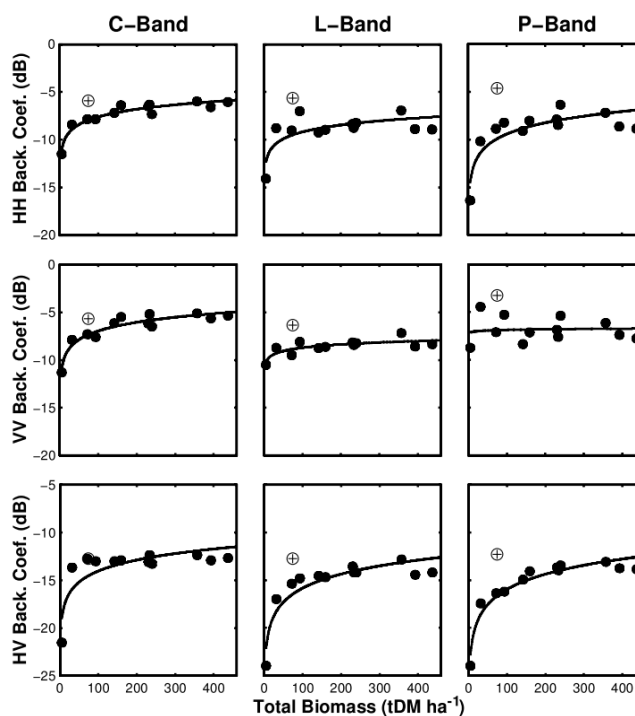


Figura 2. 6 - Medidas do coeficiente de retroespalhamento versus biomassa total para a banda C, L e P onde dossel fechado está representado por círculo preto e dossel aberto por círculo com uma cruz. A linha corresponde a linha de regressão para os 12 dosséis fechados.

Fonte: Proisy et al. (2002).

Lucas et al. (2009) utilizaram dados SAR do sensor PALSAR para analisar o manguezal de regiões tropicais da Austrália, Guiana Francesa e Indonésia. Os autores investigaram o potencial das imagens PALSAR nas polarizações HH e HV, e em conjunção com outros dados de sensoriamento remoto como o SRTM e imagens Landsat, provendo, assim, informações de discriminação estrutural dos bosques de mangue. Assim como a investigação na detecção de mudanças no manguezal. O manguezal foi mapeado a partir de informações, segundo alguns padrões característicos extraídos dos dados SAR, como o aumento do retroespalhamento conforme aumenta a biomassa florestal, chegando até um ponto de saturação do sinal do radar. Porém, foi observado que ocorre uma diminuição do retroespalhamento após o ponto de saturação nos bosques de mangue com desenvolvidos sistemas de raízes. Desta forma, os dados SAR em conjunção com dados SRTM possibilitou categorizar áreas de manguezal em classes, as quais fazem referencia à altura do bosque, sua biomassa e estrutura.

Souza-Filho e Paradella (2003) investigaram o uso de imagem SAR do Radarsat-1, banda C-HH, na planície costeira situada no nordeste do estado do Pará, uma das regiões com maior extensão de manguezal do mundo. No estudo foi demonstrado que o uso de imagens SAR possibilita o mapeamento e avaliação de ambientes sedimentares costeiros, tais como coberturas de manguezal, bancos arenosos, determinação da linha de costa e estimativa de sua variação ao longo do tempo, determinação de setores sujeitos a erosão, acreção ou estabilidade, localização de áreas desflorestadas ou em regeneração de bosques de mangue, áreas de riscos geológicos, dentre outras feições. Este trabalho mostra que o uso de SAR pode ser uma fonte de informação fundamental no mapeamento geomorfológico e monitoramento das mudanças dos ambientes costeiros nas regiões tropicais.

Mais detalhes e informações sobre a interação da vegetação com as microondas podem ser encontradas em Dobson et al. (1995); Henderson e Lewis (2008); Leckie e Ranson (1998); Townsend (2002) e Wang et al. (1995). Informações mais específicas sobre florestas de mangue podem ser encontradas em Mougin et al. (1999); Mitchell (2003) e Proisy et al. (2000, 2002).

2.2.2 Parâmetros incoerentes e coerentes

Parâmetros incoerentes são os parâmetros baseados somente nas medidas de potência do radar, tais como intensidade ou amplitude. Os parâmetros coerentes fazem uso também das medidas de fase, ângulo de orientação e elipticidade (HEDERSON; LEWIS, 1998). Os radares polarimétricos transmitem ondas em ambas às direções H e V e registram informações da amplitude e fase do sinal recebido (PARADELLA et al., 2005). A seguir serão descritas e apresentadas as equações dos parâmetros incoerentes.

Coefficiente de retroespalhamento (σ^{HH} , σ^{HV} , σ^{VV}): é o parâmetro que mede a quantidade efetiva de energia que retorna para o sensor. Obtido nas três polarizações, σ^{HH} , σ^{HV} , σ^{VV} sendo a polarização cruzada HV a média dos valores de HV e VH.

Razão de polarização paralela (R_p): parâmetro que se relaciona com a orientação e forma dos elementos espalhadores, como os galhos, realçando as diferenças entre os mecanismos de espalhamento sensíveis das polarizações VV e HH, (Equação 2.2).

$$R_p = VV / HH \quad (2.2)$$

Razão de polarização cruzada (R_c): parâmetro que está relacionado com o espalhamento de pequenos elementos despolarizadores, referentes ao espalhamento volumétrico dos elementos do dossel, em relação ao espalhamento superficial e *double bounce* (Equações 2.3 e 2.4).

$$R_c = HV / VV \quad (2.3)$$

$$R_c = HV / HH \quad (2.4)$$

Potência total (P_t): é a somatória de toda a energia que retorna para o sensor, referente ao espalhamento de todos os elementos presentes (Equação 2.5).

$$P_t = HH + HV + VH + VV \quad (2.5)$$

Índice de Biomassa – *Biomass index (BMI)*: para a banda L e P este parâmetro é um indicador do relativo valor da biomassa da madeira comparado com a das folhas. BMI é maior para florestas com pouca biomassa de folhas frescas, ou seja, aquelas que apresentam características de senescência, do que para floresta vigorosa devido a absorção das microondas pelas folhas verdes. Altos valores de BMI podem ser notados em vegetação que apresenta forte espalhamento *double bounce* como as florestas inundadas (Equação 2.6).

$$BMI = (HH + VV) / 2 \quad (2.6)$$

Índice de estrutura do dossel – *Canopy structure index (CSI)*: parâmetro de relativa importância da estrutura vegetal vertical *versus* a horizontal. Florestas dominadas por troncos e galhos verticais terão valores maiores de CSI do que florestas dominadas por galhos com tendência horizontal (Equação 2.7).

$$CSI = VV / (HH + VV) \quad (2.7)$$

Índice de espalhamento volumétrico – *Volume scattering index (VSI)*: parâmetro que mede a despolarização do sinal linearmente polarizado. Altos valores de VSI resultam quando o retroespalhamento da polarização cruzada é alto em relação com a polarização paralela. O mecanismo de despolarização ocorre devido a múltiplos espalhadores (como os espalhadores do dossel florestal). A despolarização é baixa para objetos com espalhamento superficial. VSI é uma medida indireta dos vários caminhos dos elementos espalhadores (Equação 2.8).

$$VSI = \frac{(HV + VH) / 2}{(HV + VH) / 2 + (VV + HH) / 2} \quad (2.8)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

De acordo com a divisão do litoral brasileiro em oito unidades, proposto por Schaeffer-Novelli et al. (1990), o litoral de São Paulo foi classificado no segmento VII, que vai de Cabo Frio (23°00'S) à Torres (29°20'S). Esse segmento é marcado pela estrutura cristalina da Serra do Mar, sendo também encontradas planícies costeiras, formadas por sistemas de lagunas e barreiras, assim como reentrâncias, enseadas e baías que formam áreas abrigadas, onde se desenvolvem manguezais. A região de estudo está inserida no Sistema Costeiro Cananéia-Iguape, que se localiza no litoral sul do Estado de São Paulo entre as coordenadas 24°40'S e 25°19'S e 47°24'W e 48°05'W (Figura 2.1). O sistema recebe parte da drenagem do Rio Ribeira desde 1999 e possui três ilhas principais: Cardoso, Cananéia e Comprida, formadas por sedimentos quaternários e rochas cristalinas pré-cambrianas. A planície costeira é delimitada por pontões do complexo cristalino da Serra do Mar que avançam em direção ao oceano compreendendo uma superfície de aproximadamente 2.500 km² (SUGUIO; TESSLER, 1992). Esta é uma importante região em termos ecológicos e possui uma vasta legislação ambiental vigente, dentre elas a Reserva da Floresta Atlântica do Sudeste tombada pela UNESCO como Patrimônio Natural da Humanidade (UNESCO, 2004).

De acordo com a classificação de *Koppen* o clima na região mostra características de clima tropical úmido, variando em escala decadal como tropical úmido com estação seca para tropical úmido com verões frios. As taxas máximas de precipitação ocorrem de janeiro a março (média mensal de 266,9 mm) e taxas mínimas ocorrem de julho à agosto (média mensal de 95,3 mm). A média de chuva anual de um período de 29 anos é 2.300 mm. A temperatura média anual é 23,8°C, com média mensal máxima em 27,8°C (fevereiro) e mínima em julho com 19,8°C (SILVA, 1989).

De acordo com os registros do marégrafo instalado na Base do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo localizado em Cananéia, a maré é do tipo mista, com

predominância semidiurna e a amplitude média de 0,81 m (MESQUITA; HARARI, 1983).

Na região são encontradas as espécies vegetais típicas de mangue *R. mangle*, *A. schaueriana* e *L. racemosa*, assim como floresta ombrófila e vegetação de restinga (SCHAEFFER-NOVELLI et al., 1990). Mais informações sobre os manguezais da área de estudo podem ser encontradas em Cunha-Lignon (2001, 2005) Cunha-Lignon et al. (2009a,b); Coelho-Jr (2003); Schaeffer-Novelli et al. (1990), entre outros.

3.2 Coleta dos dados de campo

Os dados estruturais referentes aos 16 bosques de mangue utilizados nesta pesquisa foram obtidos a partir dos valores estruturais de parcelas previamente estudadas por Coelho-Jr (2003), Cunha-Lignon relativos a julho de 2009 (CUNHA-LIGNON et al., 2010) e outras quatro novas parcelas obtidas durante campanha de campo em 2010. A metodologia de coleta dos dados estruturais pode ser encontrado em Cunha-Lignon (2001, 2005) e Cunha-Lignon et al. (2009a,b, 2010) e Coelho-Jr (2003). É importante frisar que a metodologia de coleta dos dados campo utilizada por estes autores é específica para o estudo da ecologia de manguezais. No presente trabalho, os dados foram adaptados para se estudar o comportamento do manguezal utilizando dados SAR. Desta forma, foi necessário agrupar parcelas pertencentes ao mesmo tipo fisiográfico, como por exemplo o tipo franja em progradação, franja com bosques maduros e bacia, permitindo obter tamanho significativo do bosque na imagem. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram a localização dos 16 bosques de mangue.

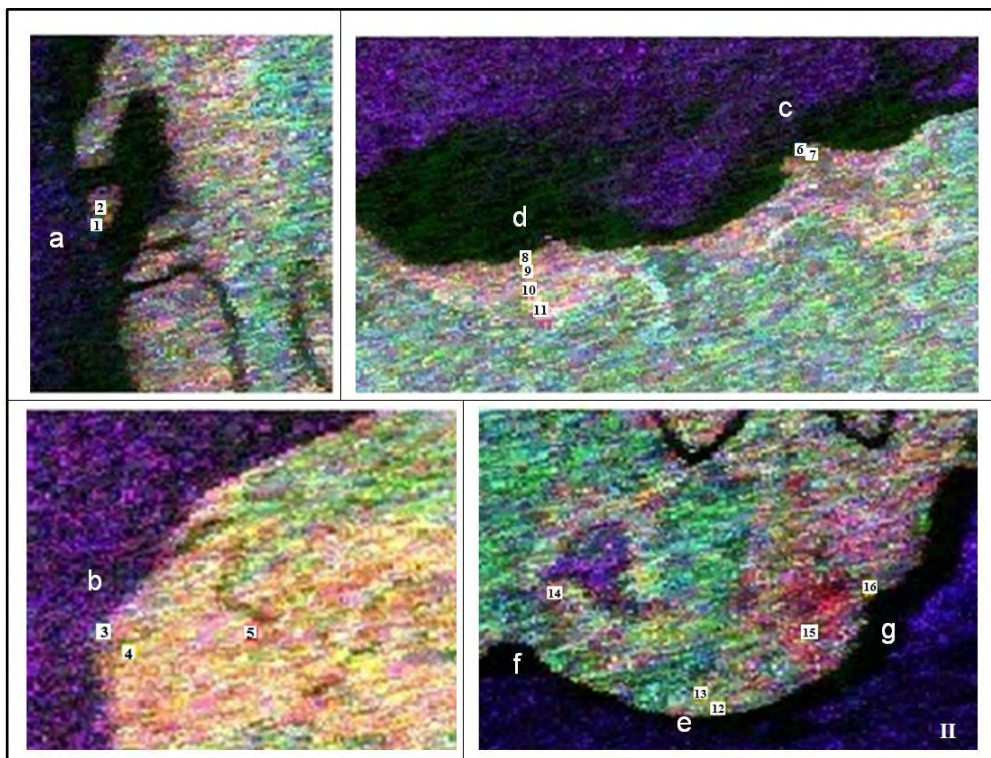
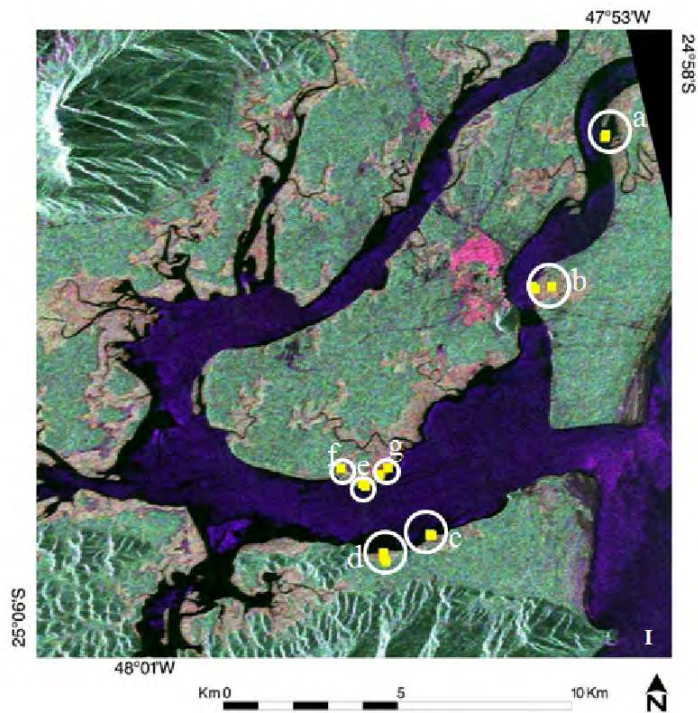


Figura 3.1 – (I) Imagem PALSAR (08/06/2009) composição colorida R(HH)G(HV)B(VV), onde são destacadas as localizações dos bosques. (II) indicação dos bosques a) Bagaçu bosques 1 e 2; b) Nóbrega bosques 3, 4, 5; c) Sítio Grande bosques 6 e 7; d) Cardoso bosques 8, 9, 10, 11; e) Prainha bosque 12, 13; f) Batatal bosque 14; g) Main Gap bosque 15 e bosque adjacente ao main gap 16.

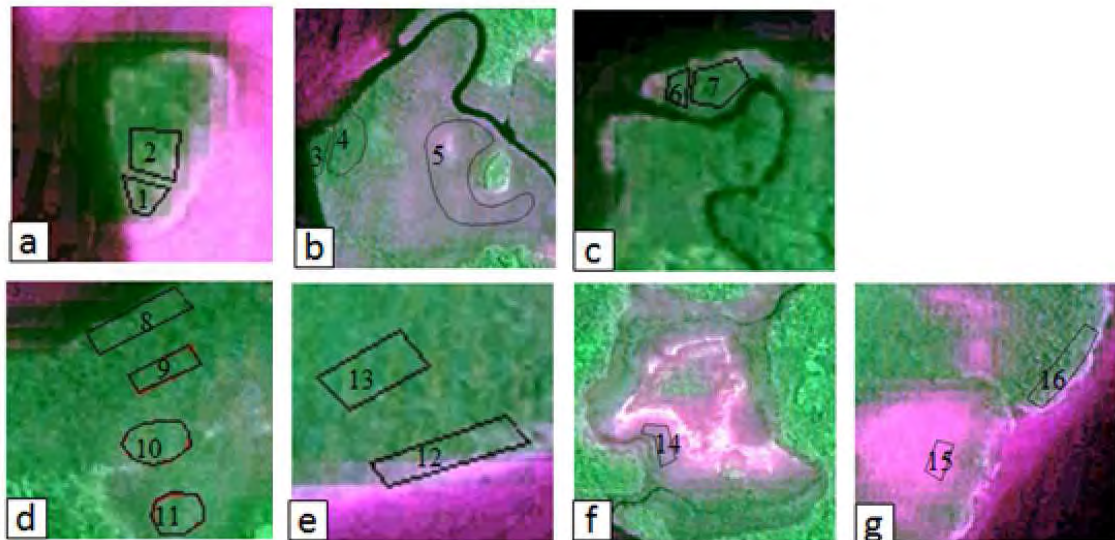


Figura 3.2 - Imagem obtida pela fusão da imagem multiespectral do sensor CCD/CBERS 2B e pancromática do sensor HRC/CBERS 2B (02/02/2008), na qual são indicados os polígonos referentes aos 16 bosques de mangue. a) Bagaçu bosques 1 e 2; b) Nóbrega bosques 3, 4, 5; c) Sítio Grande bosques 6 e 7; d) Cardoso bosques 8, 9, 10, 11; e) Prainha bosque 12, 13; f) Batatal bosque 14; g) Main Gap bosque 15 e bosque adjacente ao main gap 16.
Fonte: INPE (2008).

A definição da localização das parcelas, bem como, do tamanho das mesmas é feita em função das características estruturais representativas de cada bosque. Para caracterização do desenvolvimento estrutural dos bosques de mangue, adota-se a metodologia padronizada por Schaeffer-Novelli e Cintrón (1986), delimitando-se parcelas de tamanho variável, em função da densidade dos indivíduos. Medidas do diâmetro à altura do peito (DAP), são obtidas em espécimes maiores que 1 m de altura, utilizando-se trena graduada em unidades de π (3,14159), permitindo efetuar leituras diretas do diâmetro do tronco. Para os indivíduos entre 1 e 2 m de altura total, mede-se o DAP na base da primeira ramificação das plantas. As medidas de altura total das árvores, da base da árvore à extremidade superior da copa, são obtidas com telêmetro ou vara telescópica, de acordo com a altura das árvores, em função do limite de detecção do telêmetro de 2 a 30 m. Para o cálculo da altura do dossel toma-se os três indivíduos mais altos menos o indivíduo emergente. A identificação das espécies e determinação do número de troncos vivos e mortos são também realizadas. Para o cálculo dos valores

estruturais dos bosques de mangue foram utilizados valores de DAP médio, área basal, altura média, altura do dossel e densidade dos bosques de mangue.

Para esta pesquisa foram selecionados 16 bosques de mangue que apresentam diferentes características devido aos gradientes de salinidade e inundação e à localização, dentre outros fatores que influenciam o seu desenvolvimento. O valor médio dos parâmetros estruturais para cada bosque foi calculado por meio das médias dos valores das parcelas que compõe cada um dos 16 bosques, que variaram entre 1 a 8 parcelas (Tabela 3.1). Segundo Coelho-Jr (2003) a espécie dominante nos bosques de mangue da transversal estudada na Ilha do Cardoso, em Cananéia é *R. mangle* e seu desenvolvimento estrutural está diretamente relacionado com o tipo de substrato. Segundo Cunha-Lignon et al. (2009b), as parcelas foram dispostas ao longo de uma transversal segundo a zona de deposição preferencial de sedimento, isto é, de crescimento do bosque de mangue. Para Coelho-Jr (2003) as parcelas foram delimitadas ao longo do gradiente de inundação das marés. As características das parcelas utilizadas no presente estudo podem ser encontradas em Cunha-Lignon (2001, 2005) e Cunha-Lignon et al. (2009a,b, 2010) e Coelho-Jr (2003). Em Cunha-Lignon et al. (2010) foram utilizados os dados das parcelas que compuseram os bosques Bagaçu 1 e 2, Nóbrega 1 e 2 e Sítio Grande 1 e 2 (Tabela 3.1). Em 2010, durante o monitoramento das parcelas de Cunha-Lignon et al. (2010), foram obtidas medidas estruturais do bosque representativo da bacia Nóbrega 3, do bosque de bacia Batatal, da área de clareira (bosque *main gap*) e do bosque de franja adjacente à clareira (Tabela 3.1). Em Coelho-Jr (2003) foram utilizados os dados das parcelas referentes aos bosques Cardoso 1, 2, 3 e 4 e Prainha 1 e 2 (Tabela 3.1). Segundo Coelho-Jr¹ (comunicação pessoal) os dados referentes aos bosques maduros do Cardoso e Prainha podem ser considerados atuais, pelo fato de não existirem na região fatores que possam alterar fortemente a dinâmica dos mesmos, como também, por se tratar de bosques maduros. No Apêndice A Figuras A1 a A16 são apresentadas as características dos 16 bosques de mangue.

¹ Instituto Bioma Brasil, clemente.coelhojr@biomabrasil.org.

Tabela 3. 1- Dados estruturais referentes aos 16 bosques de mangue, obtidos com o agrupamento das parcelas estudadas por Coelho-Jr (2003) e Cunha-Lignon et al. (2010). *L. racemosa* (Lg); *A. schaueriana* (Av); *R. mangle* (Rh). Bosque franja em progradação: 1, 3 e 6; franja com bosque maduro: 2, 4, 7, 8, 9, 12, 13, 16; bosque bacia: 5,10, 11, 14; clareira 15.

Tipo Fisiográfico	Bosque	Número de parcelas	Espécie dominante	DAP médio (cm)	Altura do dossel (m)	Densidade (troncos/ha)	Área Basal (m ² /ha)	Altura Média (m)
Bosque de franja em progradação	1- Bosque franja Baguaçu 1	8	Lg	3,06	5,90	93512,50	36,79	4,75
	3-Bosque franja Nóbrega 1	2	Lg	2,71	6,89	76111,11	41,44	3,79
	6-Bosque franja Sitio Grande 1	4	Rh	3,00	5,25	48625,00	22,21	3,89
Franja com bosque maduro	2- Bosque franja Baguaçu 2	1	Av	13,91	13,66	2266,67	27,09	9,65
	4-Bosque franja Nóbrega 2	1	Rh	10,31	11,60	3800,00	28,42	6,23
	7-Bosque franja Sitio Grande 2	1	Rh	6,64	12,20	11600,00	40,19	3,97
	8-Bosque franja Cardoso 1	2	Rh	5,95	8,70	13299,00	23,95	3,55
	9-Bosque franja Cardoso 2	2	Rh	7,45	8,80	12655,50	34,50	3,00
	12-Bosque franja Prainha 1	3	Rh	10,03	8,87	8341,67	27,33	3,67
	13-Bosque franja Prainha 2	3	Rh	9,60	7,70	9247,33	29,33	4,03
	16-Bosque franja adj. <i>main gap</i>	1	Lg,Av	14,23	13,16	1952,66	29,07	7,88
Bosque de Bacia	5-Bosque bacia Nóbrega 3	1	Lg	1,78	1,47	84762,00	21,69	1,47
	10-Bosque bacia Cardoso 3	4	Lg	4,58	3,23	20413,00	15,88	2,13
	11-Bosque bacia Cardoso 4	3	Rh	4,37	3,13	23066,67	13,47	1,91
	14- Bosque Bacia Batatal	1	Lg	2,11	1,40	73333,00	24,50	1,40
Clareira	15- Bosque <i>Main Gap</i>	1	Av	3,14	5,30	14000,00	24,90	2,40

3.3 Imagem SAR

Nesta investigação foi utilizada uma imagem do sensor orbital ALOS-PALSAR. O satélite ALOS foi lançado pela Agência Japonesa de Exploração Espacial-JAXA, no Centro Espacial Tanegashima em 24 de janeiro de 2006. O satélite operou até 23 de abril de 2011 em órbita polar sol-síncrona a uma altitude de 691,65 km e com resolução temporal de 46 dias. Carregava três instrumentos de sensoriamento remoto: sensor pancromático de 2,5 m de resolução espacial denominado *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM); sensor óptico com 10 m de resolução *Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer type 2* (AVNIR-2) e o radar polarimétrico de média resolução *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) (ROSENQVIST et al., 2007).

O PALSAR, sucessor do JERS-1, que atuava na frequência de 1.270 MHz na banda L, tem capacidade de imageamento em cinco modos diferentes: *Fine Beam Single Polarization* (FBS), *Fine Beam Dual Polarization* (FBD), *Polarimetric* (POL) contendo as quatro polarizações (HH/HV/VH/VV) e informação de fase, *ScanSAR* e *Direct Transmission mode* (DT) (ROSENQVIST et al., 2007). Os dados gerados pelo sensor PALSAR podem apresentar-se em três níveis de processamento, quais sejam: nível 1.0, 1.1 e 1.5, cada qual com um grau de correção geométrica e radiométrica. O produto nível 1.1, utilizado nesta pesquisa, apresenta-se na geometria *slant range*, no formato *single look complex*, contendo informações de radiometria e fase do sinal.

A cena PALSAR utilizada neste trabalho foi adquirida através do projeto - ALOS RA# 219: “*Geoscience Applications with L-Band PALSAR data in the Tropical Environments of Brazil*”, cujo PI é o Dr. Waldir Paradella, da Divisão de Sensoriamento Remoto do INPE. A Tabela 3.2 apresenta as principais características da imagem. A Figura 3.3 apresenta a combinação colorida R(HH)G(HV)B(VV) da imagem PALSAR (corrigida geometricamente). Maiores informações sobre o imageamento e os procedimentos de calibração radiométrica e geométrica da imagem PALSAR polarimétrica nível 1.1 de processamento podem ser vistos em Shimada et al. (2009) e Rosenqvist et al. (2007).

Tabela 3. 2– Características originais da imagem PALSAR utilizada.

Sensor	ALOS-PALSAR
Frequência (Ghz)	1,2
Comprimento de onda (cm)	23,6
Polarização	HH/HV/VH/VV
Modo	Polarimétrico
Nível de processamento	1.1
Azimute de visada	Ascendente
Data / hora de aquisição	08/06/2009, 02:10 h (GMT)
Ângulo de incidência (médio)	25,7°
Resolução espacial (<i>slant. x az.</i>) (m)	9,4 x 4,5m
Tamanho do <i>Pixel</i>	9,4 x 3,8m
Faixa imageada	~30km



Figura 3.3 - Imagem PALSAR combinação colorida R(HH)G(HV)B(VV), região de Cananéia, SP (08/06/2009).

3.4 Condições climáticas e de maré na ocasião da aquisição da imagem SAR

Segundo informações fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2010), referentes aos dados de chuva acumulada em 24 h da estação pluviométrica de Iguape, distante cerca de 50 km do município de Cananéia, os dias que antecederam a aquisição da cena PALSAR foram predominantemente sem precipitação. Apenas o dia 06/06/2009 apresentou menos de 0,5 mm de chuva acumulada.

Segundo as informações do marégrafo instalado na base do IO-USP de Cananéia, sobre dados da variação do nível do mar (disponíveis no site <http://www.mares.io.usp.br/tabua>) observou-se que para o dia e horário da aquisição da cena PALSAR, 08/06/2009 às 02:10 h (GMT), a maré estava em 0,9 m. Desta forma, o ambiente estava alagado no momento da aquisição da imagem.

3.5 Processamento da imagem SAR

Foram testadas duas abordagens empregando dados SAR a fim de explorar a imagem focando no estudo do manguezal. Primeiramente, foi aplicada a classificação contextual baseada na frequência (GONG; HOWARTH, 1992) objetivando destacar os bosques de mangue dos outros alvos. Em outra abordagem buscou-se investigar a influência da estrutura de bosque de mangue sobre os valores de retroespalhamento obtidos de parâmetros incoerentes. Alguns autores, tais como Gama et al. (2010); Narvaes et al. (2010); Mougin et al. (1999); Mitchell (2003); Proisy et al. (2000); Santos et al. (2002) e Valeriano (1996) utilizaram parâmetros incoerentes e coerentes na investigação do comportamento de diferentes tipos florestais. A Figura 3.4 apresenta o fluxograma resumindo as etapas de processamento da imagem PALSAR.

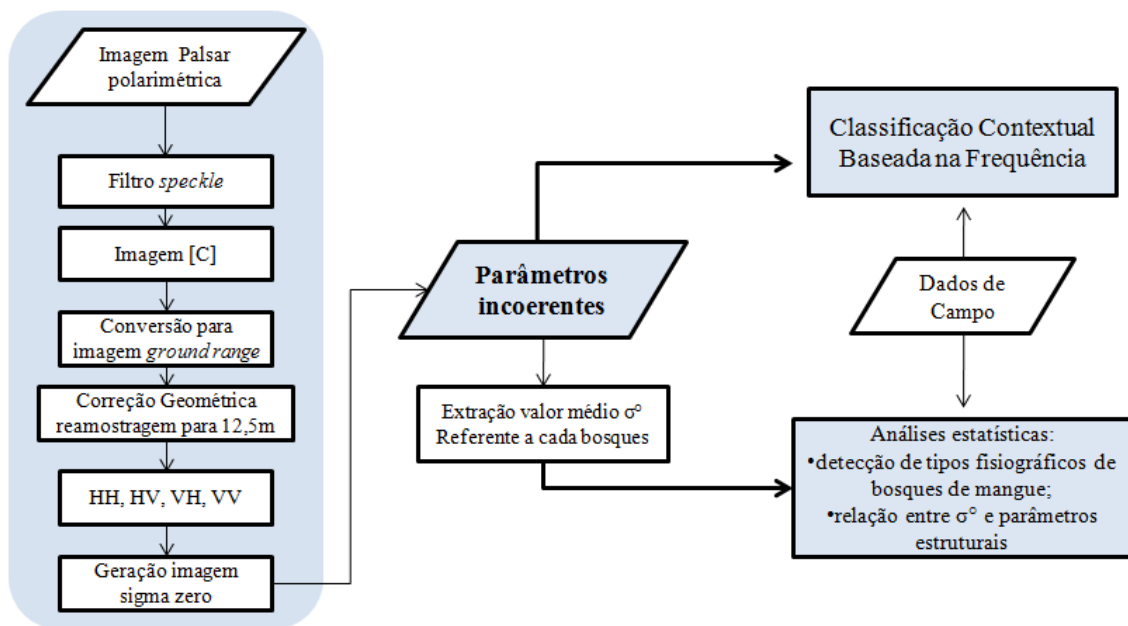


Figura 3. 4 - Fluxograma resumindo as etapas do trabalho.

Inicialmente, a imagem PALSAR foi pré-processada passando por algumas etapas descritas a seguir, na qual foram utilizados os módulos Focus e Ortho-Engineer do software PCI Geomatics v.10.3.

Filtro speckle: com a finalidade de reduzir o ruído *speckle* da imagem PALSAR polarimétrica, que se apresenta no formato de matriz de espalhamento, foi aplicado o filtro *speckle* polarimétrico, de acordo com Lee et al. (1999). Foram testados variados tamanhos de janela, a apresentou melhor resultado foi utilizando uma janela de 5x5 *pixels*. Desta forma, mesmo reduzindo o ruído *speckle* preservam-se as informações polarimétricas e espaciais da imagem original. Assim, obteve-se como produto uma imagem filtrada no formato de matriz de covariância [C4]. Desta forma, foi possível extrair as imagens em intensidade multipolarizadas (HH, HV, VH, VV).

Correção geométrica: a etapa seguinte foi transformar as imagens que se apresentam em formato *slant range* para o formato *ground range* utilizando o algoritmo *slant range to ground range conversion*. Para isto foi necessário utilizar parâmetros do sensor e do imageamento, como tamanho do *pixel* em range e em azimuth, altura do satélite acima

do solo, disponíveis em Rosenqvist et al. (2007). A correção geométrica das imagens foi efetuada com base no modelo matemático *Rational Function*. O método é baseado em ajuste polinomial com auxílio de pontos de controle no terreno (GCP's do inglês *ground control points*) e de modelos digitais de terreno. As imagens foram registradas utilizando como base cartográfica digital a folha topográfica SG-23-V-A-IV-3 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - Ilha de Cananéia, escala 1:50.000, e pontos GPS (GPS de navegação - Garmin 76S) obtidos em campo. Para a correção geométrica foram utilizados 16 GCP's distribuídos sobre a imagem PALSAR, na projeção UTM, Datum SAD69, zona 23, com tamanho de *pixel* igual a 12,5 m. O erro médio quadrático obtido nesta etapa foi igual a 10,15 m (Tabela 3.3).

Para validar a qualidade da correção geométrica foi realizada uma comparação com pontos independentes (ICP's do inglês *Independent Check Points*) extraídos da base cartográfica IBGE. O erro médio quadrático (RMSE do inglês *Root Squared Mean Error*) calculado de acordo com a Equação 3.1 (NSDI, 1998) foi de 19,13 m (Tabela 3.3).

$$RMSE = \sqrt{[\sum (X_i - X_{carta})^2 + (y_i - y_{carta})^2] / N - 1} \quad (3.1)$$

Onde X_i e Y_i são as coordenadas de pontos notáveis identificados na imagem PALSAR corrigida; X_{carta} e Y_{carta} são as coordenadas dos ICP's correspondentes extraídos da base cartográfica IBGE; N é o número de ICP's considerados.

Tabela 3. 3- Valores referentes ao resultado da correção geométrica obtido pelo programa PCI e valores obtidos para a validação da correção geométrica.

Erro do GCP (m)	RMSE	RMSE	RMSE	N GCP
	(X)	(Y)	(Total)	
	8,99	4,70	10,15	16
Validação (m)	RMSE	RMSE	RMSE	N ICP
	(X)	(Y)	(Total)	
	19,13	15,76	24,79	21

Coefficiente de retroespalhamento: na etapa seguinte, foi realizada a conversão de números digitais (ND) para valores de coeficiente de retroespalhamento (σ°) em sigma zero (decibel- dB) conforme equação descrita em Shimada et al. (2009) (Equação 3.2), onde fc é o fator de calibração igual a - 83; A é o fator de conversão igual a 32.

$$\sigma^\circ = 10 * \log(\text{DN}) + fc - A \quad (3.2)$$

Após a conversão para σ° foram obtidos os parâmetros incoerentes. Os parâmetros selecionados para esta pesquisa são baseados nas medidas de potência do radar, os quais são: o coeficiente de retroespalhamento (σ°) nas três polarizações, a potência total (Pt); a razão de polarização paralela (Rp), a razão de polarização cruzada (Rc), descritos em Henderson e Lewis (1998) e os índices de biomassa (BMI, *biomass index*), de estrutura do dossel (CSI, *canopy structure index*) e de espalhamento volumétrico (VSI, *volume scattering index*), desenvolvidos por Pope et al. (1994). Para o cálculo destes parâmetros foram utilizadas as imagens referentes à HH, HV, VH e VV, no formato σ° (escala linear).

Para a obtenção dos valores de σ° das imagens correspondentes aos 16 bosques de mangue foram gerados polígonos representativos de cada bosque de mangue com o auxílio visual de uma imagem óptica gerada pela fusão de imagem multiespectral do sensor CCD/CBERS 2B e pancromática do sensor HRC/CBERS 2B (Figura 3.2) de 02/02/2008 (imagens CBERS 2B obtidas em www.dgi.inpe.br). Os pontos de GPS obtidos em campo dentro de cada bosque de mangue juntamente com o auxílio da imagem fusão possibilitaram delimitar os polígonos referentes aos 16 bosques de mangue. A partir dos polígonos delimitados foram extraídos os valores médios de σ° dos *pixels* das imagens dos parâmetros incoerentes. Em planilhas eletrônicas do *Excel* foram geradas tabelas referentes aos valores de retroespalhamento dos 16 bosques de mangue, para cada parâmetro incoerente. Estes valores médios de retroespalhamento foram transformados para a escala decibel (dB) segundo a Equação 3.3:

$$\sigma^\circ(\text{dB}) = 10 * \log_{10}(\sigma^\circ \text{linear}) \quad (3.3)$$

3.6 Classificação contextual baseada na frequência

A partir das imagens de parâmetros incoerentes iniciou-se a etapa de classificação. Fez-se o uso do classificador contextual baseado na frequência, segundo o algoritmo proposto por Gong e Howarth (1992), implementado no software PCI Geomática v.10.3, a fim de se destacar as áreas de manguezal. A classificação contextual baseada na frequência é efetuada em duas etapas (Figura 3.5). Primeiramente, é necessário aplicar o algoritmo *Image Channel Reduction (redux)* para reduzir as bandas de entrada em uma única imagem reduzida, ou seja, o número de níveis digitais do vetor no espaço multiespectral é reduzido por meio de uma rotação do espaço multiespectral para o espaço do auto-valor. Como informações de entrada, foram utilizadas as imagens obtidas pelos parâmetros incoerentes para a geração da imagem reduzida, que posteriormente foi utilizada para a classificação. Foram testadas variadas combinações de parâmetros incoerentes como entrada para o algoritmo *Image Channel Reduction*.

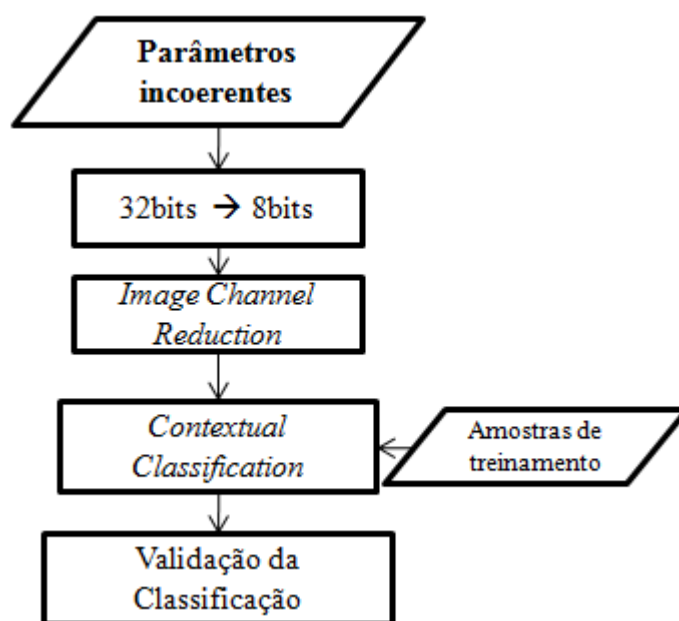


Figura 3.5 – Fluxograma das etapas efetuadas na classificação contextual baseada na frequência.

Na segunda etapa da classificação, foram selecionadas amostras de treinamento, baseadas no conhecimento de campo, para seis classes, adaptadas de Giri et al. (2010), a saber: *mangue* (4.387 pixels), *não mangue* (58.091 pixels), *água* (38.048 pixels), *urbano*

(342 *pixels*), *solo exposto* (1.097 *pixels*) e *outros* (3.443 *pixels*). A classe *mangue* inclui toda a cobertura de manguezal; a classe *não-mangue* se refere à cobertura vegetal de restinga e floresta ombrófila; a classe *água* inclui a água do oceano, do estuário e dos rios e gamboas; a classe *urbano* refere-se a área de ocupação antrópica; a classe *solo exposto* refere-se as áreas que não estão cobertas por vegetação como bancos de areia; a classe *outros* faz referência à regiões na imagem que apresentam forte retroespalhamento decorrente da topografia acidentada da parte mais montanhosa. A escolha das seis classes foi fundamental para destacar o manguezal, pois possibilitou separar a classe *mangue* das outras classes, embora estas tenham apresentado confusão entre si. Utilizando a imagem reduzida e as amostras de treinamento foi aplicado o algoritmo *Contextual Classification (contex)* e gerada a classificação baseada na frequência dos valores de níveis digitais. Foram testados diferentes tamanhos de janela para o classificador, escolhendo-se a janela 13x13 *pixels*, pois esta apresentou melhor resultado na validação da classificação. Posteriormente, a classe *outros* foi agregada na classe *não-mangue*, devido à classe *outros* ocorrer principalmente em áreas montanhosas cobertas por vegetação.

3.7 Validação da classificação digital de imagens

Para a validação da classificação foi empregado o índice *Kappa*, que é um coeficiente de concordância desenvolvido por Cohen (1960), utilizado para avaliar a precisão da classificação. O índice *Kappa* mede o grau de concordância entre a classificação e os dados de referência. A medida de concordância tem como valor máximo o valor um, que representa total concordância. O valor zero indica que o acerto pelo classificador foi igual ao acerto por acaso. Um valor menor que zero indica que a concordância encontrada foi menor do que a esperada por acaso (COHEN, 1960).

Partindo do pressuposto que existe concordância entre a classificação e a referência, ou seja, de que seja verdadeira a hipótese do valor de *Kappa* ser maior que zero, Landis e Koch (1977) sugerem uma interpretação para o valor do índice *Kappa* (Tabela 3.4).

Tabela 3. 4- Qualificação do índice kappa.

Índice Kappa	Qualificação
0 a 0,2	Ruim
0,2 a 0,4	Razoável
0,4 a 0,6	Bom
0,6 a 0,8	Muito bom
0,8 a 1,0	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977).

Para a validação, foi utilizado o método implementado no software PCI Geomática v10.3 na qual são gerados pontos amostrais aleatórios sobre a imagem classificada. A Tabela 3.5 mostra o número de pontos amostrais para cada classe.

Tabela 3. 5- Pontos amostrais para cada classe utilizados na validação da classificação.

Classe	N Pontos
Mangue	100
Não - Mangue	75
Água	50
Urbano	25
Solo Exposto	25

A partir da matriz de confusão, ou matriz de erros, referente aos pontos amostrais e classificados pode-se analisar os erros de inclusão e exclusão da classificação. Segundo Congalton e Green (2008) a matriz de confusão é uma forma eficiente de representar a exatidão de uma classificação.

3.8 Análises estatísticas

As análises estatísticas descritas a seguir foram efetuadas no programa *Statistica 7*. A fim de realizar análise inicial do comportamento dos diferentes tipos fisiográficos de bosques de mangue como resposta ao retroespalhamento dos parâmetros incoerentes foi aplicado o teste não paramétrico *Kruskal – Wallis*. Este é um teste alternativo ao teste ANOVA, que é usado para comparar três ou mais amostras. O mesmo testa a hipótese nula que as diferentes amostras comparadas pertencem à mesma distribuição ou a distribuições com a mesma média (STATSOFT, 2011). Posteriormente, foi aplicado o teste multi-comparação a fim de verificar quais variáveis apresentavam-se

estatisticamente distintas. O teste *Kruskal – Wallis* foi escolhido devido aos valores de retroespalhamento dos parâmetros incoerentes para o agrupamento dos bosques referentes aos tipos franja em progradação, franja de bosque maduro e bosque de bacia não apresentarem distribuição normal. O tipo clareira não foi analisado no teste *Kruskal – Wallis*, pois este bosque é representado por apenas uma parcela. Desta forma, pretendeu-se verificar estatisticamente a diferença entre estes tipos de bosques de mangue nos parâmetros incoerentes.

A seguir, as estatísticas empregadas para as análises das relações entre os valores de σ° e os parâmetros estruturais dos 16 bosques de mangue. Para a análise exploratória foram feitas as correlações entre as variáveis, a fim de se verificar o grau de associação entre as mesmas. Foi utilizado o coeficiente de correlação (R) (Pearson), o qual pode variar de -1 a +1. O quanto mais próximo desses valores, mais forte a associação das variáveis em exame.

Para investigar os parâmetros incoerentes que possam indicar os parâmetros estruturais de bosques de mangue foram aplicadas análises de regressão linear simples e multivariada. Segundo Neter et al. (1996) o modelo de regressão é um modo de expressar estatisticamente a tendência da variação da resposta de (y) em relação à variável preditora (x). O percentual da variância total que é explicada pela reta obtida pelo modelo de regressão pode ser estimado pelo coeficiente de determinação R^2 . O coeficiente de determinação R^2 usualmente aumenta com o acréscimo de variáveis independentes na regressão multivariada. O coeficiente de múltipla determinação ajustado (R^2 ajustado) é um coeficiente que se ajusta com o acréscimo de variáveis independentes no modelo de regressão. Desta forma, pode ser útil na comparação de dois ou mais modelos de regressão com número diferente de variáveis independentes.

Para a análise da variância da regressão linear simples, na qual existe a hipótese de $H_0: \beta_1=0$ ou $H_1: \beta_1 \neq 0$, o teste estatístico para a análise da variância é denotado por F^* (NETER, et al., 1996). Valores altos para F^* sustentam H_1 e valores perto de 1 sustentam H_0 .

Para selecionar o conjunto de variáveis preditoras para a regressão com mais variáveis foi utilizado o método de regressão *Stepwise forward* e o método *Best Subset* (NETER et al., 1996). O primeiro método constrói interativamente uma sequência de modelos de regressão pela adição de variáveis em cada etapa. A rotina da regressão *stepwise* ajusta o modelo de regressão linear simples para cada variável x potencial. Um teste parcial F é o critério para adicionar ou remover uma variável durante as etapas. A variável x que proporciona o maior F^* é candidata a ser adicionada no modelo. Se o F^* excede um nível predeterminado a variável x é adicionada. Caso contrário, o programa termina com nenhuma variável considerada suficientemente útil para entrar no modelo de regressão. Foram testados diversos conjuntos de variáveis explicativas. O método *Best Subset* possibilita gerar todas as (n) possíveis regressões ($n=2^k$, onde k é igual ao número de variáveis independentes).

Como critério de seleção das funções de regressão, foram observados principalmente os maiores valores de R^2 e R^2 ajustado e menor correlação entre as variáveis explicativas e funções mais simples, com menos variáveis.

A identificação de *outliers* foi realizada com análise dos valores dos resíduos excluídos padronizados (*studentized deleted residuals*) e valores de *Leverage* da matriz *Hat* (NETER et al., 1996). A presença de *outliers* em y foi verificada analisando os valores dos resíduos excluídos padronizados que excedem o valor crítico $t(1-\alpha/2n; n-p-1)$ obtido por meio do procedimento de Bonferroni (onde p é o número de parâmetros, n é o número de observações e α é o nível de significância). Para a identificação dos *outliers* em x foram utilizados os valores de *Leverage* superiores a $2p/n$. Com a finalidade de verificar a influência dos *outliers* foi aplicada a medida de influência denominada Distância Cook (NETER et al., 1996), a qual considera a influência da i -ésima observação em todos os valores ajustados. Para determinar cada valor percentil correspondente utiliza-se a distribuição $F(p, n-p)$. Desta forma, se for até 20%, a i -ésima observação não é considerada influente. Por outro lado caso seja próximo à 50% ou acima desse valor, é considerada influente.

Para validação dos modelos obtidos para cada parâmetro estrutural foi utilizado o valor da soma dos quadrados da predição (PRESS) (NETER et al., 1996). O critério PRESS é um modo de avaliar o valor ajustado do modelo para prever a resposta observada. O valor de PRESS é comparado com o valor da soma dos quadrados do erro (SSE) do modelo ajustado. Segundo Neter et al. (1996) quanto mais próximo o valor de PRESS do valor do SSE, suporta-se a validade do modelo.

Para a análise da normalidade dos resíduos da regressão foi utilizado o teste de normalidade do método *Shapiro Wilk*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da estrutura dos bosques de mangue

Os 16 bosques de mangue utilizados nesta pesquisa foram formados a partir do agrupamento dos bosques estudados por Coelho-Jr (2003) e Cunha-Lignon et al. (2010). Em 2010, foram obtidos dados de campo complementares em quatro bosques, bosques de bacia Nóbrega 3 e Batatal, *main gap* e *adjacente ao main gap*. Os valores médios referentes aos parâmetros estruturais dos 16 bosques de mangue como altura do dossel, altura média, DAP médio, densidade e área basal, podem ser vistos na Tabela 3.1. Os bosques de mangue apresentam-se divididos em tipos fisiográficos, a saber: franja em progradação, franja com bosques maduros e bacia. Foi também considerado no estudo, um bosque que representa uma grande clareira.

Estes tipos fisiográficos apresentam diferenças entre seus respectivos parâmetros estruturais. A Figura 4.1 apresenta os valores médios e desvio padrão relacionados aos tipos de bosques identificados. A altura do dossel é o único parâmetro que distingue os tipos franja em progradação (6 m), franja bosque maduro (11 m) e bacia (2 m). Com os parâmetros densidade e DAP médio foi possível diferenciar franja de bosque maduro (7.895 troncos/ha) dos tipos franja em progradação (72.750 troncos/ha) e bacia (50.394 troncos/ha), visto que estes últimos apresentam troncos mais finos. Com relação aos parâmetros área basal e altura média, observa-se a distinção entre bacia e franja.

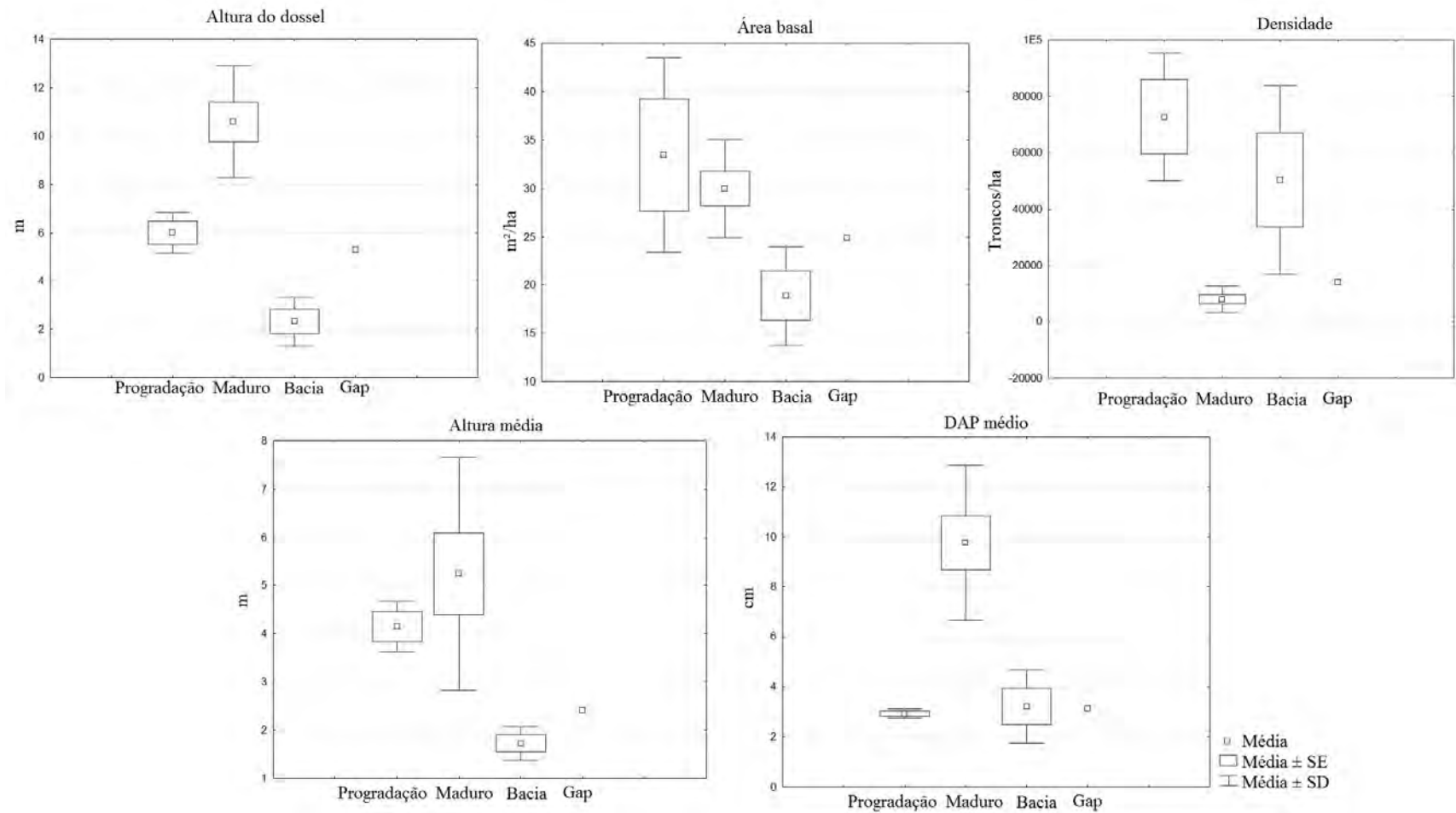


Figura 4.1 – Média, erro padrão (SE) e desvio padrão (SD) dos tipos fisiográficos de bosques de mangue- franja em progradação, franja bosque maduro, bacia e clareira (*main gap*) referentes aos parâmetros estruturais altura do dossel, altura média, DAP médio, área basal e densidade.

Bosques de Bacia - Os bosques de bacia Batatal, Cardoso 3, Cardoso 4 e Nóbrega 3, apresentam valores médios de altura do dossel $\leq 3,5$ m e alta densidade. Segundo Coelho-Jr (comunicação pessoal), o bosque de bacia do Cardoso que se localiza mais próximo ao ecossistema terrestre (restinga) apresenta dossel menos alterado. Seu desenvolvimento estrutural é menor e há uma grande dinâmica de plântulas e jovens, pela maior incidência de luz solar, recompondo mais rapidamente as clareiras que eventualmente surgem. Cabe mencionar que o processo causador da ocorrência de clareiras ainda é motivo de discussão.

Bosques de franja em progradação - Foram identificados três bosques do tipo franja em progradação: Baguaçu 1, Nóbrega 1 e Sítio Grande 1. Estes são constituídos por indivíduos jovens, com altura do dossel variando de 3 a 8,8 m, alta densidade arbórea com troncos finos e DAP variando de 1,25 a 4,5 cm. Normalmente, bosques em progradação localizam-se em áreas de deposição de sedimento o que possibilita a colonização e desenvolvimento destes. Estas regiões estão submetidas à forte influência da inundação pelas marés. Segundo Cunha-Lignon et al. (2009b), na análise dos bosques em progradação observa-se que superfícies deposicionais são colonizadas por bosques com baixo desenvolvimento estrutural normalmente associada com *S alterniflora*.

Bosques franja desenvolvidos - O terceiro tipo fisiográfico identificado na área de estudo corresponde à franja com bosque maduro, como em Baguaçu 2, Nóbrega 2, Sítio Grande 2, Cardoso 1, Cardoso 2, Prainha 1, Prainha 2 e bosque adjacente ao *main gap*. Esses bosques são bem desenvolvidos, apresentam pouca densidade de indivíduos, com altura do dossel atingindo 14 m, aproximadamente e DAP médio variando de 6 a 14 cm. De modo geral, esses bosques são dominados por *R. mangle*. Apesar disso os bosques Baguaçu 2 e bosque adjacente ao *main gap* são dominados por *A. racemosa*.

Clareira - O bosque aqui denominado como *main gap* é caracterizado por uma grande clareira. Este bosque não foi classificado em nenhum dos tipos fisiográficos descritos anteriormente, pois é o único que apresenta indivíduos adultos mortos e jovens vivos, indicando colonização da área. As medidas obtidas são referentes aos indivíduos vivos, onde a altura do dossel atinge um pouco mais de 5 m. Observa-se também, grande área

de solo exposto. O bosque do *main gap* provavelmente apresentava características estruturais semelhantes ao bosque adjacente antes da ocorrência de processo natural que deve ter ocasionado a clareira. Esta constatação é baseada na localização próxima dos bosques e principalmente, pelo domínio de *A. racemosa* entre os indivíduos adultos mortos (Cunha-Lignon, comunicação pessoal).

A Figura 4.2 mostra o resultado da análise de agrupamento dos 16 bosques de mangue calculado a partir dos valores de altura do dossel, DAP médio e densidade média dos bosques. Observam-se três grupos distintos denominados como A, B e C, cujas características estruturais estão relacionadas com os tipos fisiográficos.

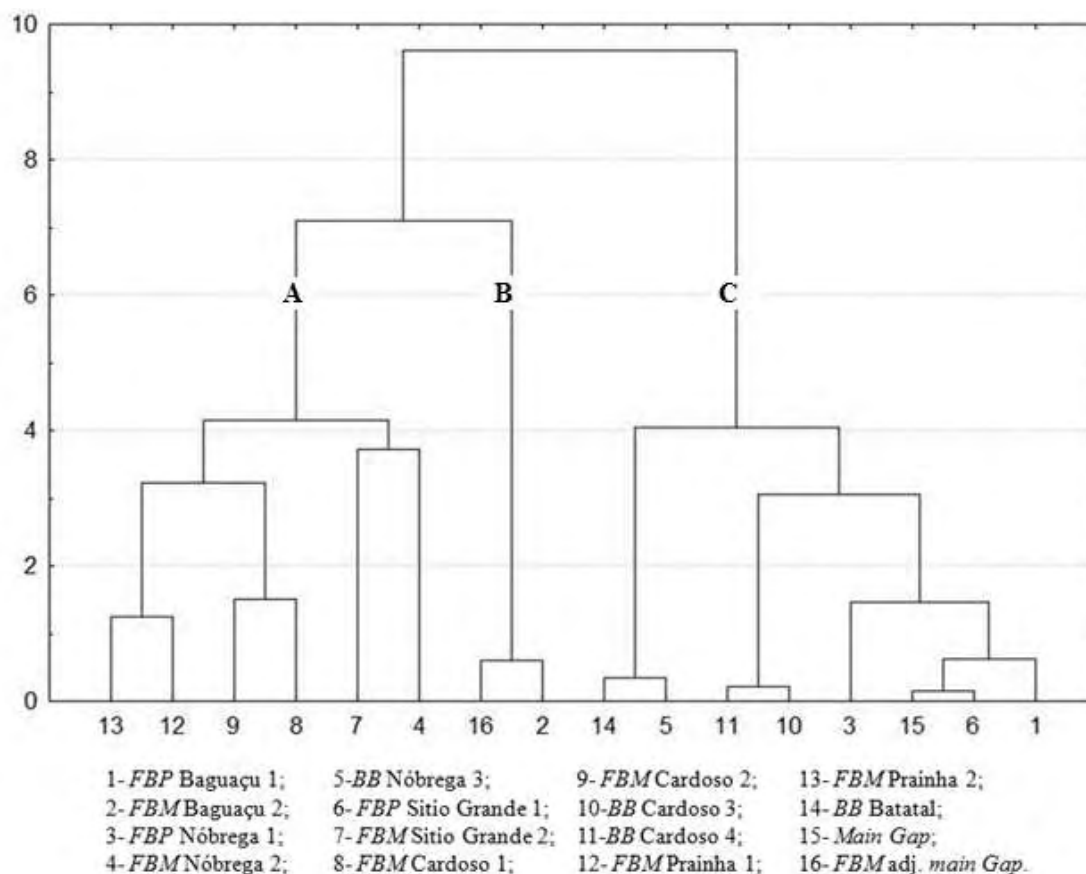


Figura 4.2 - Análise de agrupamento, utilizando distância Euclidiana, das variáveis estruturais: DAP médio, altura do dossel, densidade (escala logaritmica), referentes aos 16 bosques de mangue. Onde: bosque de franja em progradação (FBP), franja com bosque maduro (FBM) e bosque de bacia (BB).

O grupo A reúne bosques típicos de franja com bosques maduros, que são: Nóbrega 2, Sítio Grande 2, Cardoso 1, Cardoso 2, Prainha 1 e Prainha 2. Tratam-se de bosques com grande desenvolvimento estrutural. Segundo Coelho-Jr (comunicação pessoal) os bosques de franja do Cardoso e Prainha que estão mais perto do estuário apresentam maior desenvolvimento estrutural e, conseqüentemente, árvores maiores e com copas mais espaçadas. Cunha-Lignon et al. (2009b) caracterizaram os bosques maduros do Nóbrega e Sítio Grande indicando grande desenvolvimento estrutural, domínio de *R. mangle*, valores altos de altura do dossel e DAP médio e baixa densidade.

O grupo B do gráfico de agrupamento engloba dois bosques de franja maduros com características similares: Bagaçu 2 e bosque adjacente ao *main gap*. Ambos são dominados pela espécie *A. racemosa*, com indivíduos bem desenvolvidos, que apresentaram os maiores valores de altura do dossel e de DAP médio e pouca densidade.

Os bosques agrupados em C são os bosques de franja em progradação e bosques de bacia: Bagaçu 1, Sítio Grande 1, *main gap*, Nóbrega 1, Cardoso 3, Cardoso 4, Nóbrega 3 e Batatal. Estes bosques apresentam características em comum como a alta densidade de indivíduos, desenvolvimento estrutural pequeno, baixa altura do dossel, troncos finos e baixo valor de DAP médio. Os bosques de bacia do Cardoso são caracterizados segundo Coelho-Jr (2003), por apresentarem solos pobres em nutrientes, baixo desenvolvimento estrutural e galhos retorcidos. Segundo Cunha-Lignon et al. (2009b) os bosques em progradação são caracterizados pelo baixo desenvolvimento estrutural, dominados por *L. racemosa* com baixos valores para o DAP médio e altura do dossel, alta densidade de indivíduos e muitos troncos por indivíduo.

Segundo Coelho-Jr (2003), estudando a relação do desenvolvimento estrutural e as características físico-químicas dos bosques de mangue de Cananéia, os bosques de franja, como os do grupo A, apresentam indivíduos com maior porte colonizando zonas sujeitas a frequentes inundações pelas preamares. Entretanto, bosques de bacia que ocupam áreas com menor frequência de inundação e pobres em nutrientes, apresentam maior densidade dos troncos de pequeno porte e muitas ramificações. Cunha-Lignon et

al. (2009b) afirmam que as diferentes zonações de mangue são uma resposta a processos deposicionais, erosivos e topográficos.

Na Tabela 4.1 observam-se os coeficientes de correlação entre os parâmetros estruturais, com destaque para altura do dossel x DAP médio ($R= 0,85$) e densidade x DAP médio ($R= -0,93$). Os diagramas das correlações entre os parâmetros estruturais são mostrados na Figura 4.3. Observa-se baixa correlação entre área basal e DAP médio, resultado não esperado devido o uso do parâmetro DAP médio na formulação do parâmetro área basal.

Tabela 4.1 - Correlação entre os parâmetros estruturais altura do dossel, DAP médio, área basal, densidade (escala logarítmica) e altura média. Destaque em negrito para as correlações significativas (ao nível de 95% de confiança).

	Altura Dossel	DAP médio	Área basal	Densidade	Altura média
Altura Dossel	1,00	0,85	0,50	-0,82	0,84
DAP médio	0,85	1,00	0,13	-0,93	0,82
Área basal	0,50	0,13	1,00	0,00	0,31
Densidade	-0,82	-0,93	0,00	1,00	-0,71
Altura média	0,84	0,82	0,31	-0,71	1,00

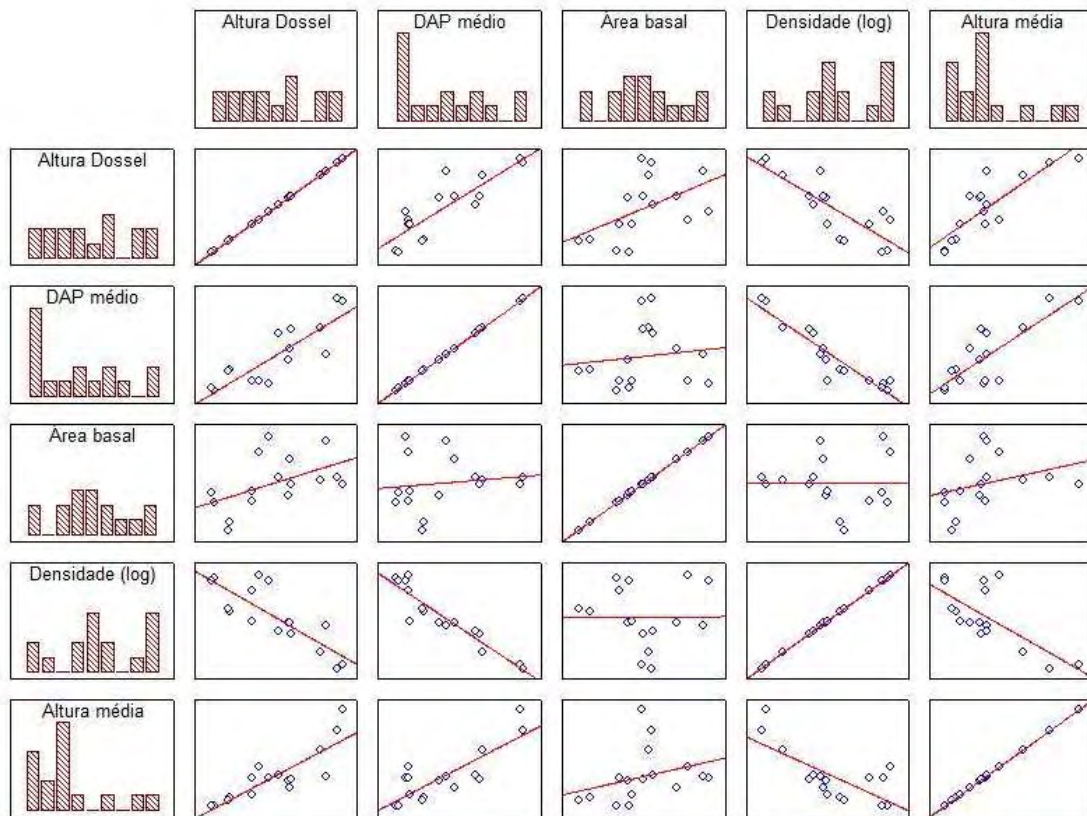


Figura 4.3 – Diagrama de correlação entre os parâmetros estruturais altura do dossel, DAP médio, área basal, densidade (escala logarítmica) e altura média.

4.2 - Parâmetros SAR

Os parâmetros incoerentes analisados neste trabalho são: coeficiente de retroespalhamento nas três polarizações - HH, HV e VV, potência total (Pt), índice de biomassa (BMI), índice de estrutura do dossel (CSI), índice de espalhamento volumétrico (VSI), razão de polarização cruzada - HV/HH e HV/VV e razão de polarização paralela - VV/HH. Cada parâmetro apresenta diferentes interações com a vegetação. Desta forma, a energia que retorna ao radar, proveniente dos diferentes bosques de mangue com distintas características estruturais, apresenta respostas relativas à interação dos espalhadores com os parâmetros SAR. As imagens geradas para cada parâmetro incoerente são mostradas nas Figuras 4.4 a 4.8.

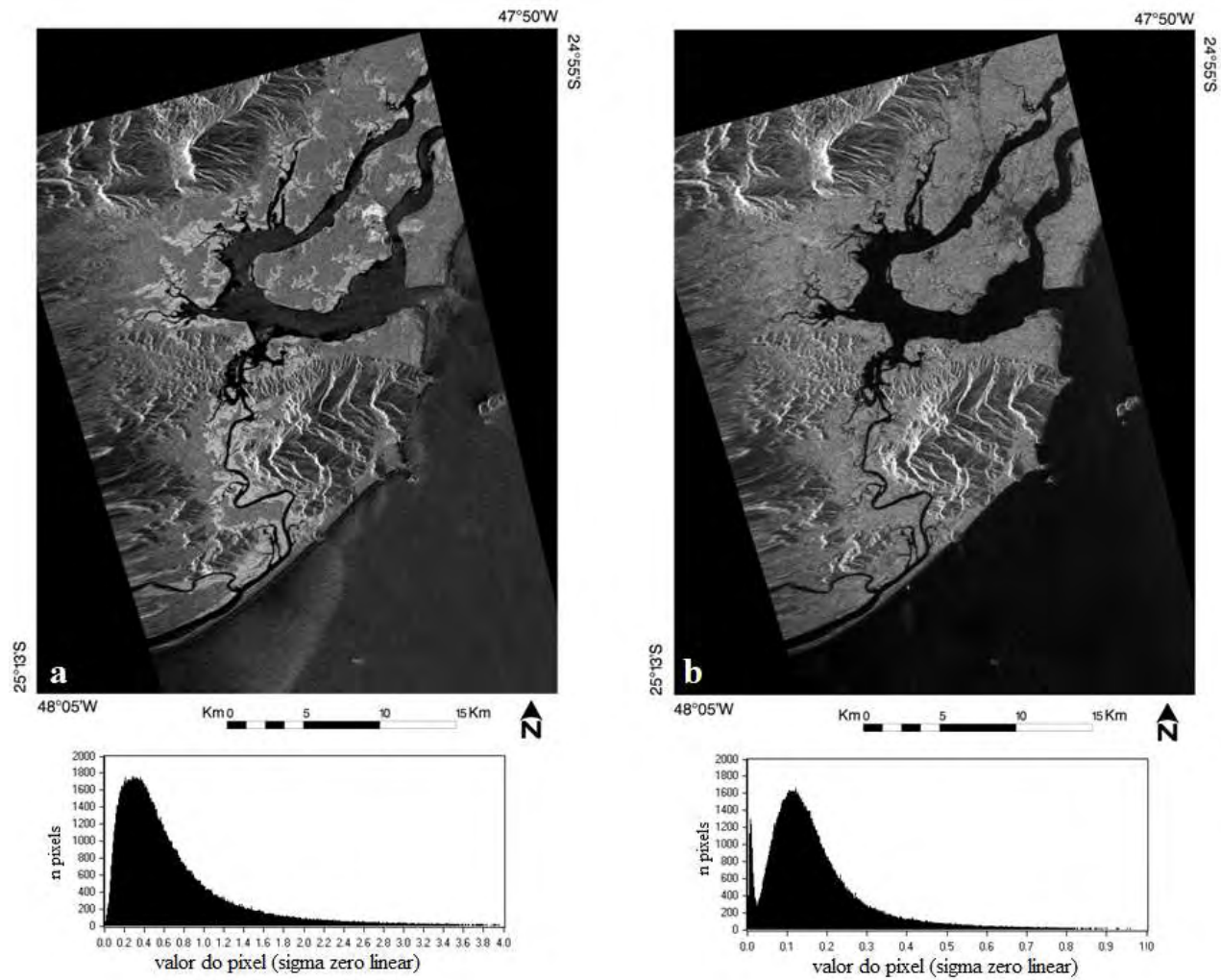


Figura 4. 4 - Imagem PALSAR de 08/06/2009. Polarizações a) horizontal HH e b) cruzada HV.

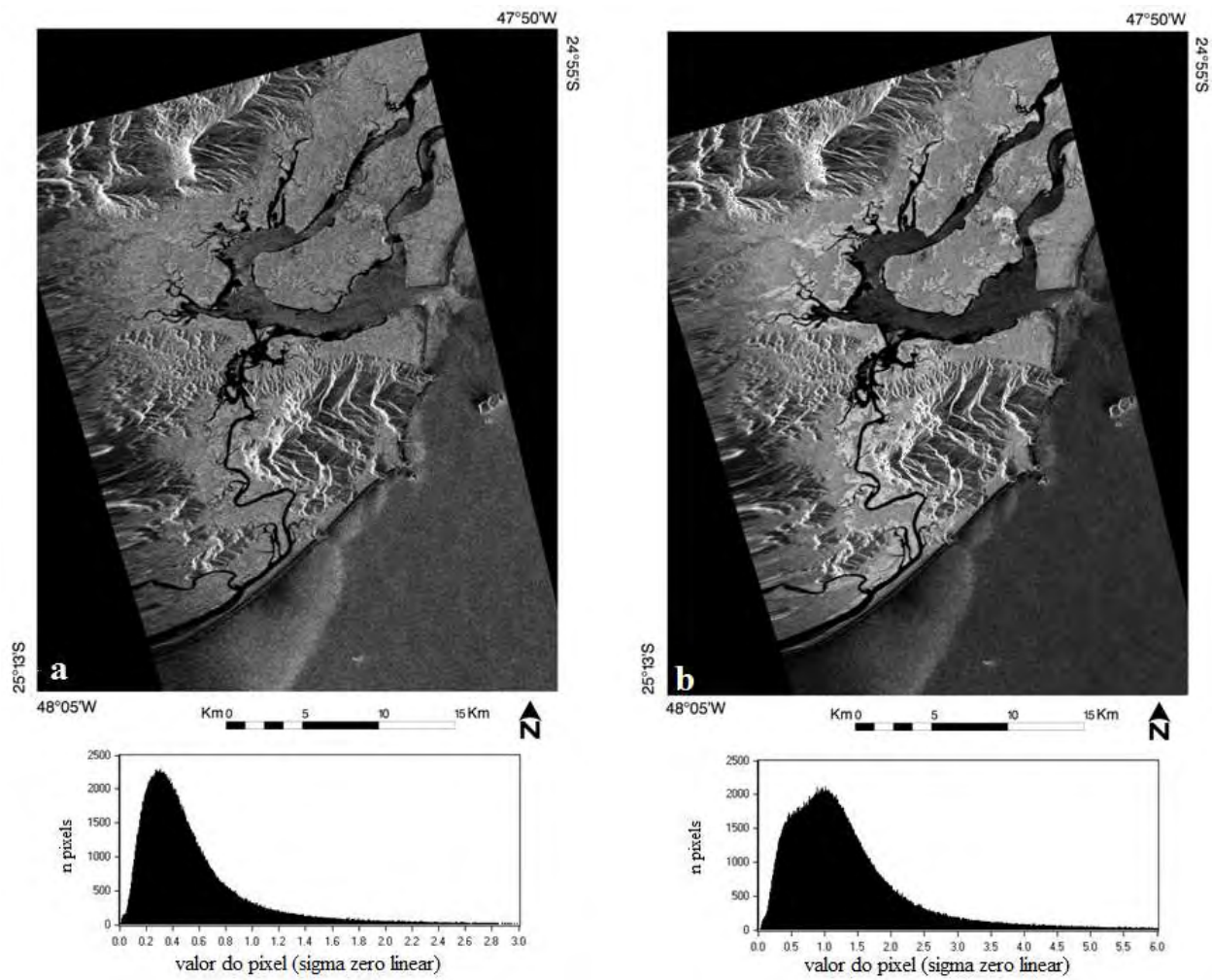


Figura 4. 5 - Imagem PALSAR de 08/06/2009. Polarização a) vertical VV e b) Pt.

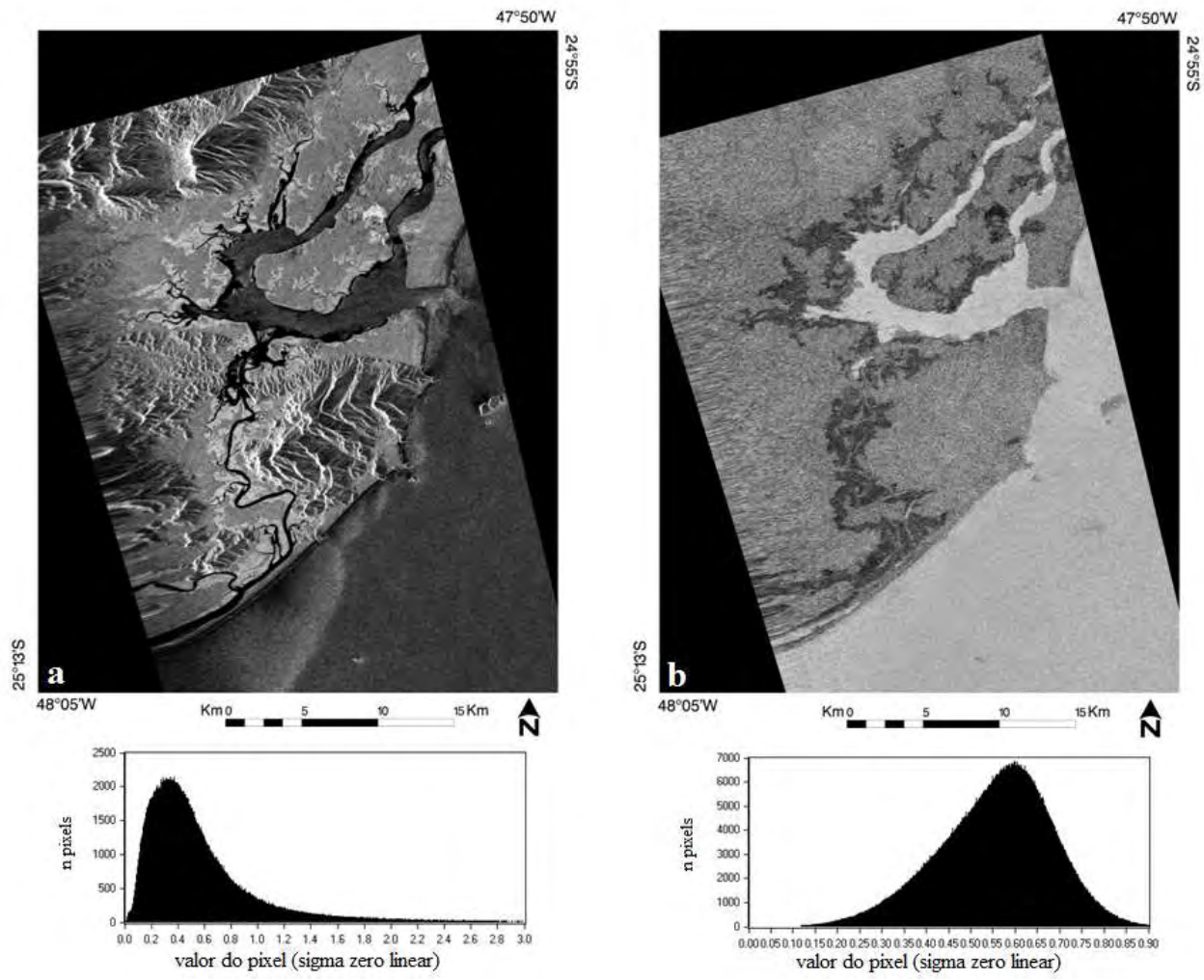


Figura 4. 6 – Imagem PALSAR de 08/06/2009. a) BMI e b) CSI.

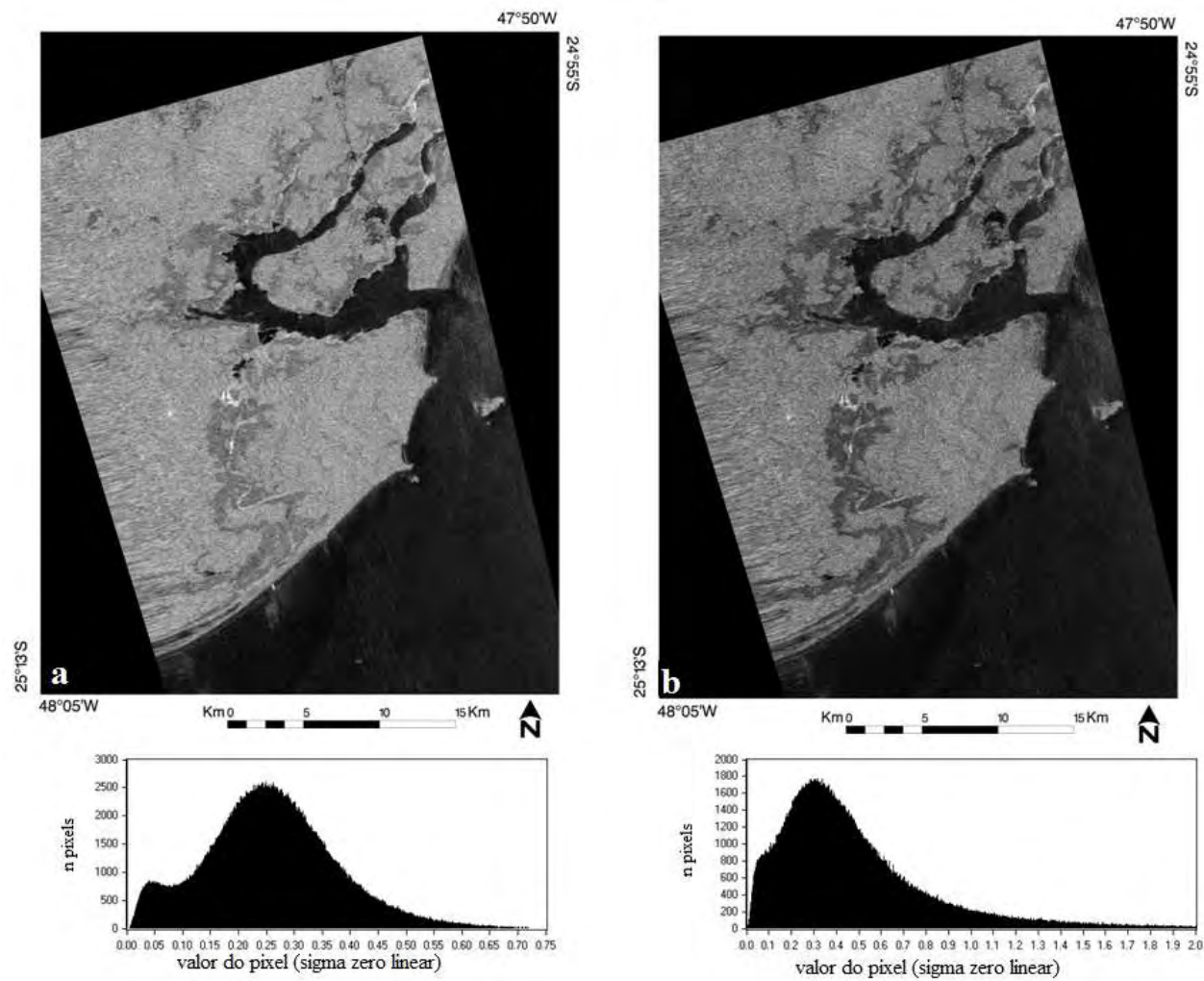


Figura 4. 7 – Imagem PALSAR de 08/06/2009. a) VSI e b) HV/HH.

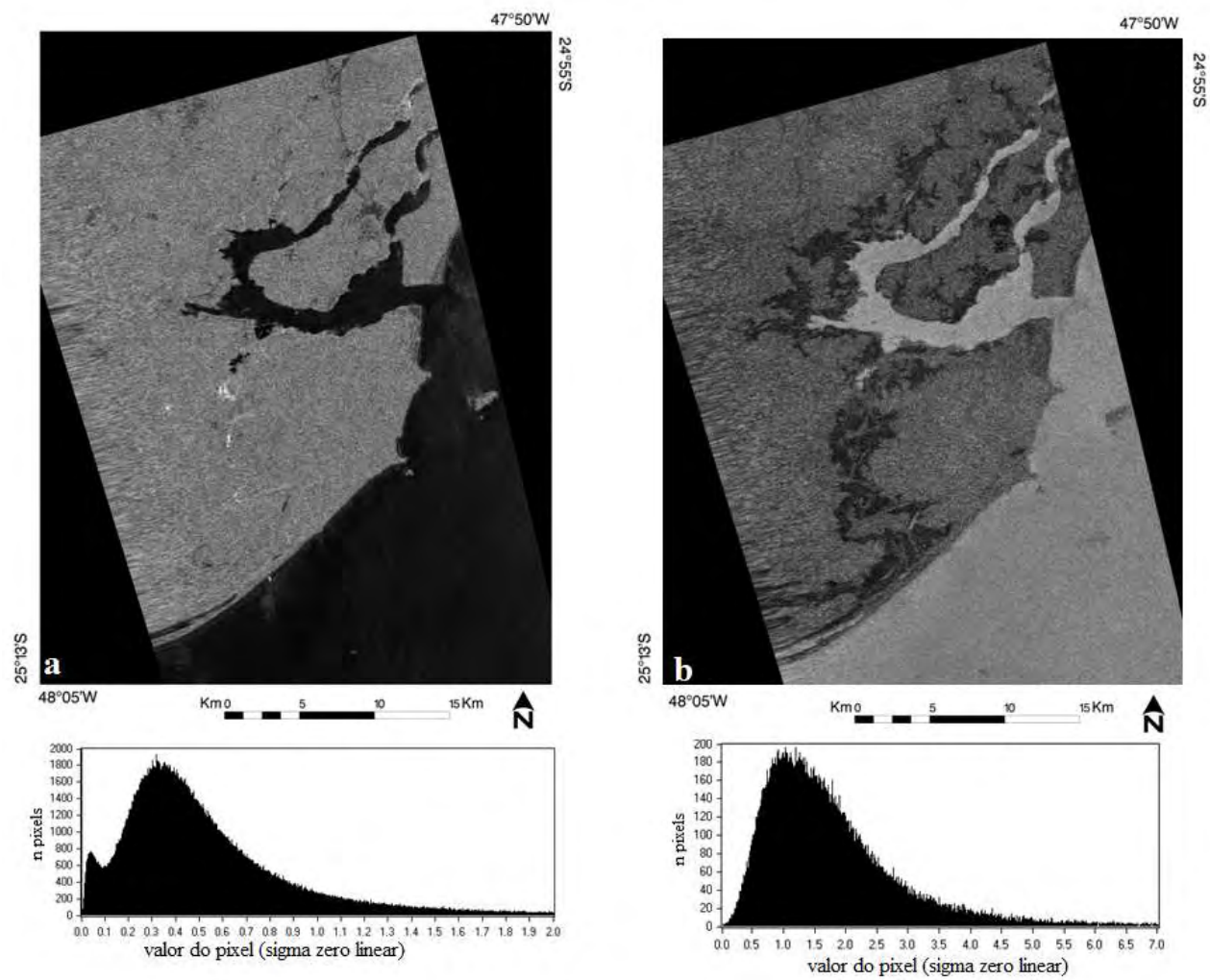


Figura 4. 8 – Imagem PALSAR de 08/06/2009. a) HV/VV e b) VV/HH.

Os valores médios de retroespalhamento referentes aos alvos tais como mangue, vegetação não -mangue, urbano, água e solo exposto, que são observados nas imagens dos parâmetros incoerente e posteriormente utilizados como classes temáticas no processo de classificação podem ser vistos na Figura 4.9 e Tabela 4.2. O ecossistema manguezal pode ser diferenciado da vegetação adjacente nas imagens referentes aos seguintes parâmetros incoerentes: polarização horizontal HH, razão de polarização paralela VV/HH, razão de polarização cruzada HV/HH, Pt, BMI, índice CSI e VSI. Somente os parâmetros incoerentes que possuem em sua equação a polarização HH possibilitaram destacar o manguezal da vegetação adjacente. Richards et al. (1987) enfatiza que a dominância do mecanismo de espalhamento referente à interação tronco-solo é efetiva para a banda L na polarização HH. Em Simard et al. (2002), o uso da banda L na polarização HH foi eficaz na classificação de florestas alagadas diferenciando-as de outras classes florestais pelo forte retroespalhamento proveniente do mecanismo *double bounce* entre a água e a estrutura das árvores. Souza-Filho et al. (2005) utilizando uma imagem JERS, banda L polarização HH, observaram o manguezal se destacando de outras feições apresentando tom de cinza claro em resposta ao espalhamento volumétrico e *double-bounce*.

De modo geral, além do forte destaque do manguezal na polarização HH observa-se também, o retroespalhamento em áreas urbanizadas. Já a polarização HV, apresentou interação com a cobertura vegetal, enquanto que os corpos d'água e áreas urbanas apareceram escuros na imagem, demonstrando pouco retorno de energia para o radar. Áreas sem vegetação aparecem escuras nas imagens de polarização cruzada, enquanto áreas cobertas por vegetação despolarizam o sinal do radar devido ao espalhamento volumétrico proveniente do dossel vegetal (LEWIS; HENDERSON, 1998). A onda incidente polarizada verticalmente VV interage mais com os componentes verticais da vegetação. A imagem com polarização VV não destacou os bosques de mangue da vegetação adjacente. Em contraste, o oceano apresentou-se com maior destaque, provavelmente devido às pequenas ondas de poucos centímetros geradas pelo vento que aumentam o retroespalhamento. Os histogramas referentes às imagens HH e VV mostram que o valor do σ° (escala linear) para a maioria dos *pixels* variou de 0,3 a 0,5 indicando maior retorno da energia para o radar do que no caso da polarização HV. Esta apresenta maior concentração dos *pixels* entre os valores 0,1 a 0,16 aproximadamente.

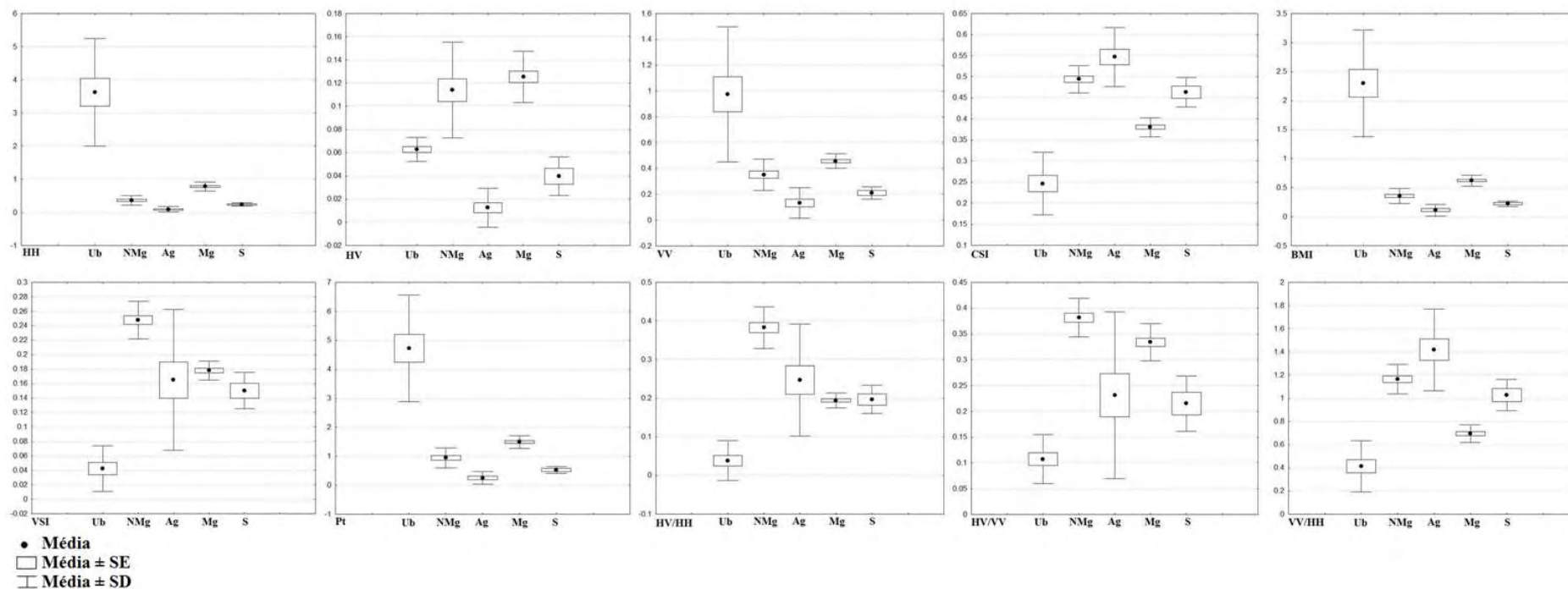


Figura 4.9 – Média, desvio padrão (SD) e erro padrão (SE) para os valores médios de retroespalhamento para cada parâmetro incoerente referentes aos polígonos dos alvos: urbano (Ub), vegetação não-mangue (NMg), água (Ag), mangue (Mg) e solo exposto (S).

Tabela 4.2 – Valores da média, mínimo, máximo e desvio padrão referente ao retroespalhamento dos alvos urbano, vegetação não-mangue, água e solo-exposto.

Parâmetro incoerente	Classe	N	Média	Mínimo	Máximo	Dev. pd
HH	Urbano	15	3,62	0,30	6,51	1,62
	Não-mangue	18	0,36	0,14	0,49	0,14
	Água	15	0,09	0,02	0,31	0,09
	Mangue	21	0,78	0,54	1,08	0,14
	Solo-exposto	6	0,24	0,18	0,31	0,05
HV	Urbano	15	0,06	0,04	0,08	0,01
	Não-mangue	18	0,11	0,05	0,16	0,04
	Água	15	0,01	0,01	0,07	0,02
	Mangue	21	0,13	0,08	0,16	0,02
	Solo-exposto	6	0,04	0,03	0,07	0,02
VV	Urbano	15	0,97	0,29	2,39	0,52
	Não-mangue	18	0,35	0,16	0,47	0,12
	Água	15	0,13	0,02	0,31	0,12
	Mangue	21	0,46	0,36	0,59	0,06
	Solo-exposto	6	0,21	0,14	0,29	0,05
BMI	Urbano	15	2,30	0,30	4,12	0,92
	Não-mangue	18	0,36	0,15	0,48	0,13
	Água	15	0,11	0,02	0,30	0,10
	Mangue	21	0,62	0,46	0,83	0,09
	Solo-exposto	6	0,22	0,16	0,30	0,05
CSI	Urbano	15	0,25	0,14	0,43	0,07
	Não-mangue	18	0,49	0,39	0,55	0,03
	Água	15	0,55	0,41	0,64	0,07
	Mangue	21	0,38	0,34	0,43	0,02
	Solo-exposto	6	0,46	0,42	0,50	0,04
VSI	Urbano	15	0,04	0,02	0,15	0,03
	Não-mangue	18	0,25	0,15	0,27	0,03
	Água	15	0,17	0,03	0,28	0,10
	Mangue	21	0,18	0,15	0,20	0,01
	Solo-exposto	6	0,15	0,12	0,20	0,03
Pt	Urbano	15	4,72	0,73	8,34	1,84
	Não-mangue	18	0,94	0,41	1,26	0,34
	Água	15	0,25	0,05	0,74	0,22
	Mangue	21	1,49	1,11	1,99	0,22
	Solo-exposto	6	0,53	0,40	0,74	0,12
HV/HH	Urbano	15	0,04	0,01	0,22	0,05
	Não-mangue	18	0,38	0,22	0,47	0,05
	Água	15	0,25	0,05	0,41	0,14
	Mangue	21	0,19	0,16	0,23	0,02
	Solo-exposto	6	0,20	0,16	0,25	0,04
HV/VV	Urbano	15	0,11	0,05	0,24	0,05
	Não-mangue	18	0,38	0,24	0,42	0,04
	Água	15	0,23	0,03	0,45	0,16
	Mangue	21	0,33	0,26	0,40	0,04
	Solo-exposto	6	0,22	0,15	0,30	0,05
VV/HH	Urbano	15	0,41	0,18	1,04	0,22
	Não-mangue	18	1,17	0,95	1,46	0,13
	Água	15	1,42	1,00	1,94	0,35
	Mangue	21	0,69	0,58	0,85	0,08
	Solo-exposto	6	1,03	0,88	1,19	0,14

4.3 Classificação contextual baseada na frequência

Após a geração dos parâmetros incoerentes SAR, iniciou-se o processo de classificação. Para tanto, foi necessário primeiramente, aplicar uma redução nas imagens de entrada. Foram testadas variadas combinações para a imagem reduzida e escolhidas as que apresentaram melhor acurácia na classificação final. As quatro melhores imagens a partir da aplicação do algoritmo *Image Channel Reduction (redux)* foram obtidas com a utilização dos índices de vegetação (BMI, CSI, VSI), das polarizações (HH, HV, VV), das razões de polarização (VV/HH, HV/HH, HV/VV) e utilizando todos os parâmetros.

Depois de obtidas as imagens pelo algoritmo *redux*, foram definidas amostras de treinamento referentes a cinco classes temáticas: *mangue*, *não-mangue*, *água*, *urbano*, *solo-exposto* e *outros*, com base em conhecimento de campo. Com isso, foi possível aplicar a classificação contextual baseada na frequência (GONG; HOWARTH, 1992) utilizando-se uma janela de 13×13 *pixels* com objetivo de destacar as áreas de manguezal. A classificação final teve sua acurácia avaliada através de 275 pontos de verificação na área de estudo. A melhor performance foi obtida com a utilização de todos os parâmetros incoerentes como parâmetros de entrada na classificação, obtendo-se boa acurácia global de 80,73%, índice *kappa* de 0,739 e variância de 0,001%, (Tabela 4.3) de acordo com os critérios propostos por Landis e Koch (1977). Resultado semelhante foi obtido com a utilização dos índices de vegetação, alcançando acurácia global igual a 80,36% e *kappa* de 0,734. A classificação utilizando as razões de polarização obteve acurácia global de 74,55% e *kappa* de 0,657, enquanto que a classificação utilizando as polarizações obteve acurácia global de 69,46% e *kappa* de 0,599. A Figura 4.10 destaca o mapeamento do mangue como resultado da classificação utilizando todos os parâmetros, sobrepostos a uma combinação R(HH)G(HV)B(VV).

Analisando a matriz de confusão da classificação (Tabela 4.4), pode-se observar que para a classe *mangue*, em um conjunto de 100 pontos de validação, 79 foram classificados corretamente, 10 como *solo exposto* e 11 como *não mangue*. Para a classe *urbano*, dos 25 pontos de validação, 9 foram classificados como *mangue*. A classe *urbano* foi a que apresentou maior confusão com a classe *mangue*.

Tabela 4.3 – Valores da acurácia global, índice Kappa, acurácia do produtor e acurácia do usuário para todas as quatro classificações.

<i>Todos parâmetros</i>			
Acurácia Global	80.727%	95% intervalo de confiança	
Kappa global:	0.739%	Variância do Kappa global: 0.001%	
Classe	Acurácia do produtor	Acurácia do usuário	Kappa
Mangue	79.000%	85.870%	0.778
Não-mangue	100.000%	72.816%	0.6262
Água	60.000%	93.750%	0.9236
Urbano	64.000%	100.000%	1.000
Solo exposto	88.000%	68.750%	0.6563
<i>Índices de vegetação</i>			
Acurácia Global	80.364%	95% intervalo de confiança	
Kappa global:	0.734%	Variância do Kappa global: 0.001%	
Classe	Acurácia do produtor	Acurácia do usuário	Kappa
Mangue	79.000%	84.946%	0.7634
Não-mangue	100.000%	72.816%	0.6262
Água	60.000%	93.750%	0.9236
Urbano	60.000%	100.000%	1.000
Solo exposto	88.000%	68.750%	0.6563
<i>Razões de polarização</i>			
Acurácia Global	74.545%	95% intervalo de confiança	
Kappa global:	0.657%	Variância do Kappa global: 0.001%	
Classe	Acurácia do produtor	Acurácia do usuário	Kappa
Mangue	74.000%	91.358%	0.8642
Não-mangue	100.000%	64.655%	0.5140
Água	54.000%	96.429%	0.9563
Urbano	48.000%	100.000%	1.000
Solo exposto	68.000%	44.737%	0.3921
<i>Polarizações</i>			
Acurácia Global	69.455%	95% intervalo de confiança	
Kappa global:	0.599%	Variância do Kappa global: 0.001%	
Classe	Acurácia do produtor	Acurácia do usuário	Kappa
Mangue	69.000%	84.146%	0.7509
Não-mangue	88.000%	80.488%	0.7317
Água	54.000%	77.143%	0.7206
Urbano	48.000%	100.000%	1.000
Solo exposto	68.000%	26.563%	0.1922

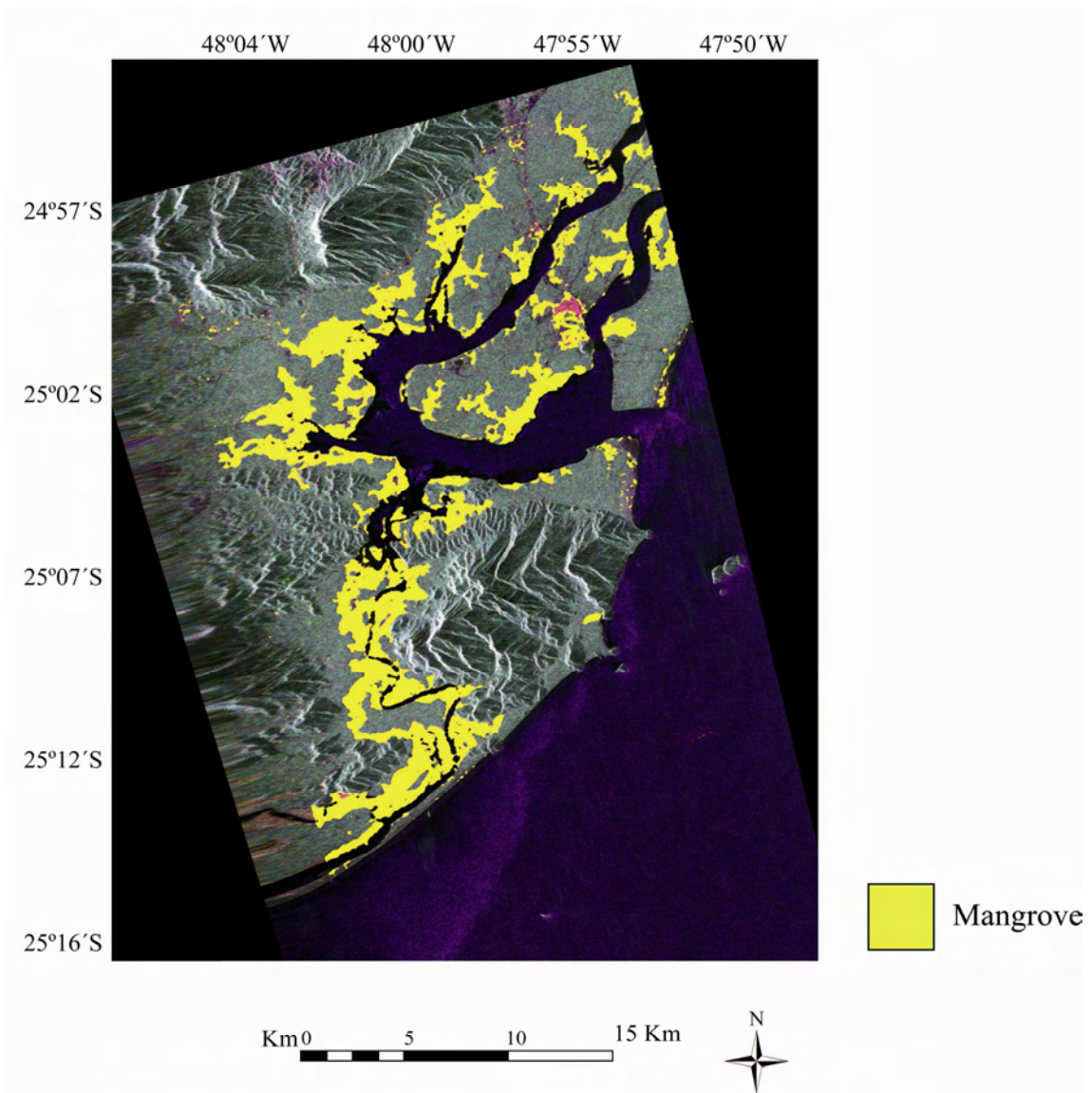


Figura 4. 10 - Classificação contextual baseada na frequência utilizando todos os parâmetros incoerentes como entrada. Destaque para o manguezal em amarelo.

Tabela 4.4 - Matriz de confusão para as classes das quatro classificações contextuais baseadas na frequência.

Classificado	Referência					Total
	Mangue	Não-mangue	Água	Urbano	Solo exposto	
<i>Todos parâmetros</i>						
Mangue	79	0	3	9	1	92
Não-Mangue	11	75	17	0	0	103
Água	0	0	30	0	2	32
Urbano	0	0	0	16	0	16
Solo exposto	10	0	0	0	22	32
Total	100	75	50	25	25	275
<i>Índices de vegetação</i>						
Mangue	79	0	3	10	1	93
Não-Mangue	11	75	17	0	0	103
Água	0	0	30	0	2	32
Urbano	0	0	0	15	0	15
Solo exposto	10	0	0	0	22	32
Total	100	75	50	25	25	275
<i>Razões de polarização</i>						
Mangue	74	0	1	2	4	81
Não-Mangue	19	75	19	0	3	116
Água	0	0	27	0	1	28
Urbano	0	0	0	12	0	12
Solo exposto	7	0	3	11	17	38
Total	100	75	50	25	25	275
<i>Polarizações</i>						
Mangue	69	0	0	13	0	82
Não-Mangue	15	66	0	0	1	82
Água	1	0	27	0	7	35
Urbano	0	0	0	12	0	12
Solo exposto	15	9	23	0	17	64
Total	100	75	50	25	25	275

Este classificador apresentou bons resultados como mostrado por Pereira et al. (2011) no estudo da região de manguezal de Cananéia. Os autores testaram as três polarizações mais o parâmetro Pt obtidos de uma imagem ALOS/PALSAR. O resultado com melhor desempenho foi para a classificação utilizando a combinação da polarização HH e Pt , com acurácia global de 87,0 e $kappa$ de 0,8% . Das três classes, água, não-mangue e urbano ocorreu maior confusão da classe *mangue* com a classe *urbano*. Lim et al. (2008) utilizaram uma imagem PALSAR para classificar a cobertura do solo ao norte da península da Malásia. Utilizando o algoritmo *contex* e considerando as classes temáticas água, vegetação, urbano e outras feições, obtiveram exatidão global de 69,5% e $kappa$ de 0,667 como resultado da classificação. Em Mustapha et al. (2010) o classificador *contex* foi testado utilizando uma imagem de alta resolução do satélite SPOT-5 na região de Mecca na Arábia Saudita. Foram obtidas as classes: urbano, montanha, solo exposto, estrada, sombra e construção. O melhor resultado foi obtido com a janela 17 x 17 *pixels*, com acurácia global de 81,3% e $kappa$ de 0,734. Gong e Howarth (1992) utilizaram este mesmo tipo de classificador em imagens ópticas do satélite SPOT-HRV para a análise do uso do solo na área metropolitana de Toronto, Canadá. Segundo os autores, o classificador desenvolvido por eles possui eficiência principalmente em termos computacionais e superou a classificação utilizando o método de máxima verossimilhança.

Este classificador foi testado na presente pesquisa objetivando destacar o manguezal de outros tipos florestais, como a restinga e a floresta ombrófila. Assim, a partir dos valores obtidos pelo índice *Kappa* e a análise da cobertura de mangue classificada, pode-se concluir que o classificador teve bom desempenho e destacou bem o ecossistema manguezal. Os índices de vegetação e todos os parâmetros obtiveram bons resultados em comparação com as polarizações e com as razões simples. Segundo Richards et al. (1987), o uso da banda L para mapear florestas alagadas é eficaz e a contribuição da interação solo- tronco é maior em relação ao espalhamento volumétrico do dossel. Segundo Townsend (2002) áreas inundadas como as florestas alagadas exibem forte retroespalhamento em relação às áreas não alagadas em função do aumento de espalhamento *double bounce*.

4.4 Análise dos parâmetros incoerentes

Com o intuito de avaliar a sensibilidade dos dados SAR decorrente da variação estrutural dos bosques de mangue, foram feitas análises exploratórias dos parâmetros incoerentes, a fim averiguar as tendências, relações e padrões que os dados SAR apresentam em relação aos diferentes bosques de mangue.

Foi utilizado o valor médio do conjunto de *pixels* referentes aos polígonos representativos da área de influência de cada bosque de mangue para construção da resposta do retroespalhamento de cada parâmetro SAR (Tabela 4.5). As diferenças estruturais relacionadas com tipos fisiográficos como os estágios de bosque maduro ou em progradação da floresta e tipos bacia ou franja podem influenciar a resposta do retroespalhamento SAR. Desta forma, procurou-se destacar os parâmetros com maior potencial para distinguir os tipos fisiográficos de bosques de mangue.

A Tabela 4.6 mostra os valores referentes aos coeficientes de correlação R (Pearson) entre os parâmetros incoerentes, obtido a partir dos valores de retroespalhamento dos 16 bosques de mangue, destacando em **negrito** os parâmetros que apresentaram correlação significativa (95% confiança).

Tabela 4.5 - Valores do retroespalhamento- σ° (dB) para os 10 parâmetros incoerentes referentes aos polígonos dos 16 bosques de mangue.

Bosque	Área (m ²)	N <i>pixel</i>	HH	HV	VV	Pt	BMI	CSI	VSI	VV/HH	HV/HH	HV/VV
1- Bosque franja Baguaçu 1	1.257,1	6	-3,16	-13,10	-8,36	-1,38	-5,02	-6,17	-8,57	-4,86	-9,70	-4,18
2- Bosque franja Baguaçu 2	2.423,0	12	-5,22	-12,59	-7,09	-2,17	-6,05	-3,77	-7,18	-0,74	-6,38	-4,88
3-Bosque franja Nobrega 1	6.372,4	41	-2,45	-11,72	-3,37	0,66	-2,89	-3,51	-8,76	0,00	-8,08	-6,80
4-Bosque franja Nobrega 2	18.101,1	112	-2,21	-9,95	-3,20	1,08	-2,68	-3,56	-7,69	-0,16	-6,87	-5,51
5-Bosque bacia Nobrega 3	60.703,6	381	-0,57	-8,73	-3,05	2,15	-1,64	-4,23	-7,53	-1,69	-7,11	-4,85
6-Bosque franja Sitio Grande 1	763,7	4	-1,91	-13,16	-6,21	-0,09	-3,55	-5,66	-10,07	-4,23	-11,15	-7,02
7-Bosque franja Sitio Grande 2	2.338,8	14	-3,28	-11,76	-6,35	-0,79	-4,55	-5,04	-7,80	-3,04	-8,09	-4,58
8-Bosque franja Cardoso 1	4.510,6	30	-2,54	-9,82	-5,18	0,29	-3,66	-4,40	-6,79	-2,23	-6,32	-3,94
9-Bosque franja Cardoso 2	2.705,1	16	-0,99	-7,71	-2,42	2,32	-1,65	-3,61	-7,05	-0,70	-6,02	-4,90
10-Bosque bacia Cardoso 3	4.000,5	23	-0,09	-7,91	-3,37	2,47	-1,42	-4,66	-7,38	-2,29	-7,27	-3,76
11-Bosque bacia Cardoso 4	3.074,5	18	-0,11	-7,90	-2,48	2,71	-1,13	-4,11	-7,48	-1,60	-7,05	-5,11
12-Bosque franja Prainha 1	4.125,4	24	-3,37	-9,95	-4,01	0,25	-3,68	-3,38	-7,06	-0,13	-5,98	-5,46
13-Bosque franja Prainha 2	3.500,7	22	-2,66	-9,01	-4,38	0,64	-3,43	-3,95	-6,68	-1,42	-6,15	-4,14
14- Bosque Bacia Batatal	6.873,9	41	-0,84	-8,91	-3,12	1,96	-1,83	-4,28	-7,56	-1,36	-7,32	-4,50
15- Bosque <i>main map</i>	4.166,3	25	-0,56	-11,38	-4,74	1,34	-2,16	-5,40	-9,45	-3,74	-10,24	-6,29
16-Bosque franja adj <i>main gap</i>	12.731,7	83	-3,35	-11,96	-4,84	-0,37	-4,03	-3,76	-8,32	-0,98	-8,01	-6,31

Tabela 4.6 - Matriz de correlação (Pearson) entre os parâmetros incoerentes (95% confiança), obtida a partir dos valores de retroespalhamento dos 16 bosques de mangue. Destaque em negrito para os parâmetros que apresentam correlação significativa.

	HH	HV	VV	Pt	BMI	CSI	VSI	VV/HH	HV/HH	HV/VV
HH		0,66	0,68	0,93	0,95	-0,14	-0,10	0,22	-0,12	0,05
HV	0,66		0,83	0,85	0,79	0,45	0,66	-0,35	0,65	0,48
VV	0,68	0,83		0,89	0,87	0,62	0,32	-0,54	0,47	-0,05
Pt	0,93	0,85	0,89		0,99	0,23	0,18	-0,14	0,22	0,09
BMI	0,95	0,79	0,87	0,99		0,17	0,06	-0,08	0,11	0,00
CSI	-0,14	0,45	0,62	0,23	0,17		0,59	-0,95	0,80	-0,07
VSI	-0,10	0,66	0,32	0,18	0,06	0,59		-0,52	0,95	0,74
VV/HH	-0,30	0,20	0,45	0,03	-0,01	0,91	0,44		0,65	-0,18
HV/HH	-0,12	0,65	0,47	0,22	0,11	0,80	0,95	-0,73		0,52
HV/VV	0,05	0,48	-0,05	0,09	0,00	-0,07	0,74	0,16	0,52	

A partir dos valores de retroespalhamento dos parâmetros incoerentes, foram calculadas as médias e desvio padrão (Tabela 4.7) dos tipos fisiográficos de bosques de mangue, buscando diferenciar os tipos de franja em progradação, franja com bosque maduro e bacia. A Figura 4.11 mostra o diagrama (*Box Whisker*) de média e desvio padrão dos valores de retroespalhamento dos parâmetros incoerentes referentes aos tipos de bosques de mangue. Observa-se que é possível distinguir os diferentes tipos fisiográficos de bosques de mangue a partir de alguns parâmetros incoerentes. Os parâmetros Pt, BMI e HH possibilitaram separar o tipo bosque de bacia do tipo franja em progradação e com bosque maduro. A polarização HV apresentou potencial para separar os três tipos de bosques considerando os bosques de franja em progradação com valores menores, seguido dos bosques maduros e os de bacia com os maiores valores de retroespalhamento. A polarização VV apresentou maiores valores para o tipo bacia. O índice VSI e a razão de polarização HV/HH possibilitaram diferenciar o bosque de franja em progradação dos outros tipos.

A aplicação do teste o *Kruskal-Wallis* (95% confiança) e posteriormente, o teste de Comparação Múltipla, verificaram estatisticamente (Apêndice B, Tabelas B1 e B2) a ocorrência da distinção dos tipos fisiográficos de bosques de mangue como franja em progradação, franja com bosque maduro e tipo bacia. Para a polarização HH e BMI, os bosques de bacia se distinguem dos bosques de franja maduro. Para a polarização HV, os bosques de bacia se distinguem do bosque de franja em progradação. Para o VSI e HV/HH, os bosques de franja desenvolvidos se distinguem dos bosques de franja em progradação. Os parâmetros HV/VV, VV/HH, CSI, Pt e VV não possibilitaram distinção estatisticamente significativa entre bosques. Mougín et al. (1993) utilizando imagens SAR banda C, cuja interação ocorre principalmente com as folhas e pequenos galhos, discriminaram diferentes estágios de desenvolvimento estrutural de bosques de mangue com a polarização HV. Porém com a VV não foi possível discriminar bosques maduros de bosques degradados.

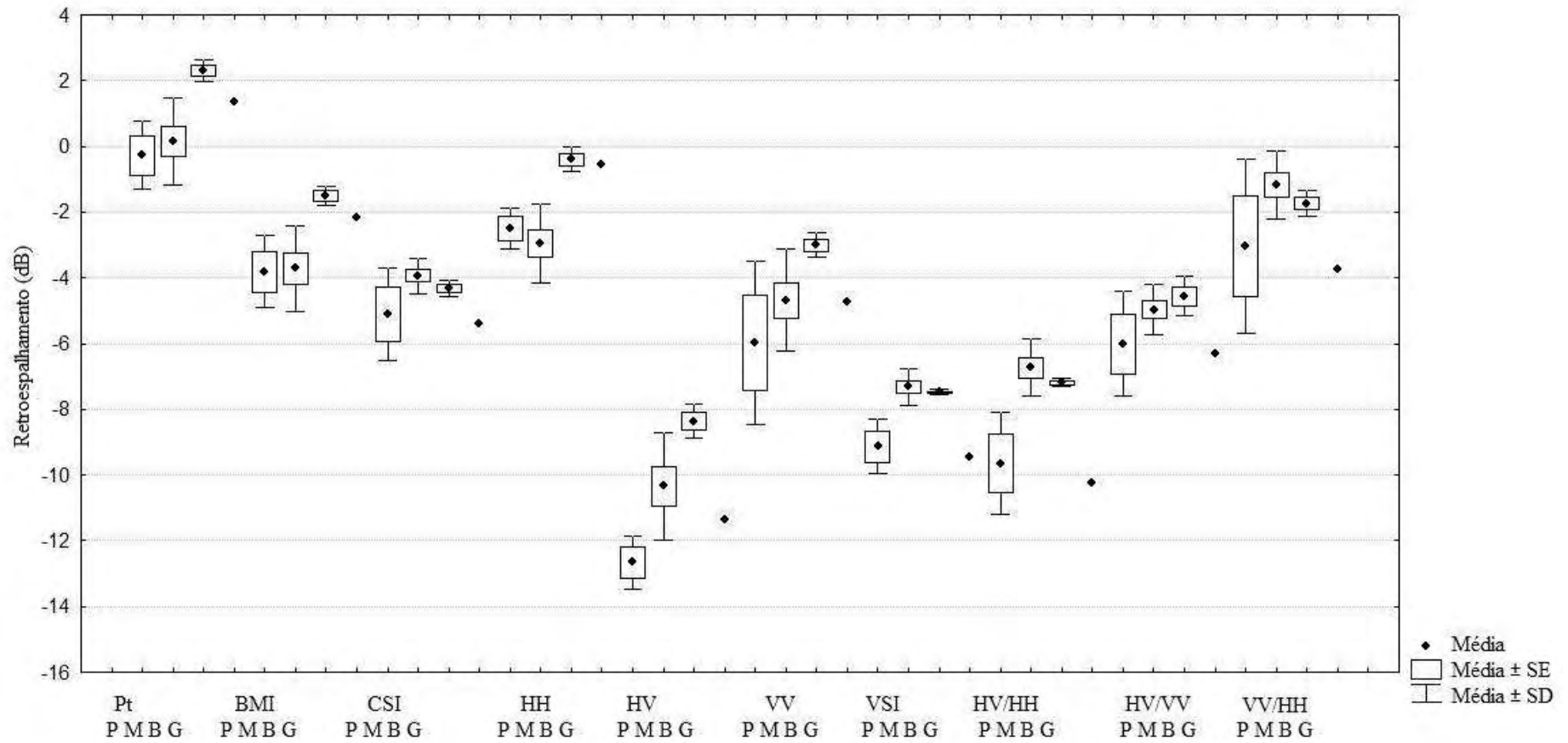


Figura 4. 11 - Média, desvio padrão (SD) e erro padrão (SE) para os valores de retroespalhamento dos parâmetros incoerentes referentes aos tipos de bosque de mangue plotados sequencialmente, onde: progradação (P), maduro (M), bacia (B) e gap (G).

Tabela 4. 7 - Valores de retroespalhamento (dB) de cada parâmetro incoerente referentes as médias, mínimo, máximo e desvio padrão para os tipos de bosque de mangue franja em progradação (FP), maduro (FM) bacia (B) e clareira (C).

Parâmetro incoerente	Tipo fisiográfico	Média	Mínimo	Máximo	Dev.pad
Pt	FP	-0,2705	-1,3837	0,6584	1,033435
	FM	0,1561	-2,1726	2,3217	1,330509
	B	2,3194	1,9561	2,7061	0,332671
	C	1,3372	1,3372	1,3372	
BMI	FP	-3,8187	-5,0226	-2,8860	1,093785
	FM	-3,7174	-6,0526	-1,6499	1,292334
	B	-1,5061	-1,8310	-1,1335	0,298786
	C	-2,1648	-2,1648	-2,1648	
CSI	FP	-5,1117	-6,1731	-3,5069	1,413758
	FM	-3,9342	-5,0439	-3,3804	0,542908
	B	-4,3209	-4,6596	-4,1104	0,236783
	C	-5,4014	-5,4014	-5,4014	
HH	FP	-2,5074	-3,1584	-1,9106	0,625654
	FM	-2,9529	-5,2152	-0,9926	1,208005
	B	-0,4005	-0,8401	-0,0876	0,367913
	C	-0,5603	-0,5603	-0,5603	
HV	FP	-12,6578	-13,1575	-11,7172	0,815065
	FM	-10,3444	-12,5946	-7,7094	1,646628
	B	-8,3634	-8,9114	-7,9027	0,533379
	C	-11,3770	-11,3770	-11,3770	
VV	FP	-5,9771	-8,3583	-3,3669	2,503606
	FM	-4,6844	-7,0910	-2,4248	1,544203
	B	-3,0046	-3,3657	-2,4822	0,373431
	C	-4,7372	-4,7372	-4,7372	
VSI	FP	-9,1344	-10,0738	-8,5698	0,819117
	FM	-7,3211	-8,3184	-6,6793	0,562273
	B	-7,4868	-7,5598	-7,3774	0,080342
	C	-9,4513	-9,4513	-9,4513	
HV/HH	FP	-9,6427	-11,1503	-8,0767	1,537657
	FM	-6,7286	-8,0880	-5,9839	0,861269
	B	-7,1876	-7,3238	-7,0518	0,128022
	C	-10,2357	-10,2357	-10,2357	
HV/VV	FP	-5,9992	-7,0186	-4,1794	1,579774
	FM	-4,9646	-6,3138	-3,9351	0,781258
	B	-4,5540	-5,1148	-3,7553	0,589551
	C	-6,2916	-6,2916	-6,2916	
VV/HH	FP	-3,0289	-4,8568	0,0013	2,642838
	FM	-1,1750	-3,0419	-0,1291	1,015985
	B	-1,7348	-2,2887	-1,3566	0,395643
	C	-3,7362	-3,7362	-3,7362	

A Figura 4.12 mostra o gráfico de dispersão do retroespalhamento dos 16 bosques de mangue comparando os parâmetros incoerentes e os tipos de bosques - franja em progradação, franja com bosques maduros e bacia, bem como, o bosque de clareira (*main gap*). Em ordem crescente de valores de retroespalhamento obteve-se a seguinte sequência: polarização HV, razão de polarização cruzada HV/HH, VSI, HV/VV, VV, BMI, HH, VV/HH e PT. A Tabela 4.8 resume o comportamento dos tipos fisiográficos de bosques de mangue para todos os parâmetros incoerentes. Observa-se que o tipo fisiográfico bacia é o que apresentou maiores valores de retroespalhamento e possibilitou a distinção entre os outros tipos fisiográficos para a maioria dos parâmetros. O tipo franja em progradação apresentou os menores valores de retroespalhamento para a maioria dos parâmetros incoerentes.

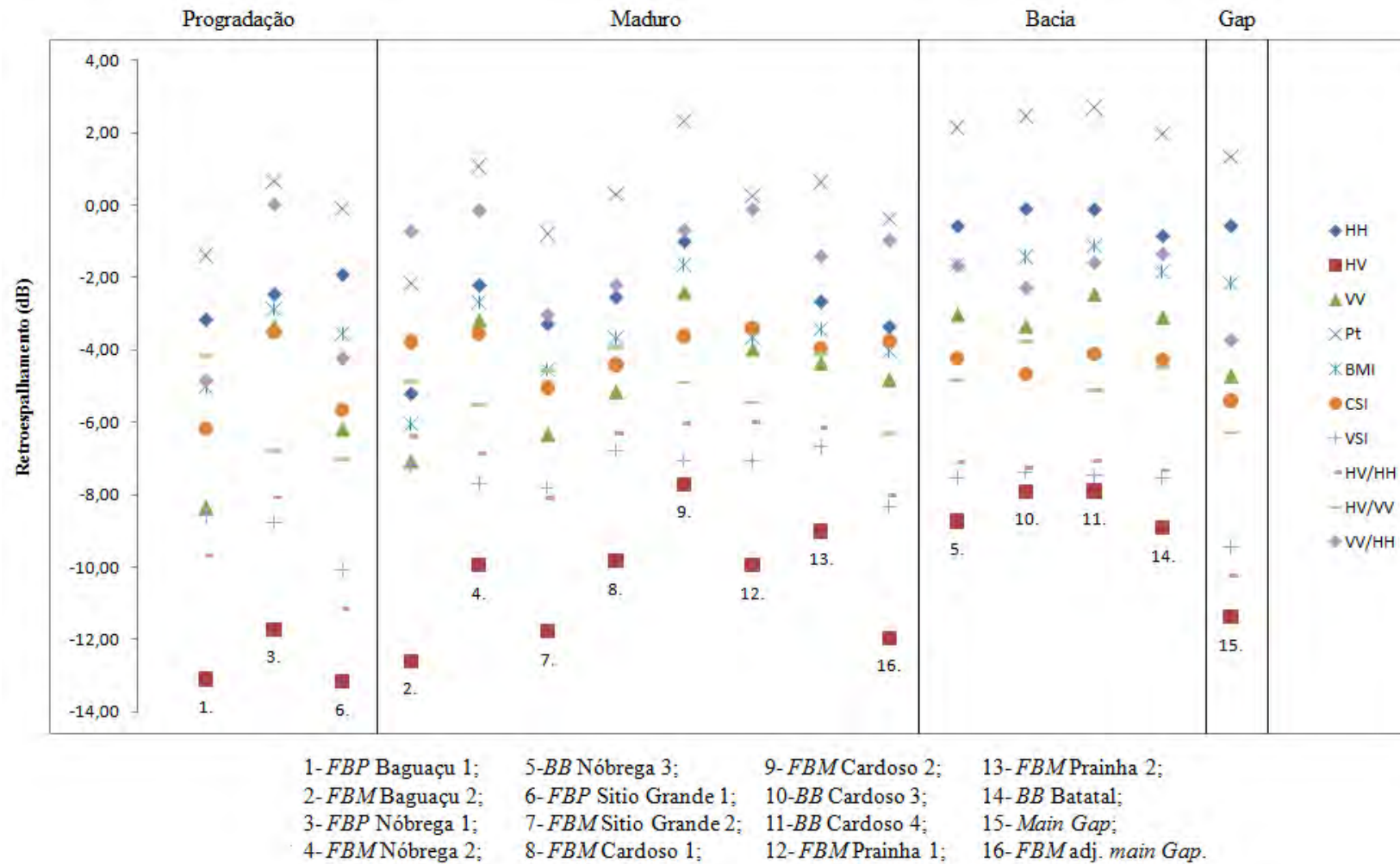


Figura 4. 12 - Gráfico de dispersão do retroespalhamento dos 16 bosques de mangue comparando os 10 parâmetros incoerentes. Franja em progradação (FBP), franja com bosques maduros (FBM), Bosque de bacia (BB).

Tabela 4.8 – Comportamento dos parâmetros incoerentes quanto aos tipos fisiográficos de bosque de mangue: Franja em progradação, franja com bosques maduros, bacia e clareira.

Parâmetro incoerente	Característica do parâmetro incoerente (HENDERSON; LEWIS, 1998; POPE et al. 1994)	Tipo fisiográfico de bosque de mangue com $> \sigma^\circ$	Tipo fisiográfico de bosque de mangue com $< \sigma^\circ$	Tipos fisiográficos de bosque de mangue distinguível
HH	É o parâmetro que mede a quantidade efetiva de energia que retorna para o sensor para a polarização HH	Bacia	Franja em progradação Franja bosque maduro	Bacia
HV	É o parâmetro que mede a quantidade efetiva de energia que retorna para o sensor para a polarização HV	Bacia	Franja em progradação	Bacia Franja com bosque maduro Franja em progradação
VV	É o parâmetro que mede a quantidade efetiva de energia que retorna para o sensor para a polarização VV	Bacia	Franja em progradação	-
Pt	É a somatória de toda a energia que retorna para o sensor, referente ao espalhamento de todos os elementos presentes	Bacia	Franja em progradação Franja bosque maduro	Bacia
BMI	Este parâmetro é um indicador do relativo valor da biomassa da madeira comparado com a das folhas	Bacia	Franja em progradação Franja bosque maduro	Bacia
CSI	Parâmetro de relativa importância da estrutura vegetal vertical <i>versus</i> a horizontal	Franja com bosque maduro	Clareira Franja em progradação	-
VSI	Parâmetro que mede a despolarização do sinal linearmente polarizado	Franja com bosque maduro Bacia	Franja em progradação Clareira	Franja em progradação
VV/HH	Parâmetro que se relaciona com a orientação e forma dos elementos espalhadores, como os galhos, desta forma realça as diferenças entre os mecanismos de espalhamento sensíveis das polarizações HH e VV	Franja com bosque maduro	Clareira Franja em progradação	-
HV/HH	Parâmetro que está relacionado com o espalhamento volumétrico dos elementos do dossel, em relação ao espalhamento superficial e <i>double bounce</i>	Franja com bosque maduro Bacia	Franja em progradação Clareira	Franja em progradação
HV/VV	Idem ao anterior	Bacia	Franja em progradação	-

A seguir serão descritas algumas características apresentadas no retroespalhamento dos parâmetros incoerentes influenciados pelos diferentes tipos de bosques de mangue.

Polarização horizontal (HH): Ocorreu variação de -5,22 dB a -0,09 dB para o bosque maduro Baguaçu 2 e bosque de bacia Cardoso 3, respectivamente. Em Mitchell (2003) a relação entre o retroespalhamento e a altura e densidade das árvores foi investigada para avaliar o efeito significativo dos bosques com grande desenvolvimento estrutural e baixa densidade e bosques com menor desenvolvimento estrutural e maior densidade na resposta do SAR. Ocorreu alto retorno do radar para bosques com baixa densidade, bosques maduros, principalmente para a co-polarização, sugerindo uma forte interação com a superfície do solo, sendo que a densidade é baixa o suficiente para a onda penetrar no dossel. O retroespalhamento da polarização HH no presente estudo não apresentou este comportamento, sendo que os bosques maduros e em progradação não apresentaram padrão definido. Alguns bosques maduros com dosséis mais abertos apresentaram maiores valores de retroespalhamento, como o Cardoso 2. No geral, os maiores valores de retroespalhamento ocorreram para os bosques de bacia. Considerando as três polarizações HH, HV e VV, o bosque maduro que apresentou maior retroespalhamento foi o Cardoso 2 e que teve menor valor foi o bosque Baguaçu 2. Esta diferença entre os respectivos retroespalhamentos pode ser justificada com base nas características dos bosques. O bosque Cardoso 2 apresenta muitos rizóforos expostos, troncos inclinados, presença de grandes bromélias nos troncos das árvores e muitos troncos caídos no solo, com algumas áreas mais abertas do dossel. Esta caracterização do bosque proporciona maior penetração e interação da onda incidente com os componentes do dossel e sob este, possibilitando maior retorno para o radar. Segundo Richards et al. (1987), o retroespalhamento proveniente da floresta é dominado pelos componentes que sofrem reflexão do solo da floresta. Estes autores afirmam também, que na polarização HH ocorre o domínio do mecanismo *double bounce* devido à interação tronco-solo. A magnitude do coeficiente de retroespalhamento varia com a natureza do sistema de raízes expostas, como por exemplo, os rizóforos da *R.mangle* e os pneumatóforos da *A. schaeuriana* e *L. racemosa* (LUCAS et al. 2007). Os bosques maduros apresentam maiores valores de DAP e altura do dossel e menores valores de densidade. Para as polarizações HH e VV, os bosques de franja em progradação apresentaram valores semelhantes ao tipo franja com bosque maduro. Em Proisy et al.

(2002), os valores de retroespalhamento para a polarização HH aumentam com a biomassa do bosque, ou seja, menores em bosques pioneiros e maiores em maduros. O bosque *main gap* apresentou alto valor de retroespalhamento para a polarização HH. O bosque *main gap* é uma área de grande clareira, que possui muitos indivíduos adultos mortos, rebrotamento de adultos e novos indivíduos se instalando. É dominado por *L. racemosa* e *A. schaueriana* e apresenta alguns indivíduos com menos de 1 m e outros atingindo 5,3 m, com DAP médio de 3,14 cm.

Polarização cruzada (HV): O menor valor de retroespalhamento para a polarização HV foi obtido para o bosque Sitio Grande 1 com -13,16 dB e maior valor para o bosque Cardoso 2 com -7,71 dB. Mougín et al. (1999) observaram maior sensibilidade para a biomassa de bosques de mangue com a polarização HV. Nesta polarização HV, os valores de retroespalhamento foram crescentes dos bosques de franja para os bosques de bacia. Os bosques maduros da franja com maiores valores foram o Cardoso 2 e Prainha 2 com -7,71 dB e -9,01 dB, respectivamente. Estes são bosques que apresentam o sistema de raízes aéreas exposto, dominados pela espécie *R. mangle*, com troncos caídos, ou seja, apresentando muitos espalhadores que proporcionam maior retroespalhamento. Segundo Leckie e Ranson (1998) altos valores de retroespalhamento para a polarização cruzada (HV) podem ocorrer em áreas vegetadas que apresentam espalhamento de pequenos elementos e múltiplos espalhamentos entre as superfícies. Para Proisy et al. (2002), o bosque com grande porção de abertura no dossel apresentou valor de retroespalhamento mais alto do que os bosques com mais biomassa e dosséis fechados tais como Bagaçu 2 e Sítio Grande 2.

Polarização vertical (VV): A polarização VV apresenta maior valor de retroespalhamento para o bosque maduro Cardoso 2 com -2,42 dB e menor valor para o bosque Bagaçu 1 com -8,36 dB. Nas polarizações HH e VV, além do bosque Cardoso 2, o Nóbrega 2 apresentou alto valor de retroespalhamento em relação aos outros bosques maduros, com -2,21 dB na polarização HH e -3,20 dB na VV. Este é um bosque bem desenvolvido dominado por *R. mangle*, possuindo árvores chegando a cerca de 12 m, apresentando rizóforos com 1 a 2,5 m de altura e DAP de 5 a 9 cm.

Potência total (Pt): o parâmetro potência total, que é a somatória do retroespalhamento proveniente das polarizações HH, HV e VV, apresentou comportamento semelhante à polarização HH, indicando a influência desta polarização.

Índice de biomassa (BMI): Observa-se que os bosques de bacia apresentaram maiores valores de retroespalhamento considerando este índice. Os bosques de franja em progradação e maduro apresentaram valores semelhantes, porém relativamente mais baixos que o tipo anterior. Os bosques de bacia possuem muitos troncos e galhos secos, alta densidade de indivíduos com baixos valores para o DAP médio e solo mais arenoso. São bosques com muitos galhos retorcidos e com altura média de 1,5 a 2 m, aproximadamente.

Índice de estrutura do dossel (CSI): Os bosques que apresentaram maiores valores de retroespalhamento para este parâmetro foram os bosques maduros, tais como: Prainha 1, Cardoso 2, bosque adjacente ao *main gap*, Bagaçu 2, Nóbrega 2 e o bosque em progradação Nóbrega 1. Este último é um bosque com algumas características semelhantes aos bosques maduros. Teoricamente os bosques de mangue dominados por troncos e galhos verticais devem ter valores maiores de CSI do que os dominados por galhos com tendência horizontal (POPE et al., 1994).

Índice de espalhamento volumétrico (VSI): Observa-se que os bosques maduros apresentaram maiores valores para este parâmetro, como nos casos do Prainha 2, Cardoso 1, Prainha 1 e Bagaçu 2. Estes são bosques com dosséis mais espessos, com altura da árvore variando entre 7 e 13 m e com galhos de diâmetros maiores, o que causa a despolarização da onda incidente. Pope et al. (1994) indicam que florestas mais desenvolvidas apresentam maiores valores de retroespalhamento para este índice. A despolarização é baixa para alvos com espalhamento superficial, o que provavelmente também é o caso dos bosques de franja em progradação. Estes representam bosques densos, porém com DAP médio ≤ 3 cm e da mesma forma que na clareira, apresentaram os menores valores de VSI.

Razão de polarização paralela (Rp): Os bosques com menores valores para VV/HH foram *main gap* e a maioria dos bosques de franja em progradação. Os maiores valores obtidos foram para os bosques de bacia e de franja com bosques maduros.

Razão de polarização cruzada (Rc): Observa-se que para HV/HH, os bosques de franja em progradação e o *main gap* apresentaram valores menores de retroespalhamento. Este é um indício de que estes são bosques onde predomina o espalhamento superficial e *double bounce*. Quando o espalhamento superficial e o efeito *double bounce* são dominantes, a probabilidade da onda incidente despolarizar é menor (MITCHELL, 2003). Os bosques maduros apresentaram maiores valores de retroespalhamento indicando que os dosséis deste tipo de bosque são fonte de interação e despolarização da onda incidente. Segundo Mougin et al. (1999), a despolarização da onda incidente é geralmente o resultado de múltiplos espalhadores entre os componentes da vegetação. Neste trabalho, com a razão HV/VV ocorreu resultado semelhante, mas com algumas diferenças. Por exemplo, o bosque Baguaçu 1 teve baixo retroespalhamento nas polarizações VV e HV e alta na polarização HH. Em Mitchell (2003) à medida que a biomassa do bosque aumenta, como ocorre para os bosques maduros, os valores do retroespalhamento para HV/HH e HV/VV também aumentam. Isto sugere grande espalhamento volumétrico e interação da onda incidente com o dossel levando a despolarização desta.

A banda L interage com os galhos primários e secundários e com os troncos, incluindo a interação com o solo (LUCAS et al., 2007). O grau de penetração da onda incidente no dossel é um fator que depende da densidade e estrutura dos componentes da vegetação e presença de clareiras, como foi observado no comportamento dos bosques com dosséis mais abertos acima mencionados. A atenuação total inclui perda por absorção e espalhamento. Enquanto o espalhamento volumétrico proveniente do dossel é uma importante fonte de espalhamento na banda L, sua capacidade de penetração no dossel proporcionando múltiplas interações com os componentes de outras camadas da vegetação é também significativa (SIMARD et al., 2002). Em Proisy et al. (2000), o modelo sobre os mecanismos de espalhamento para bosques de mangue indicaram que na banda L o mecanismo *double bounce* é um indicativo da grande interação entre as partes das plantas, principalmente troncos, e a superfície do solo. Segundo os mesmos

autores, o espalhamento volumétrico domina a resposta para os bosques maduros onde o principal espalhador são os galhos.

4.5 Análise da relação entre os parâmetros estruturais e os parâmetros incoerentes

Com base na premissa de que diferenças estruturais de bosques de mangue podem influenciar diretamente o comportamento do sinal do radar (MITCHELL, 2003; MOUGIN et al., 1999; PROISY et al., 2000, 2002), foram correlacionados os parâmetros biofísicos e os parâmetros incoerentes. Segundo Mitchell (2003), uma das formas utilizadas para investigar a relação entre o retroespalhamento SAR e os parâmetros estruturais da floresta é por meio da análise de regressão. Desta forma, os melhores parâmetros SAR que permitem derivar os parâmetros estruturais dos bosques de mangue podem ser identificados analisando as relações entre os dados. Estas relações ajudam no entendimento da interação das microondas com os vários componentes estruturais da floresta úteis para a interpretação de imagens SAR.

Inicialmente, foram feitas análises exploratórias por meio de correlações entre os parâmetros incoerentes e os parâmetros estruturais. A Tabela 4.9 mostra os valores referentes aos coeficientes de correlação R (Pearson) entre os parâmetros incoerentes e os parâmetros estruturais DAP médio, altura do dossel, densidade (em escala logarítmica), área basal e altura média. As Figuras 4.13 a 4.16 mostram os diagramas de dispersão entre os parâmetros incoerentes e parâmetros estruturais que apresentaram valores significativos (95%). O coeficiente de correlação referente à polarização HH e os parâmetros estruturais altura do dossel e altura média apresentaram os maiores valores com $R = -0,80$ e $R = -0,84$, respectivamente. Esta relação negativa do coeficiente de retroespalhamento, altura do dossel e altura média mostra os maiores valores de retroespalhamento para os bosques de bacia que apresentaram menores valores para a altura do dossel, variando de 1,8 a 4,6 m e altura média variando de 1,4 a 2,13 m. Para Proisy et al. (2000), a relação positiva entre a polarização HV e os parâmetros estruturais de bosques, altura e biomassa, apresentaram os maiores valores.

Tabela 4. 9 - Coeficiente de correlação R (Pearson) entre os parâmetros incoerentes e os parâmetros estruturais dos 16 bosques de mangue, com 95% de confiança.

	Altura do dossel	DAP médio	Área basal	Densidade	Altura média
HH	-0,80	-0,67	-0,53	0,50	-0,84
HV	-0,43	-0,14	-0,47	0,07	-0,59
VV	-0,38	-0,15	-0,34	0,07	-0,52
Pt	-0,67	-0,46	-0,50	0,32	-0,77
BMI	-0,70	-0,51	-0,49	0,37	-0,78
CSI	0,33	0,54	0,02	-0,46	0,22
VSI	0,16	0,39	-0,12	-0,33	0,00
VV/HH	0,34	0,50	0,10	-0,40	0,31
HV/HH	0,23	0,47	-0,07	-0,39	0,07
HV/VV	-0,13	-0,01	-0,14	0,04	-0,19

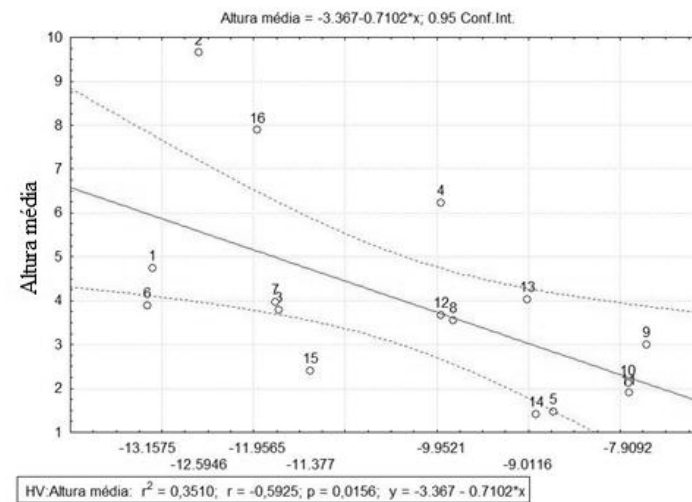
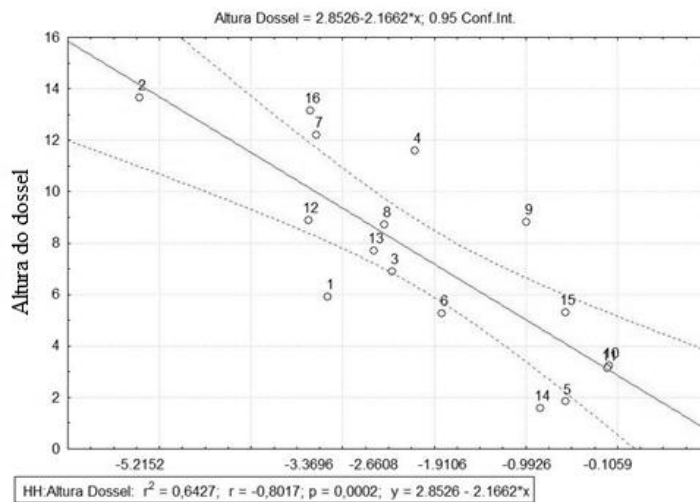
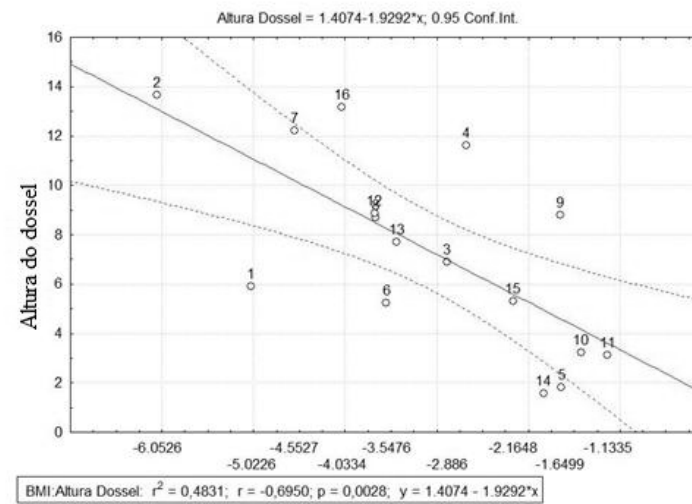
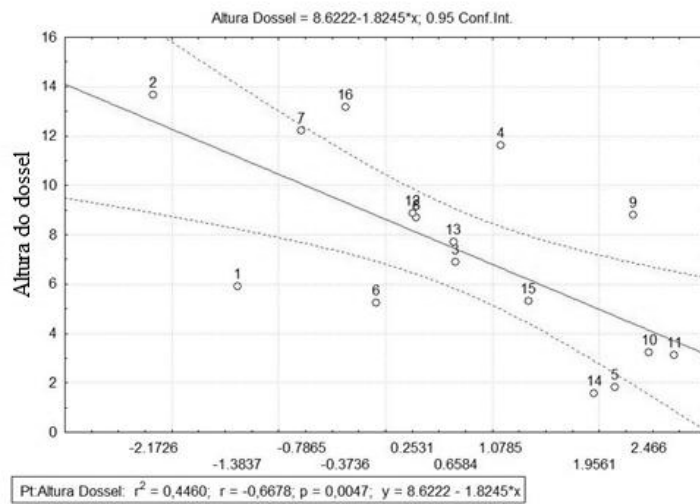


Figura 4. 13 – Diagrama de correlação para os parâmetros altura do dossel vs Pt; BM, HH e altura média vs HV.

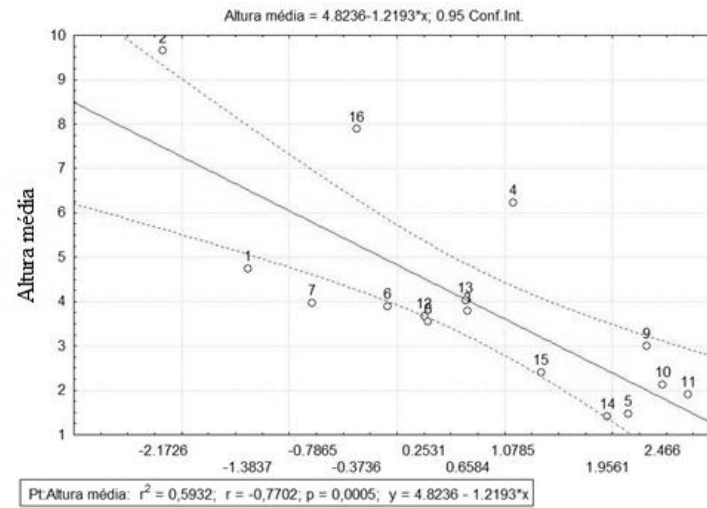
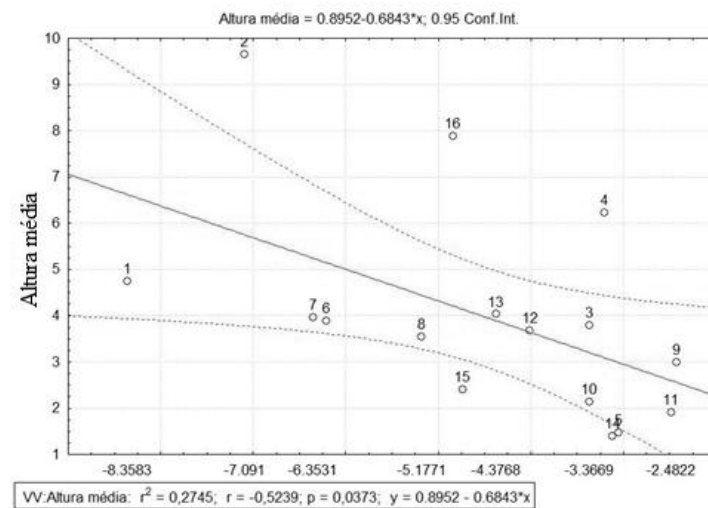
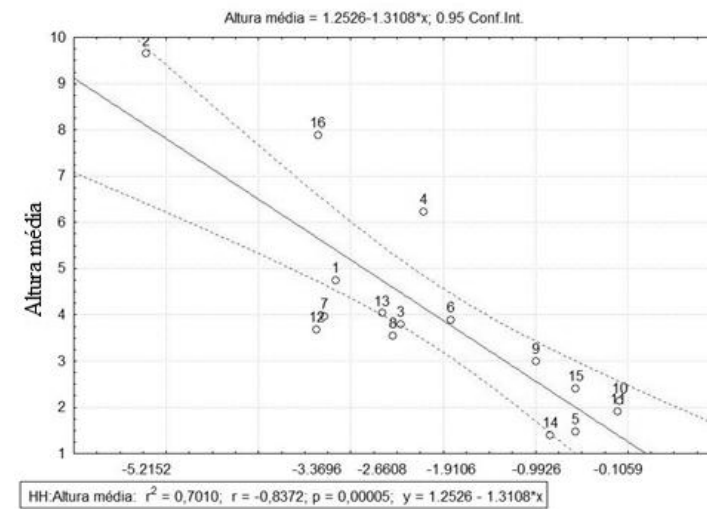
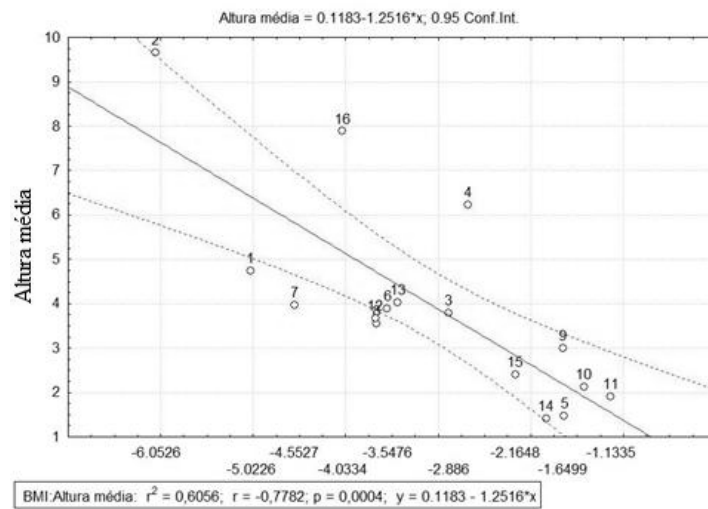


Figura 4. 14 - Diagrama de correlação para o parâmetro altura média vs Pt, BMI, HH, VV.

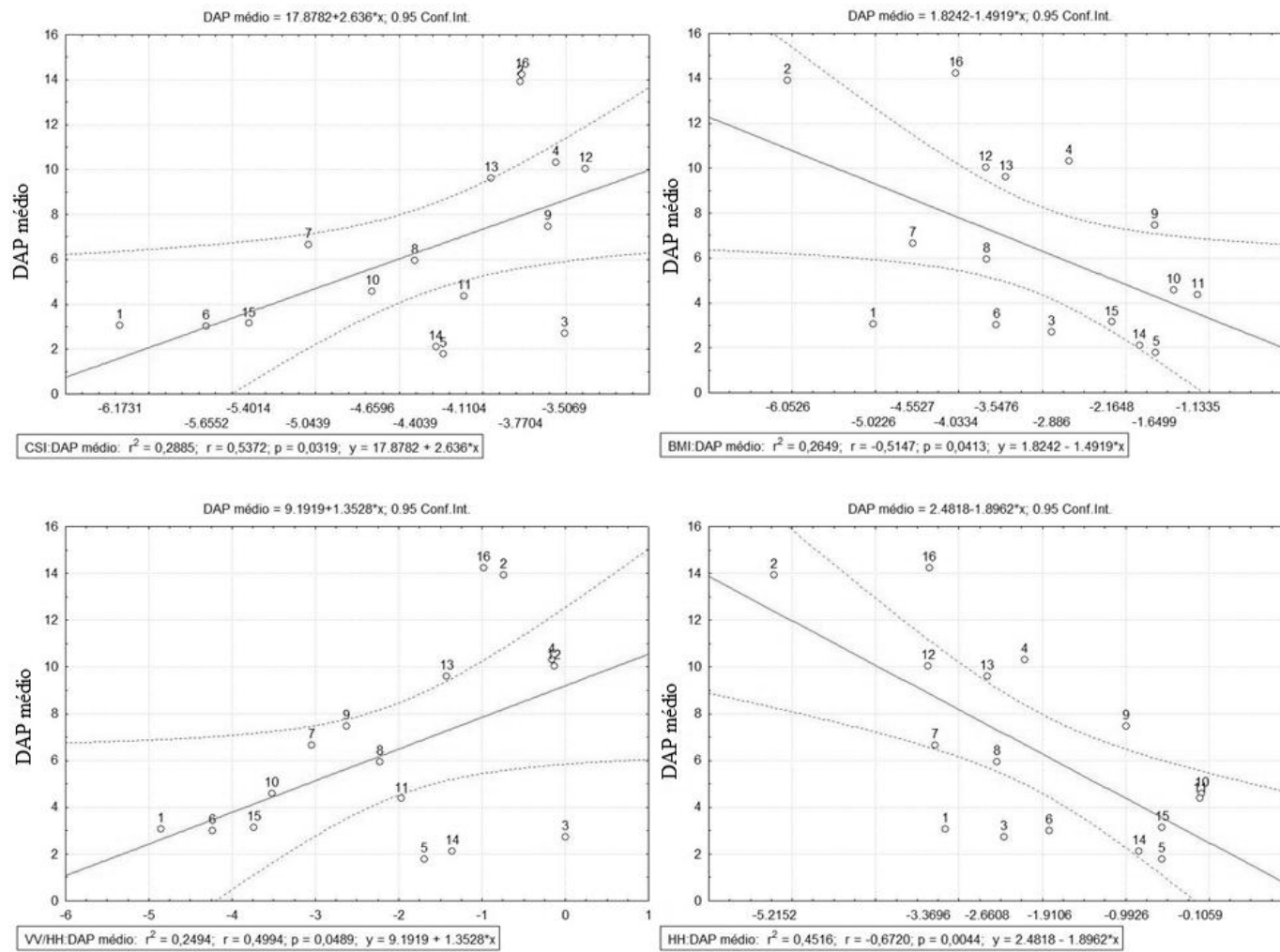


Figura 4. 15 - Diagrama de correlação para o parâmetro DAP médio vs CSI, BMI, VV/HH, HH.

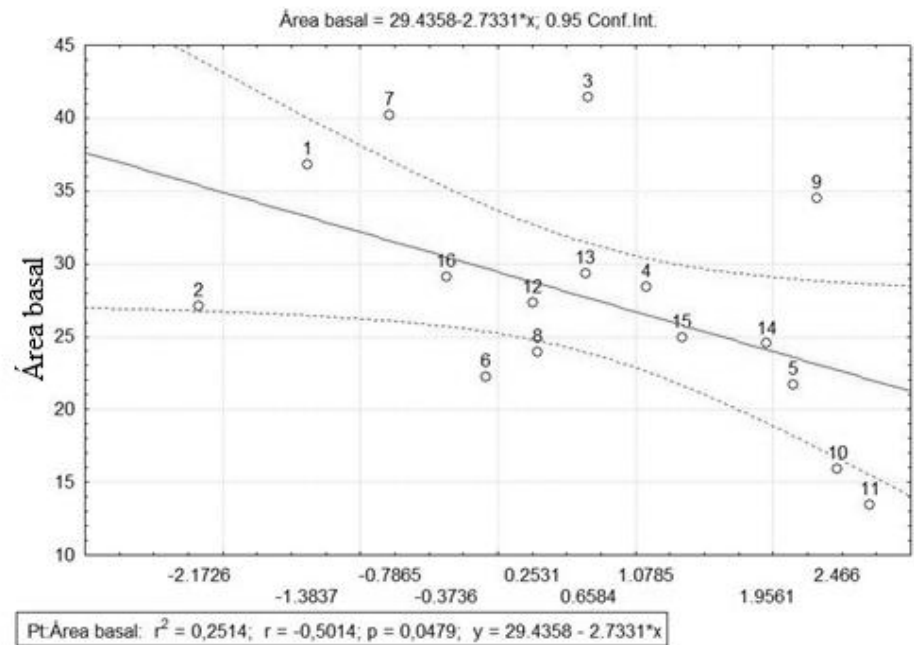
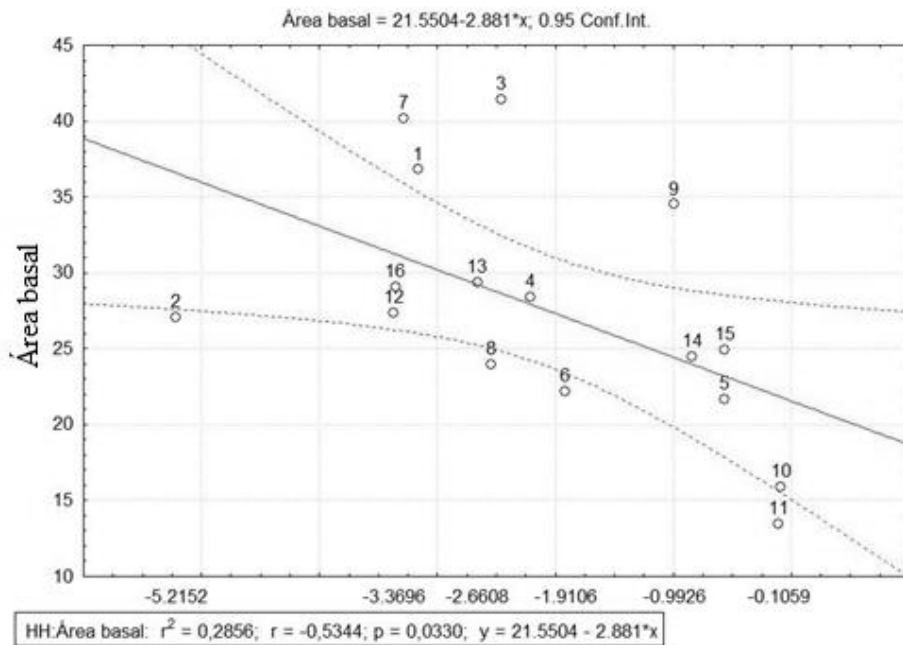


Figura 4. 16 - Diagrama de correlação para o parâmetro Área basal vs Pt, HH.

Para cada parâmetro estrutural foram geradas múltiplas regressões sendo escolhida a função de regressão que apresentou maior valor de R^2 e R^2 ajustado (Tabela 4.10). As melhores funções encontradas para cada parâmetro estrutural são apresentadas na Tabela 4.11. Os gráficos das funções múltiplas são vistos nas Figuras 4.17 a 4.19. Ressalta-se que a significância de cada função de regressão foi avaliada pelo teste F, cujos valores p indicaram que as funções apresentam relações significativas entre a variável dependente e as variáveis independentes. A significância de cada uma das variáveis explicativas da função foi avaliada por meio da análise de variância dos estimadores relacionada ao valor de t e seu respectivo valor p (vide no Apêndice B, Tabelas B3a B7). A identificação de *outliers* em X e em Y foi realizada por meio das análises dos valores dos resíduos excluídos padronizados (*studentized deleted residuals*) e valores de *Leverage* da matriz *Hat* (NETER et al., 1996) (Tabela 4.12). Sua influência foi dada por meio da medida denominada distância *Cook* (NETER et al., 1996) (Tabela 4.12). Para a análise de normalidade dos resíduos da regressão foi utilizado o método *Shapiro Wilk*. Os modelos foram validados utilizando o valor PRESS (NETER et al., 1996).

Tabela 4.10 - Valores de R , R^2 e R^2 ajustado, referentes às funções de regressão para os parâmetros altura do dossel, altura média, DAP médio, área basal e densidade (log).

Parâmetro	R	R ²	R ² ajustado
Altura do dossel	0,828	0,686	0,638
Altura média	0,855	0,731	0,690
DAP médio	0,816	0,666	0,615
Área basal	0,801	0,642	0,610
Densidade	0,735	0,540	0,498

Tabela 4. 11 – Função de regressão linear explicativa para cada parâmetro estrutural: altura do dossel, altura média, DAP médio, área basal e densidade.

Variável dependente	Função de regressão linear
Altura do dossel	$= 10.0787 - 2,1437 * BMI + 2.1489 * CSI$
Altura média	$= 4,07041 - 1,34932 * BMI + 0,97938 * CSI$
DAP médio	$= 14,54714 - 1,80664 * BMI + 3,15292 * CSI$
Área basal	$= 17,35489 - 4,54911 * HH$
Densidade	$= 4,613352 + 0,229529 * HH$

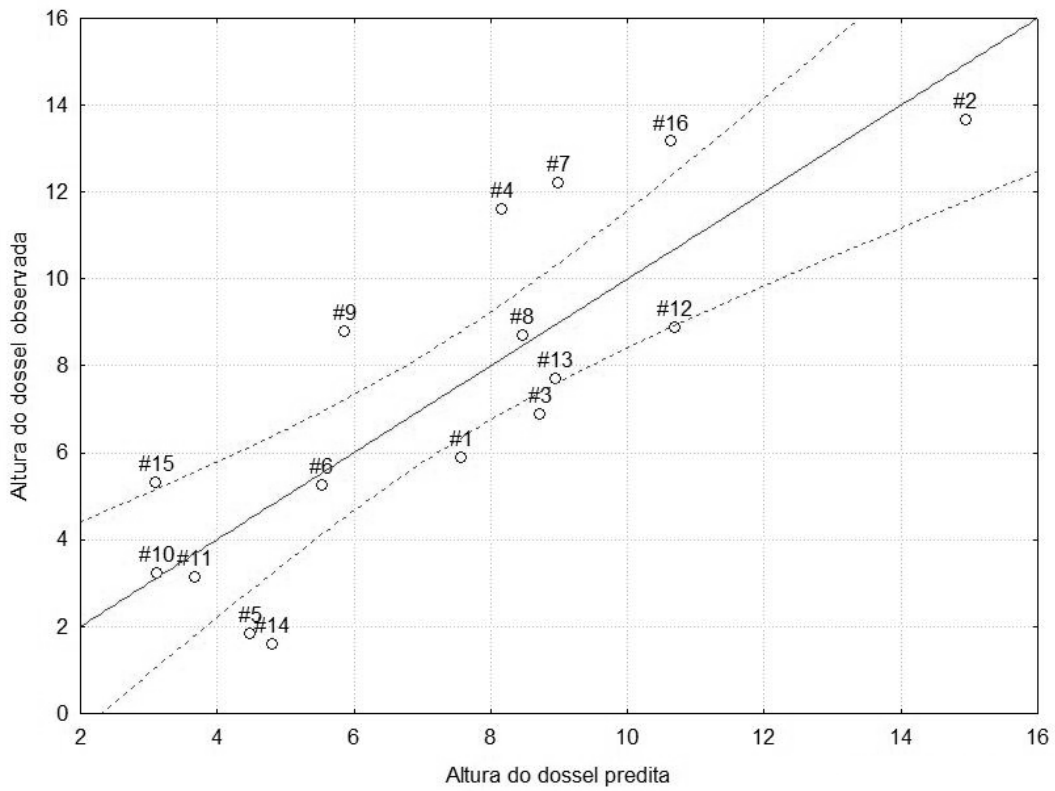


Figura 4. 17 - Gráfico da função de regressão obtido para a altura do dossel com as variáveis explicativas BMI e CSI.

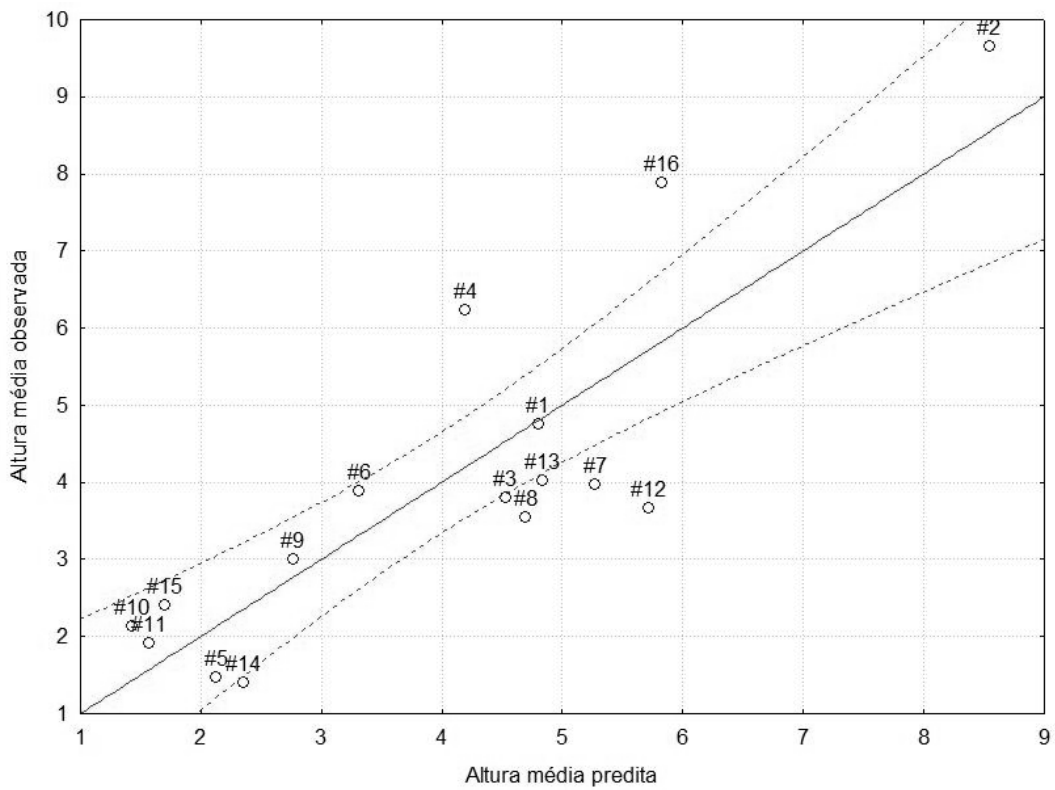


Figura 4. 18 - Gráfico da função de regressão obtido para a altura média com as variáveis explicativas BMI e CSI.

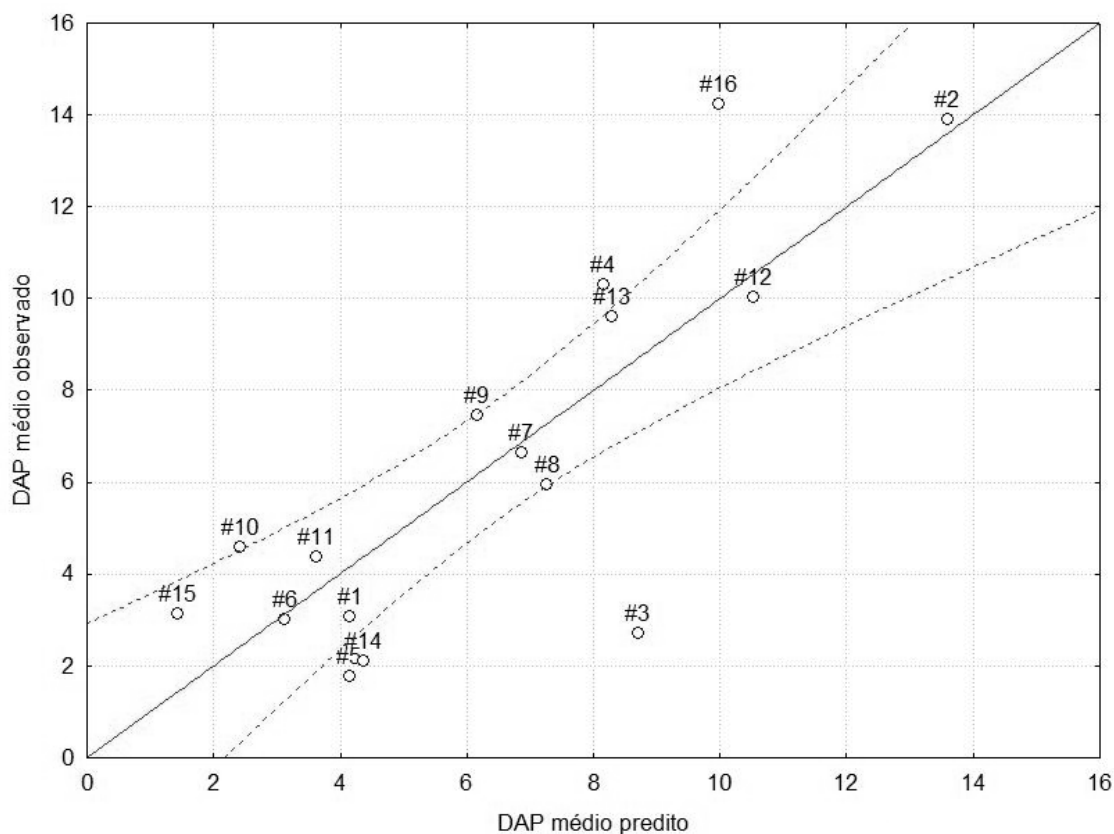


Figura 4. 19 - Gráfico da função de regressão obtido para a DAP médio com as variáveis explicativas BMI e CSI.

Tabela 4. 12 – Outliers em Y e em X e distância Cook detectados nas funções de regressão dos parâmetros estruturais.

	Outlier Y	Outlier X	Distância de Cook
Altura do dossel	-	1 e 2	Não influencia
Altura média	4, 12 e 16	1 e 2	Não influencia
DAP médio	3 e 16	1 e 2	Não influencia
Área basal	2, 3 e 9	2	Influencia
Densidade	1, 3 e 4		Influencia

A partir do teste de normalidade *Shapiro – Wilk* (Tabela 4.13) para os resíduos das funções explicativas dos parâmetros estruturais altura do dossel, altura média, DAP médio, área basal e densidade, foi observada uma distribuição normal dos resíduos.

Tabela 4. 13 – Valores referentes ao teste de normalidade Shapiro - Wilk e seu respectivo valor *p*.

	Altura do dossel	Altura média	DAP médio	Área basal	Densidade
Shapiro-Wilk W	0,9142	0,9628	0,9538	0,955	0,9599
<i>p</i>(normal)	0,1363	0,7128	0,5524	0,6748	0,7523

Para a validação dos modelos foi analisado o valor de PRESS. Os respectivos valores de PRESS e de SSE e suas respectivas porcentagens de diferença são apresentados na Tabela 4.14. Desta forma, observa-se a partir da diferença dos valores de PRESS e SSE para cada modelo apresentado, que estes são considerados válidos segundo Neter et al. (1996).

Tabela 4. 14 – Valores referentes ao PRESS e SSE e porcentagem da diferença entre os valores para a validação dos modelos de regressão para cada parâmetro estrutural.

	Altura média	DAP médio	Altura do dossel	Densidade	Área basal
PRESS	30,60	115,36	107,94	1,79	331,77
SSE	20,84	84,14	72,48	1,35	231,29
%	46,84	37,11	48,92	32,79	43,44

As variáveis explicativas dos modelos de regressão da altura do dossel, altura média e DAP médio foram BMI e CSI. Para os parâmetros área basal e densidade foi utilizada apenas a polarização HH (Tabela 4.11). BMI e CSI são índices de vegetação que estão relacionados com a estrutura florestal. Ambos são formulados pelas polarizações HH e VV. BMI está correlacionado com a biomassa da madeira, troncos e podem ser notados em vegetação que possibilitam a interação *double bounce*. O CSI é um parâmetro de relativa importância da estrutura vegetal vertical *versus* a horizontal. Os índices BMI e CSI não apresentaram correlação significativa entre si ($R= 0,17$) assim foram mais indicados para compor as funções entre os outros resultados. Os parâmetros estruturais altura do dossel, DAP médio e altura média apresentaram correlações significativas entre si (Tabela 4.1 e Figura 4.3), podendo explicar os resultados semelhantes das funções explicativas destes parâmetros.

O índice BMI apresentou uma relação negativa com os parâmetros altura do dossel, altura média e DAP médio, pois apresentou valor negativo de β (parâmetro da função) (vide mais detalhes no Apêndice B Tabelas B3 a B7). Isto indica que os bosques com menor altura do dossel, altura média e DAP médio apresentaram os maiores valores de retroespalhamento para este índice. Os bosques de bacia apresentam os menores valores de altura do dossel entre 1,58 m o para bosque Batatal e 3,23 m para o Cardoso 3. O bosque *main gap* apresenta altura do dossel de 5,30 m. Porém, estes são bosques com dosséis abertos e muitos troncos finos, o que pode ter causado o alto retroespalhamento.

Proisy et al. (2002), indicam que os maiores valores de retroespalhamento para a polarização HH ocorrem para bosques com dosséis mais abertos devido à maior interação com os componentes do solo como os troncos e raízes. O mesmo ocorreu, neste trabalho, para os bosques com dosséis abertos como os bosques Cardoso 3 e 4, *main gap*, Cardoso 2 e Nóbrega 2. Em Pope et al. (1994) os maiores valores de retroespalhamento do BMI ocorrem em florestas alagadas. Segundo o autor, quando esta não se encontra alagada, altos valores de BMI podem indicar presença de alta biomassa de troncos e galhos. Este pode ser o comportamento dos bosques de bacia e alguns bosques de franja com dosséis mais abertos. A altura média dos bosques de bacia apresenta valores entre 1,4 e 2,23 m com pouca variação na altura das árvores dentro do bosque. Porém, estes bosques apresentam muitos galhos retorcidos e sobre o solo, provavelmente possibilitando a interação da polarização HH e alto retorno para o radar do índice BMI. O bosque com maior valor de altura média foi Bagaçu 2 (9,65 m) que apresentou o menor valor de retroespalhamento, seguido do bosque maduro adjacente ao *main gap* (7,88 m). Alguns bosques maduros e em progradação que possuem valores semelhantes de altura média também apresentaram valores parecidos de retroespalhamento como o Bagaçu 1 (4,75 m) Nóbrega 1 (3,79 m), Sitio Grande 2 (3,97 m), Prainha 1 (3,67 m), Cardoso 1 (3,55 m) e Prainha 2 (4,03 m).

O parâmetro CSI mostra uma relação positiva com os parâmetros estruturais das funções, porém menos influente. Florestas dominadas por troncos e galhos verticais tendem a ter valores maiores de CSI, como é o caso dos bosques de franja mais desenvolvidos. Enquanto que para o BMI, ocorre maior retroespalhamento em bosques com troncos sobre o solo e dosséis mais abertos, como dito anteriormente. Para a variável CSI, os bosques maduros, tais como Prainha 1 com DAP médio de 10,03 cm, Nóbrega 2 com 10,31 cm, Prainha 2 com 9,6 cm, Cardoso 2 com 7,45 cm, apresentaram os maiores valores de retroespalhamento. Alguns bosques de bacia e franja em progradação como o Nobrega 1 com 2,71 cm de DAP médio, Nobrega 3 com 1,78 cm e Batatal com 2,11 cm, apresentaram valores elevados de retroespalhamento. Baixos valores de CSI indicam orientação preferencial horizontal dos troncos.

A variável explicativa HH apresentou relação inversa com a área basal dos bosques analisados. O aumento da área basal causou diminuição no retroespalhamento. Os

bosques de bacia e o *main gap* apresentaram os maiores valores de retroespalhamento, visto que estes são bosques com baixos valores de área basal. Segundo Townsend (2002), florestas com alto valor de área basal proporcionam a ocorrência de reflexão diédrica da radiação incidente. Florestas quando estão em solos alagados ou lisos, podem proporcionar alto retroespalhamento do sinal. Porém, alto índice de área basal também pode causar baixa transmissividade dos troncos. Devido ao aumento do dossel em volume de folhas e galhos, como observado nos bosques maduros Bagaçu 2, Nóbrega 2, Cardoso 1 e Prainha 1, pode ocorrer maior difusão da radiação retroespalhada e proporcionar maior atenuação e subsequente diminuição da resposta do retroespalhamento.

A variável explicativa HH também apresentou relação positiva com o parâmetro densidade. Os maiores valores de retroespalhamento ocorreram para os bosques mais densos, como os bosques de bacia e franja em progradação. Estes bosques apesar de densos apresentam estrutura com valores menores para altura e DAP médio, o que pode ter possibilitado a penetração da onda.

Parâmetros estruturais, como a densidade foliar e abertura do dossel, influenciam a extensão que a onda incidente pode penetrar no dossel. Similarmente a densidade e diâmetro dos troncos influenciam a transmissividade por meio dos troncos (TOWNSEND, 2002). Dossel densamente fechado com grande volume de folhas e galhos aumenta a probabilidade de atenuação da radiação. Dosséis abertos que apresentam menor área dos componentes florestais, diminuem a interação da radiação dentro do dossel (MITCHELL, 2003) e proporcionam interação solo-tronco. Este tipo de comportamento pode explicar os maiores valores de retroespalhamento para o tipo bacia.

Os tipos fisiográficos de bosques de mangue franja e bacia são classificações para grupos de árvores que ocupam um espaço influenciado por forças estruturais particulares (SCHAEFFER-NOVELLI et al., 2000). Desta forma, a partir de mais estudos específicos e com diferentes condições de maré, a distinção dos tipos fisiográficos de bosques de mangue por meio de imagens de radar, pode vir a possibilitar o reconhecimento do regime hidrológico dentre outras forçantes externas

que influenciam o desenvolvimento dos bosques de mangue. O retroespalhamento proveniente do manguezal pode apresentar diferenças devido à frequência de inundação, que pode expor a superfície e as raízes do mangue. Em áreas onde a floresta é inundada, pode ocorrer um aumento do sinal retroespalhado, principalmente em bosques com dosséis mais abertos. Isto ocorre devido à interação da radiação incidente com a superfície refletora, isto é, entre o solo inundado e os troncos, ocasionando o espalhamento *double bounce*. No presente estudo, a maré estava cheia no momento do imageamento. Desta forma, o solo e os pneumatóforos das árvores das espécies *L. racemosa* e *A. schaueriana* estavam cobertos pela água. Segundo Imhoff et al. (1986), o solo coberto por água proporciona maior resposta especular da onda incidente do que quando as raízes ficam expostas quando ocorre um declínio da resposta do radar. No presente estudo, as condições de maré cheia juntamente com o ângulo de incidência da imagem PALSAR de aproximadamente 25° mostraram-se favoráveis para o reconhecimento de tipologias estruturais, bem como para o mapeamento de áreas de manguezal.

Pode-se observar com os resultados deste trabalho que os parâmetros incoerentes mais influentes nas funções explicativas dos parâmetros estruturais (Tabela 4.11) foram a polarização horizontal HH e os índices BMI e CSI. Os parâmetros altura do dossel (0,69), altura média (0,73) e DAP médio (0,67) apresentaram os maiores valores de R² utilizando estes dois índices de vegetação. BMI e CSI são formulados com as polarizações paralelas HH e VV indicando que estas se mostraram de grande importância para o estudo de manguezais, com destaque para a polarização HH devido a maior influência nos valores de retroespalhamento. Desta forma, os resultados mostram que a imagem PALSAR apresenta potencial para o estudo de diferentes padrões de desenvolvimento estrutural de bosques de mangue. Mostram, também, potencial para o entendimento do ambiente como um todo, visto que a estrutura dos bosques é o resultado do máximo aproveitamento das energias disponíveis num dado local (SCHAEFFER-NOVELLI et al., 2000). Segundo Henderson e Lewis (2008), informações de SAR desempenham uma importante parte na pesquisa científica que conduz ao melhor entendimento e proteção de ambientes frágeis como as florestas alagadas.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condições de maré alta e ângulo de incidência de aproximadamente $25,7^\circ$, no qual a imagem PALSAR utilizada no presente estudo foi adquirida mostraram-se favoráveis para identificar tipos fisiográficos de bosques de mangue, bem como para mapear áreas de manguezal.

Os resultados indicaram que a polarização HH e os parâmetros incoerentes formulados com esta polarização apresentaram maior potencial para a delimitação de áreas de manguezal. A polarização HH e o índice BMI possibilitaram discriminar bosques de mangue dos tipos fisiográficos franja e bacia. Já a polarização HV apresentou maior potencial para a discriminação dos três tipos fisiográficos de bosques de mangue como bosque de franja em progradação, franja com bosque maduro e bacia. Os melhores resultados dos modelos dos parâmetros estruturais altura do dossel, altura média e DAP médio utilizaram os índices BMI e CSI como variáveis explicativas. Estes resultados indicam que as polarizações paralelas apresentaram maior influência nas funções visto que na formulação destes índices de vegetação são utilizadas apenas as polarizações paralelas. Para a maioria dos parâmetros incoerentes o tipo bacia apresentou os maiores valores de restroespalhamento, pode-se inferir daí que os aspectos dos bosques que mais influenciaram o retorno para o radar foram: a abertura do dossel, existência de troncos caídos sobre o solo, indivíduos com pouca altura, porém com muitos galhos finos e retorcidos.

O uso da imagem multipolarizada PALSAR possibilitou analisar diferentes tipos fisiográficos de bosques de mangue e seus parâmetros estruturais. A capacidade de coletar informações durante o dia e a noite, sendo pouco influenciado pelas condições atmosféricas, bem como, de obter informações sobre as características físicas da vegetação faz do SAR um incomparável sensor para o estudo e o monitoramento dos recursos terrestres. Desta forma, este trabalho conclui que o uso de informações derivadas do SAR são úteis para a análise de ambientes costeiros que visam a conservação e a proteção do ecossistema manguezal, assim como, o uso sustentável de seus recursos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se fazer uso dos parâmetros coerentes extraídos da imagem PALSAR em modo polarimétrico, tais como, a diferença de fase e outros parâmetros obtidos da imagem complexa, além dos incoerentes aqui utilizados. Recomenda-se que seja realizada classificação dos tipos de bosques de mangue, bem como testar outros métodos de classificação, como por exemplo, MAXVER. Recomenda-se o estudo utilizando dois tipos de aquisição de imagens em condições distintas, uma com maré alta e outra com maré baixa, a fim de analisar a influência da maré no retroespalhamento do SAR. Por fim recomenda-se expandir o estudo utilizando o parâmetro biomassa de bosques de mangue.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CINTRÓN, G.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. **Introducción a la ecología del manglar**. Unesco para América Latina y El Caribe- Uruguay, 1983.

CINTRÓN, G.; LUGO, A.E.; MARTINEZ, R. Structure and functional properties of mangrove forest. In: D'ARCY, W.G.; CORREA, M.D. **The botany and natural history of Panama**. St. Louis, Missouri: Missouri Botanical Garden, 1985. p. 53-66.

COELHO-JR., C. **Ecologia de manguezais: zonação e dinâmica da cobertura vegetal em gradientes ambientais, Cananéia, São Paulo, Brasil**. 2003. 166f. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, Brasil, 2003.

COHEN, J. A Coeficient of agreement for nominal scales. **Educational and Measurment**, v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960.

CONGALTON, R. G; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data - principles and practices**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 210 p.

CUNHA-LIGNON, M., Bosques de mangue de Cananéia, litoral sul de São Paulo, Brasil, 2010, fotografias.

CUNHA-LIGNON, M.. **Dinâmica do manguezal no Sistema de Cananéia-Iguape, Estado de São Paulo – Brasil**. 2001. 105f. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 2001.

CUNHA-LIGNON, M..**Ecologia de manguezais: desenvolvimento espaço-temporal no Sistema Costeiro Cananéia-Iguape, São Paulo, Brasil**. 2005. 178f. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 2005.

CUNHA-LIGNON, M.; MENGHINI, R.P.; SANTOS, L.C.M.; NIEMEYER-DINÓLA, C.; SCHAEFFER-NOVELLI. Estudos de caso nos manguezais do Estado de São Paulo (Brasil): aplicações de ferramentas com diferentes escalas espaço- temporais. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v.9, n.1, p.79-91, 2009a.

CUNHA-LIGNON, M.; COELHO-JR., C. ALMEIDA, R.; MENGHINI, R.; CORREA, F.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CINTRÓN-MOLERO, G.; DAHDUOH-GUEBAS, F. Mangrove forests and sedimentary processes on the south coast of Sao Paulo state (Brazil). **Journal of Coastal Research**, Lisbon Portugal, SI 56,p.405-409, 2009b.

CUNHA-LIGNON; M.; MENGHINI, R.P.; ALMEIDA, R.; COELHO-JR., C.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CINTRÓN, G.; DAHDUOH-GUEBAS, F.. Successional processes in mangrove forests in depositional areas, Southeastern, Brazil. **Estuarine Coastal and Shelf Science**. 2010 (Submetido).

- DAHDOUH-GUEBAS, F. The use of remote sensing and gis in the sustainable management of tropical coastal ecosystems. **Environment, Development and Sustainability**, v.4, p.93-112, 2002.
- DOBSON, M. C., ULABY, F. T., PIERCE, L. E., SHARIK, T. L., BERGEN, K. M., KELLNDORFER, J., KENDRA, J. R., LI, E., LIN, Y. C., NASHASHIBI, A., SARABANDI, K., & SIQUEI, P.. Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-S. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, p. 877–895, 1995.
- DONATO, D. C.; KAUFFMAN, J.B.;MURDIYARSO, D.; KURNIANTO, S.; STIDHAM, M.; KANNINEN, M. Mangroves among the most carbon-rich forest in the tropics. **Nature Geoscience**. doi:10.1038/ngeo1123, 2011.
- DUTRA, L. V.; MURA, J. C.; FREITAS, C. C.; SANTOS, J. R.; ELMIRO, M. T. Processamento de imagens de radar de abertura sintética- princípios e aplicações. In: WORKSHOP EM TRATAMENTO DE IMAGENS, , 4., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: NPDI/DCC/ICEx/UFMG, 2003. p4-13.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **The world's mangrove: 1980 – 2005**. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment. Rome, 2007. 77p.
- FREEMAN, A. DURDEN, S.L.A. Three component scattering model for polarimetric SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 36, n.3, p.963-973, 1998.
- FRERY, A. C.; CORREIA, A.; RENNO, C. D.; FREITAS, C. C.; JACOBO-BERLLES, J.; VASCONCELLOS, K. L. P.; MEJAI, M.; SANT'ANNA, S. J. S. Models for synthetic aperture radar image analysis. **Resenhas IME-USP**, v. 4, n. 1, p. 45-77, 1999. (INPE-7247-PRE/3150). Disponível em:<<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.19.21.14.22>>. Acesso em: 02 mar. 2011.
- GAMA, F. F.; SANTOS, J. R.; MURA, J. C. Eucalyptus biomass and volume estimation using interferometric and polarimetric SAR data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 2, p. 939-956, 2010.
- GIRI, C.; OCHING, E.; TIESZEN, L.L.; ZHU, Z.; SINGH, A.; LOVELAND, T.; MASEK, J.; DUKE, N. Status and distribution of mangrove forest of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**. (doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x), p. 1-6, 2010.
- GONG, P.; HOWARTH, P. J. Frequency-Based Contextual Classification and Gray-Level Vector Reduction for Land-Use Identification. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.58, n.4, p.423-437, 1992.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars**. 3.ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998. 866p.
HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. Radar detection of wetland ecosystems: a review. **International Journal of Remote Sensing**. v.29, n.20, p.5809-5835, 2008.

HEUMANN, B. Satellite remote sensing of mangrove forest: Recent advances and future opportunities. **Progress in Physical Geography**. v.35, n. 1, p. 87-108, 2011.

IMHOFF, M.; STORY, M; VERMILLION, C.; KAHN, F.; POLCLYN, F. Forest canopy characterization and vegetation penetration assessment with space-borne radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.GE-24, n. 4, p.535-542, 1986.

IMHOFF, M.L. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.33, p.511–518, 1995.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados de chuva acumulada em 24 h** . Disponível em:
<<http://www.inmet.gov.br/html/observacoes.php?lnk=Gr%E1ficos>> acesso em 2 setembro 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Imagem Landsat TM5**. São José dos Campos, 2009. Disponível em: www.dgi.inpe.br Acesso em: jan. 2010.

_____. **Imagem CBERS 2B**. São José dos Campos, 2008. Disponível em:
www.dgi.inpe.br Acesso em: jun. 2010.

JENSEN, J,R.; tradução EPIPHANIO, J.C.N.(coordenador)...[et al.]. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ed. São José dos Campos, SP. Editora Parêntese, 2009. p598.

KASISCHKE, E. S.; CHRISTENSEN, N. L. JR.; HANEY, E. M. Modeling of geometric properties of Loblolly Pine tree and stand characteristics for use in radar backscatter studies. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 32, n.4, p. 800-822, 1994.

KASISCHKE, E. S.; CHRISTENSEN, N. L. JR.; BOURGEOU-CHAVEZ, L.L. Correlating radar backscatter with components of biomass in Loblolly Pine Forests. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 33, n.3, p.643-659, 1995.

KASISCHKE, E. S.; MELACK, J. M.; DOBSON, M. C. The Use of imaging radars for ecological applications – a review. **Remote Sensing of Environment**, v.59, p.141-156, 1997.

LANDIS, J. R.; KOCH, C. H. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 3, p. 159-174, 1977.

LE TOAN, T.; BEAUDOIN, A.; RIOM, J.; GUYON, D. Relating forest biomass to SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** , v.30, n.2, p.403-411, 1992.

LECKIE, D.G.; RANSON, K.J. Forestry Applications Using Imaging Radar. In: HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. (eds.). **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars**. 3.ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998. 866 p. Cap 9.

LEE J.S., M.R. GRUNES, AND G. DE GRANDI. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. **IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing**, v.37, n. 5, p.2363-2373, 1999.

LEE, J. S; LEE, E.P. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**. Boca Raton: CRC Press. 2009. ISBN978-1-4200-5497-2. 398p.

LIM H. S.; MATJAFRI M. Z.; ABDULLAH K.; SALEH N. MOHD. 2008. Analysis of land covers over northern peninsular malaysia by using ALOS-PALSAR data based on frequency-based contextual and neural network classification technique. In: ALOS PI 2008 SYMPOSIUM.11., 2008, Rhodos (Griechenland). **Proceedings...** Rhodos: ESA, 2008b. ISBN. 978-92-9221-228-5.

LUCAS RM, MOGHADDAM M, CRONIN N. Microwave scattering from mixed-species forests, Queensland, Australia. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.42, p. 2142–2159, 2004.

LUCAS,R.; MITCHELL, A.L.; ROSENQVIST, A.; PROISY, C.; MELIUS, A. Ticehurst. The potencial of L-band SAR for quantifying mangrove characteristics and change: case studies from the tropics. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v.17, n.3, p. 245-264, 2007.

LUCAS, R.M.; BURTING, P.; CLEWLEY, D.; PROISY,C.; SOUZA-FILHO,P.W.; VIERGEVR, K.; WOODHOUSE, L. TICEHURST, C. CARREIRAS, J. ROSENQVIST, A. ACCAD, A.ARMSTON, J. Characterisation and monitoring of mangroves using ALOS PALSAR DATA . **K&C Phase-1 report**. 2009. Disponível em <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/kyoto/phase_1/KC-Phase1-report_Lucas_WT.pdf > acesso em 20 janeiro 2011.

LUCKMAN, A.; BAKER, J.; KUPLICH, T. M.; FREITAS, C.C.; FRERY, A. C. A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for spaceborne SAR instruments. **Remote Sensing of Environment**, v.60, n.1, p1-13, 1997.

LUGO, A. E. Conserving Latin American and Caribbean mangroves: issues and challenges. **Madera y Bosques**, v.8, número especial 1, p5-25, 2002.

LUGO, A.E.; SNEDAKER, S.C. The ecology of mangroves. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.5, p.39-64. 1974.

MESQUITA, A. L; HARARI, J. **Tides and tide gauges of Cananeia and Ubatuba-Brasil (Lat 24)**. São Paulo: Instituto Oceanográfico Universidade de São Paulo. 1983. (11), p. 1-14, Relatório Interno.

MITCHELL, A. **Remote sensing techniques for assessment of mangrove forest structure, species composition and biomass and response to environmental change**. 2003. 510p. PhD thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia. 2003.

MOREAU, S.; LE TOAN, T. Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing livestock management. **Remote Sensing of Environment**. v.84, n.4, p.477–492, 2003.

MOUGIN, E.; LOPÈS, A.; HÉRY, P.; LE TOAN, T.; MARTY, G.; FROMARD, F.; RUDANT, J. P. Multifrequency and multipolarization observation on mangrove forests of French Guyana during SAREX-92 experiment. In: SAREX WORKSHOP, 1993, Paris. **Proceedings...** Paris: ESA, 1993. p. 193-203.

MOUGIN, E.; PROISY, C.; MARTY, G.; FROMARD, F.; PUIG, H.; BETOULLE, J.L.; RUDANT, J.P. Multifrequency and multipolarisation radar backscattering from mangrove forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.37, n.1, p.94–102, 1999.

MUSTAPHA, M.R.; LIM, H.S.; MATJAFRI, M.Z.; HASSAN, F.M. Performance of frequency-based contextual classifier in land use/cover classification using high resolution satellite images. In: Allen M. Larar; Hyo-Sang Chung; Makoto Suzuki (eds.). **Multispectral, hyperspectral, and ultraspectral remote sensing technology, techniques, and applications III**. Incheon, Republic of Korea: SPIE, 2010. (Proc. SPIE 7857, 78570s) doi:10.1117/12.869478.

NARVAES, I. S.; SANTOS, J. R.; SILVA, A. Q. Analysis of structural parameters of forest typologies USING L-band SAR data/Análise dos parâmetros estruturais de tipologias florestais utilizando dados SAR em banda L. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 16, p. 475-489, 2010.

NATIONAL SPATIAL DATA INFRAESTRUCTURE (NSDI). **Geospatial positioning accuracy standards part 3: national standard for spatial data accuracy**. 1998. Disponível em: < <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDCstandards-projects/accuracy/part3/chapter3>>. Acesso em: 10 dez. 2010

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. 4.ed. Boston: McGraw-Hill, 1996. 1408 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO), **Patrimoine Mondial au Brésil**. 3eme ed. Brasília-DF: Caixa Econômica Federal, 2004. 304p.

PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; PAULO, V.; CUNHA, E. S. P. Radares Imageadores nas Geociências: Estado da Arte e Perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 50-62, Abr. 2005. (INPE-12355-PRE/7659). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/05.09.13.40>>. Acesso em: 27 fev. 2010.

PEREIRA, F.R.S. ; KAMPEL, M. ; CUNHA-LIGNON, M; Detecção de bosques de mangue em imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR) utilizando Classificador Contextual Baseado na Frequência. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** Sao José dos Campos: INPE, 2011. p.8177- 8184. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0605.pdf> >. Acesso em: 2 jun. 2011.

POPE K. O., REY-BENAYAS J.M., PARIS J.F. Radar Remote Sensing of forest and wetland ecosystems in Central American Tropics. **Remote Sensing of Environment**, v.2; n.48, p.205-219, 1994.

PROISY, C.,MOUGIN, E., FROMARD, F., AND KARAM,M. A. Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. **Remote Sensing of Environment**, v.71, n.2, p.56–66. 2000.

PROISY, C.; MOUGIN, E.; FROMARD, F. ; TRICHON, V.; KARAM, M.A. On the influence of canopy structure on the radar backscattering of mangrove forest. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.20, 4197-4210, 2002.

RICHARDS, J. A.; WOODGATE, P. W.; SKIDMORE, A. K. An explanation of enhanced radar backscatter from fl ooded forests. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.7, p.1093–1100, 1987.

ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; ITO, N.; WATANABE, M. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global- Scale Monitoring of the Environment. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v.45, n.11, p. 3307-3316, 2007.

SAENGER, P. SNEDAKER, S.C. Pantropical trends in mangrove above-ground biomass and annual litterfall. **Oecologia**, v.96, n.3, p.293-299. 1993.

SANTOS, J.R.; PARDE LA CRUZ, M.S. ARAUJO, L.S. KEIL, M. Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. **International Journal Remote Sensing**, v.23, n.7, p.1217-1229, 2002.

SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; ARAUJO, L. S.; DUTRA, L. V.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SOLER, L. S.; SANT'ANNA, S. J. S. Airborne P-band SAR applied to the above ground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 482-493, 2003.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. **Manguezais brasileiros**. São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 1991. 42p.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CITRÓN-MOLERO. **Guia para estudo de áreas de manguezal: estrutura, função e flora**. São Paulo: Caribbean Ecological Research. 1986. 140p.

SCHAEFFER- NOVELLI, Y; MESQUITA, H.S.L.; CINTRÓN-MOLERO. The Cananéia Lagoon Estuarine System, São Paulo, Brasil. **Estuaries**, v.13, n.2, p.193-203, 1990.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CITRÓN-MOLERO, G.; SOARES, M.L.G; DE-ROSA,T. Brazilian mangroves. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, v.3, n.4, p.561-570, 2000.

SHIMADA, M.; ISOGUSHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR Radiometric and geometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, aceito para publicação, 2009.

SILVA, J. F. Dados climatológicos de Cananeia e Ubatuba (Estado de São Paulo). **Bolm. Climatol. Inst. Oceanogr.** São Paulo, v. 6, p.21,1989.

SIMARD, M., DEGRANDI, G., SAATCHI, S., & MAYAUX, P. Mapping tropical coastal vegetation using JERS-1 and ERS-1 radar data with a decision tree classifier. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.7, p.1461–1474. 2002.

SOARES, M.L.G.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.65, p. 1-18, 2005.

SOUZA-FILHO, P.W.M.; PARADELLA, W. Use of synthetic aperture radar for recognition of coastal geomorphological features, land-use assessment and shoreline changes in Braganá coast, Pará, Northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.75, n.3, p.341-356, 2003.

SOUZA FILHO, P. W.M. ; PARADELLA, W.R. ; SILVEIRA, O.F.M. . Synthetic Aperture Radar for Recognition of Coastal Features in the Wet Tropics: Applications in the Brazilian Amazon Coast. **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi**. Zoologia, Belém, v. 1, n. 1, p. 149-154, 2005.

SUGUIO, K. TESSLER, M.G. **Depósitos quaternários da planície costeira de Cananéia- Iguape (SP)**. São Paulo: USP, 1992. Roteiro das Excursões do 37 congresso Brasileiro de Geologia, v.1, 1992, 31p.

STATSOFT, INC. **Electronic statistics textbook**. Tulsa, OK: StatSoft. 2010. Disponível em; <http://www.statsoft.com/textbook/>. Acesso em; 24/03/2011.

TOWNSEND, P. A. Estimation Forest structure in wetlands using multitemporal SAR. **Remote Sensing of Environment**, v.79, n.2, p.288-304, 2002.

ULABY, F.T. Radar signature of terrain: useful monitors of renewable resources. **Proceedings of IEEE**, v. 70, n.12, p.1410-1428, 1982.

ULABY, F.T.; ALLEN, C.T.; EGER, G.; KANEMASU, E. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index. **Remote Sensing Environment**, v.14, n.1-3, p. 113-133, Jan. 1984.

VALERIANO. D. M. **Relationships between tropical forest structure and remotely sensed synthetic aperture radar data**. 1996. 155p. PhD thesis, University of California, Santa Barbara, USA. 1996.

VALIELA, I.; BOWEN, J.L.; YORK, J.K. Mangrove Forest: one of the world's threatened major tropical environments. **BioScience**, v.51, n.10. p.807-815, 2001.

WANG, Y.; IMHOFF, M. L. Simulated and observed L-HH radar backscatter from tropical mangrove forest. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, n.15, p.2819-2828, 1993.

WANG, Y.; HESS, L. L.; FILOSO, S.; MELACK, J. M. Understanding the radar backscattering from flooded and non- flooded Amazonian forests: Results from canopy backscatter modeling. **Remote Sensing of Environment**, v.54, n.3, p.324–332,1995.

APÊNDICE A – Descrição dos 16 bosques de mangue

1 - Bosque de franja em progradação - Bagaçu 1

Bagaçu 1 é um bosque denso de franja em progradação, dominado por *L. racemosa*, com indivíduos jovens e com desenvolvimento estrutural variando de inicial a médio (Figura A1). As árvores apresentam troncos finos e compridos, de altura intermediária e baixa inclinação. Na parte frontal do bosque ocorre uma faixa da gramínea *Spartina alterniflora*. Durante a maré cheia os pneumatóforos ficam encobertos.

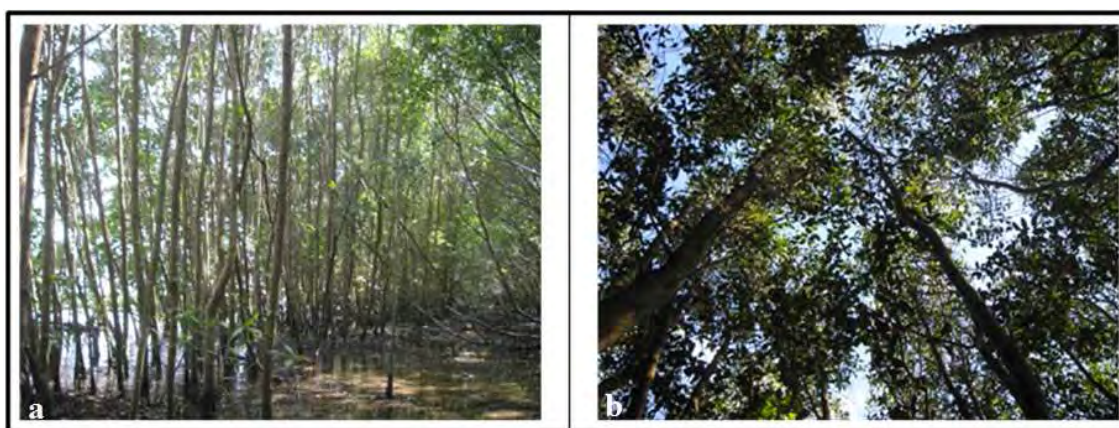


Figura A 1- Bosque de franja em progradação Bagaçu 1. a) Troncos finos e altura intermediária. b) Dossel pouco espesso.

2- Bosque de franja maduro - Bagaçu 2

O Bosque Bagaçu 2 (Figura A2) é bem desenvolvido e dominado por *A. schaueriana*. É basicamente composto por troncos com elevadas classe diamétrica e altura do dossel. O bosque possui baixa densidade. Algumas *R. mangle* são encontradas, com rizóforos variando de 0,5 à 1,5 m de altura.



Figura A 2 – Franja com bosques maduros Baguaçu 2. a) bosque com menor densidade e árvores de maior porte. b) Dossel denso.
 Fonte: Cunha-Lignon (2010).

3 - Bosque de franja em progradação - Nóbrega 1

O Bosque Nóbrega 1 (Figura A3) é do tipo franja em progradação, dominado por *L. racemosa*. Apresenta alta densidade com indivíduos de desenvolvimento estrutural médio. Os pneumatóforos não ultrapassam os 10 cm e durante a maré cheia estes são encobertos. As árvores são pouco inclinadas, a maior parte com tronco ereto. Segundo Cunha-Lignon (comunicação pessoal) os dados de 2009 demonstram que o bosque Nóbrega 1 não é típico de progradação como o do Baguaçu 1 e Sitio Grande 1, pois apresenta indivíduos de porte médio e não possui um considerável banco de gramínea *S. alterniflora* associado à franja do bosque.



Figura A 3- Bosque de franja em progradação Nóbrega 1. (a) Bosque denso com troncos finos. (b) Dossel pouco espesso.

4 - Bosque de franja maduro - Nóbrega 2

Nóbrega 2 (Figura A4) é um bosque de franja maduro dominado por *R mangle* com árvores desenvolvidas com baixa densidade. Apresenta rizóforos variando de 1 à 2,5 m de altura e DAP de 5 à 9 cm.

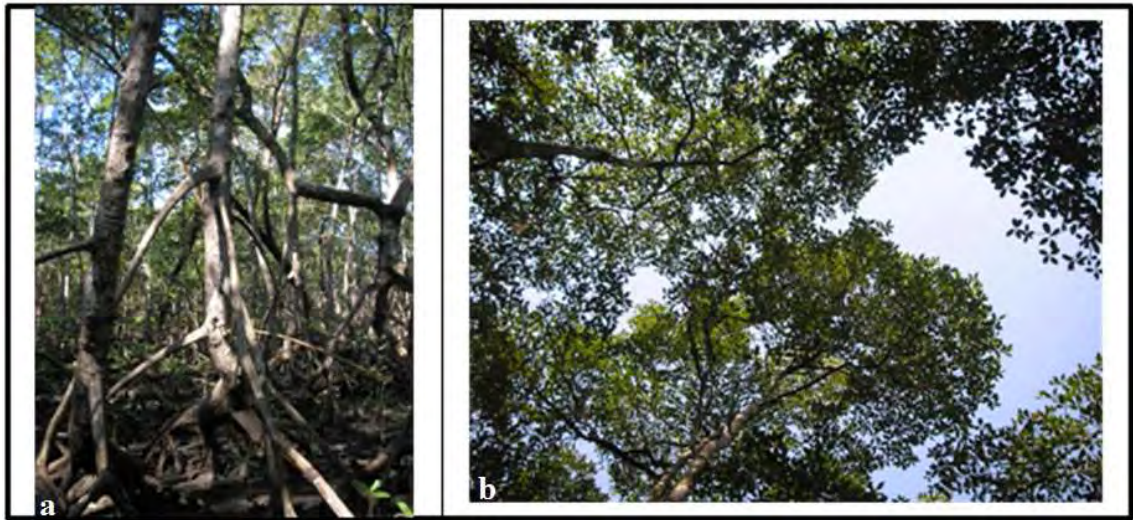


Figura A 4 – Franja com bosques maduros Nóbrega 2. (a) Bosque desenvolvido com troncos grossos e rizóforos grandes. (b) Dossel denso.

5 - Bosque de bacia - Nóbrega 3

Nóbrega 3 (Figura A5) é um bosque de bacia dominado por *L. racemosa*. Bosque denso com muitos galhos pequenos entrelaçados. Localiza-se próximo a uma ilha colonizada por vegetação de restinga.



Figura A 5 – Bosque de bacia Nóbrega 3. Bosque denso com muitos galhos pequenos entrelaçados.

6 - Bosque de franja em progradação - Sítio Grande 1

Sítio Grande 1 (Figura A6) é um bosque de franja em progradação, dominado por *R. mangle*. Bosque denso com indivíduos jovens. Recebe aporte de água diariamente devido à variação da maré, que cobre parcialmente os rizóforos do mangue, deixando parte das raízes descoberta. Na parte frontal do bosque ocorre uma faixa de *S. alterniflora*. Localiza-se na desembocadura do Rio Sítio Grande.



Figura A 6 – Bosque de franja em progradação Sítio Grande 1. (a) Bosque denso com indivíduos jovens e troncos finos. (b) Dossel pouco espesso.

7 - Bosque de franja maduro - Sítio Grande 2

Sítio Grande 2 (Figura A7) é do tipo franja com bosques maduros, dominado por *R. mangle*. Bosque desenvolvido com indivíduos adultos. Apresenta alguns indivíduos jovens com menos de 1 m de altura e os indivíduos adultos com rizóforos grandes de 0,5 à 2 m de altura e DAP de 4 à 8 cm e expostos durante a maré alta.



Figura A 7 – Bosque de franja maduro Sítio Grande 2. (a) Bosque desenvolvido com árvores grandes e troncos grossos. (b) Dossel espesso.

8 - Bosque de franja maduro - Cardoso 1

Cardoso 1 (Figura A8) é um bosque maduro do tipo franja. O bosque recebe maior frequência de inundação por estar mais próximo do estuário e é dominado por *L. racemosa* e *R. mangle*. Árvores altas com muitos rizóforos expostos e troncos inclinados. Observa-se a presença de grandes bromélias nos troncos das árvores e muitos troncos caídos no solo.

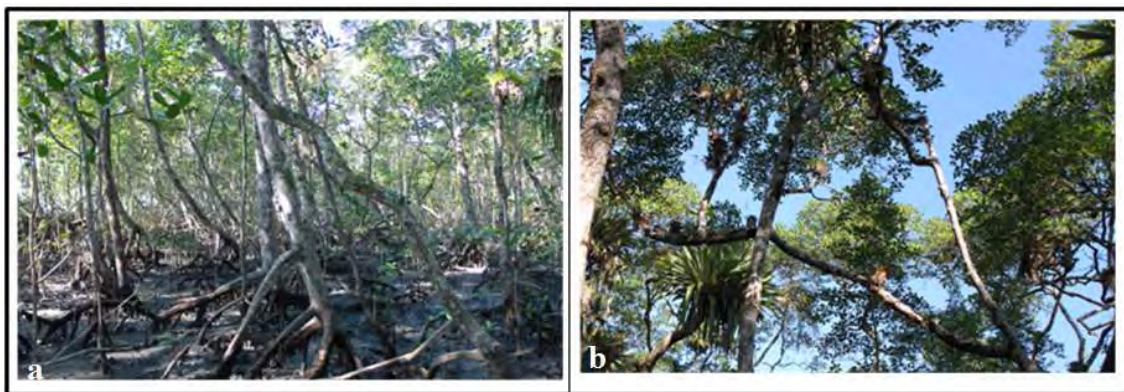


Figura A 8 – Bosque de franja maduro Cardoso 1. (a) Árvores em torno de 8 m com muitos rizóforos expostos e troncos inclinados (b) Dossel com bromélias e esparso.
Fonte: Cunha-Lignon (2010).

9 - Bosque de franja maduro - Cardoso 2

Cardoso 2 (Figura A9) é um bosque maduro do tipo franja dominado por *R. mangle* e também presença de *L. racemosa*. Possui características semelhantes ao bosque franja Cardoso 1e é um bosque desenvolvido.

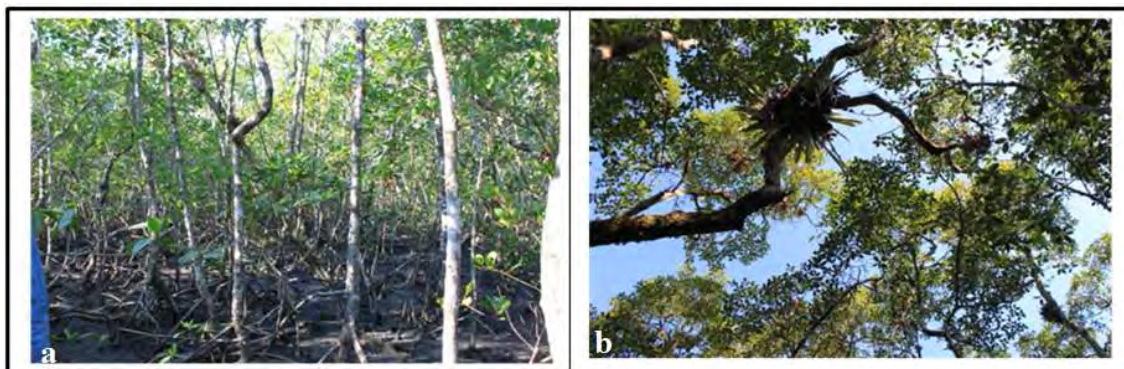


Figura A 9 – Bosque de franja maduro Cardoso 2. (a) Bosque desenvolvido com muitas raízes expostas. (b) Dossel aberto.
Fonte: Cunha-Lignon (2010).

10 - Bosque de bacia - Cardoso 3

Cardoso 3 (Figura A10) é um bosque do tipo bacia dominado por *L. racemosa* e *R. mangle*. Altura do dossel chegando a 3,5 m e DAP maiores para a *L. racemosa* e

menores para a *R. mangle*. Apresenta características de bosque de bacia, com arquitetura arbustiva e pouco desenvolvimento estrutural.



Figura A 10 – Bosque de bacia Cardoso 3. (a) Bosque denso com troncos retorcidos (b) Dossel esparso.

Fonte: Cunha-Lignon (2010).

11 - Bosque de bacia - Cardoso 4

Cardoso 4 (Figura A11) é um bosque do tipo bacia dominado por *R. mangle*. Bosque com arquitetura arbustiva com pouco desenvolvimento estrutural, área densa com muitos rizóforos e troncos retorcidos. Solo umedecido pela água vinda da restinga do final do transecto.



Figura A 11 – Bosque de bacia Cardoso 4. (a) Bosque de bacia com troncos retorcidos. (b) Dossel aberto.

Fonte: Cunha-Lignon (2010).

12 - Bosque de franja maduro - Prainha 1

Prainha 1 (Figura A12) é um bosque maduro do tipo franja dominado por *R. mangle* e *L. racemosa* e presença de *A. shaueriana*. Bosque bem desenvolvido. Observam-se algumas bromélias nos troncos, os rizóforos são grandes com 0,5 a 1,8 m de altura e DAP de 3 a 10 cm, ficando expostos durante a maré alta.



Figura A 12 – Bosque de franja maduro Prainha 1. (a) Bosque desenvolvido com troncos grossos. (b) Dossel denso.
Fonte: Cunha-Lignon (2010).

13 - Bosque de franja maduro - Prainha 2

Prainha 2 (Figura A13) é um bosque maduro do tipo franja, dominado por *R. mangle* e *L. racemosa*. Bosque desenvolvido com estrutura um pouco menor do que o bosque Prainha 1. As árvores e rizóforos são inclinados irregularmente e as raízes chegam a 1 m de altura ficando expostas durante a maré alta.

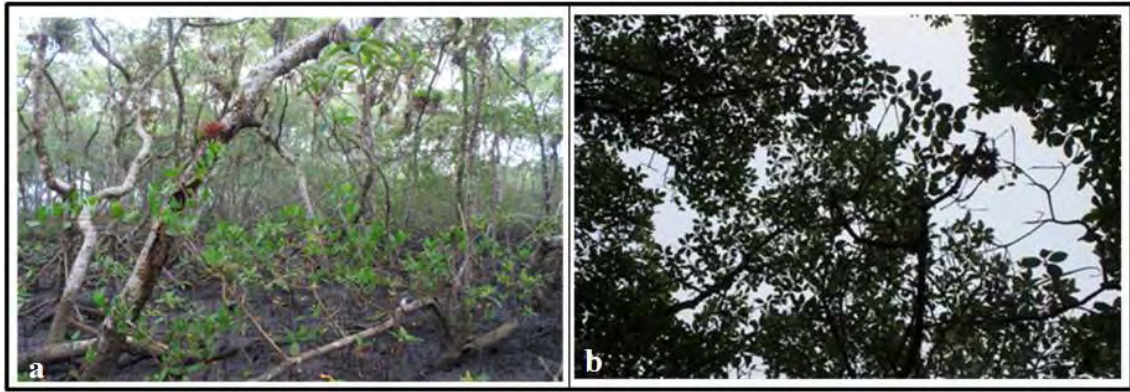


Figura A 13 – Bosque de franja maduro Prainha 2. (a) Bosque desenvolvido com árvores inclinadas. (b) Dossel denso com algumas lacunas.
Fonte: Cunha-Lignon (2010).

14 - Bosque de bacia - Batatal

Batatal (Figura A14) é um bosque de bacia dominado por *L.racemosa*. Bosque denso com árvores baixas e retorcidas e com muitos troncos. Área com mangue de botão *Conocarpus erecta* L. (Combretaceae), gramíneas não identificadas e vegetação de restinga no entorno do bosque de *L.racemosa*.



Figura A 14 – Bosque de bacia Batatal. (a) Bosque denso com árvores baixas e retorcidas (b) folhas de *L.racemosa*.
Fonte: Cunha-Lignon (2010).

15- Bosque de clareira - *main gap*

O bosque *main gap* (Figura A15) é uma área de grande clareira, aproximadamente 10.000 m². Bosque com muitos indivíduos adultos mortos, rebrotamento de adultos e

novos indivíduos se instalando. Dominado por *L. racemosa* e *A. schaueriana*. Durante a maré cheia a água inunda o solo.

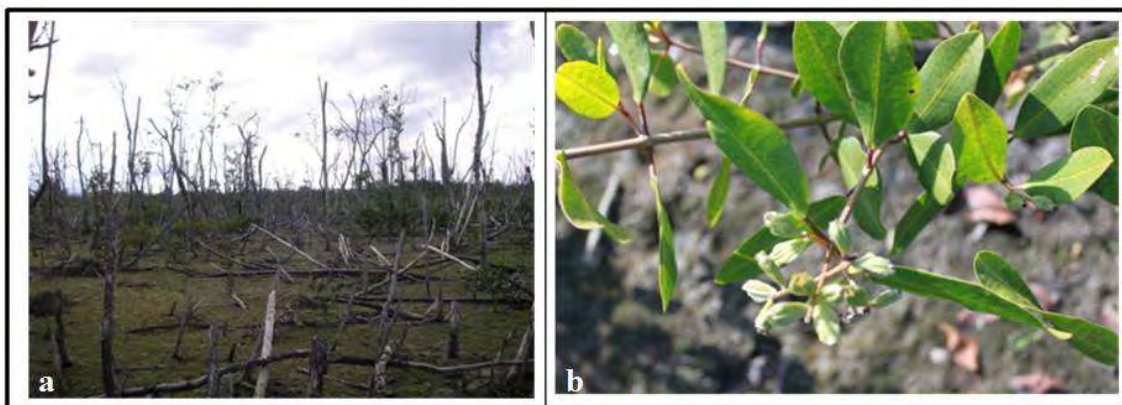


Figura A 15 – Bosque de clareira main gap. (a) Clareira com presença de indivíduos adultos mortos e novos indivíduos recolonizando área. (b) folhas e propágulos de *L. racemosa*.

Fonte: Cunha-Lignon (2010).

16 - Bosque de franja maduro - adjacente ao *main gap*

O bosque adjacente ao *main gap* (Figura A16) é um bosque bem desenvolvido e pouco denso, com árvores maduras e grandes, dominado por *A. schaueriana*. Representa o bosque lateral ao *main gap*, indicando que provavelmente este apresentava características estruturais semelhantes antes de ocorrer processo que ocasionou a formação da clareira. O bosque de franja recebe forte influência da variação de maré.



Figura A 16 – Bosque de franja maduro adjacente ao *main gap*. (a) e (b) Bosque desenvolvido, árvores grandes e espaçadas.

Fonte: Cunha-Lignon (2010).

APÊNDICE B

Tabela B 1 - Valores de H e p referentes ao teste Kruskal-Wallis (5% de significância).

Parâmetro	H	<i>p</i>
HH	8,82	0,0121
HV	7,85	0,0197
VV	5,58	0,0613
Pt	6,96	0,0307
BMI	7,52	0,0233
CSI	2,65	0,2653
VSI	7,05	0,0295
HV/HH	7,12	0,0284
HV/VV	2,36	0,3069
VV/HH	1,95	0,3772

Tabela B 2 - Valores de p valor para o teste Comparação Múltipla entre os tipos de bosques progradação (P), maduro (M), bacia (B). Em destaque em negrito os valores de p significativos.

Parâmetros Incoerentes		P	M	B
HH	P	-	1,0000	0,2630
	M	1,0000	-	0,0090
	B	0,2630	0,0090	-
HV	P	-	0,3798	0,0162
	M	0,3798	-	0,2252
	B	0,0162	0,2252	-
VV	P	-	1,0000	0,0792
	M	1,0000	-	0,1839
	B	0,0792	0,1839	-
PT	P	-	1,0000	0,0744
	M	1,0000	-	0,0529
	B	0,0744	0,0529	-
BMI	P	-	1,0000	0,1014
	M	1,0000	-	0,0278
	B	0,1014	0,0278	-
CSI	P	-	0,5323	1,0000
	M	0,5323	-	0,6037
	B	1,0000	0,6037	-
VSI	P	-	0,0247	0,1711
	M	0,0247	-	1,0000
	B	0,1711	1,0000	-
HV/HH	P	-	0,0237	0,3911
	M	0,0237	-	0,8814
	B	0,3911	0,8814	-
HV/VV	P	-	0,9653	0,3728
	M	0,9653	-	1,0000
	B	0,3728	1,0000	-
VV/HH	P		0,7430	1,0000
	M	0,7430		0,8199
	B	1,0000	0,8199	

Tabela B 3– Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para a altura do dossel.

	Beta	Sd Beta	β	Sd β	t(13)	p
Intercepto			10,07872	3,324802	3,03137	0,009639
BMI	-0,772329	0,157626	-2,14371	0,437513	-4,89976	0,000290
CSI	0,457282	0,157626	2,14889	0,740727	2,90105	0,012383

Tabela B 4 - Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para a altura média.

	Beta	Sd Beta	β	Sd β	t(13)	p
Intercepto			4,07041	1,783032	2,28286	0,039907
BMI	-0,838962	0,145885	-1,34932	0,234630	-5,75085	0,000067
CSI	0,359675	0,145885	0,97938	0,397239	2,46547	0,028375

Tabela B 5 - Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para DAP médio.

	Beta	Sd Beta	β	Sd β	t(13)	p
Intercepto			14,54714	3,582293	4,06084	0,001349
BMI	-0,623307	0,162636	-1,80664	0,471397	-3,83252	0,002075
CSI	0,642505	0,162636	3,15292	0,798093	3,95057	0,001660

Tabela B 6- Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para área basal.

	Beta	Sd Beta	β	Sd β	t(13)	p
Intercepto			17,35489	2,321032	7,47723	0,000012
HH	-0,801291	0,180387	-4,54911	1,024096	-4,44207	0,000992

Tabela B 7 - Variáveis explicativas e os repetíveis valores de Beta e dos parâmetros obtidos para o modelo de regressão linear para a densidade (log).

	Beta	Sd Beta	β	Sd β	t(13)	p
Intercepto			4,613352	0,158579	29,09180	0,000000
HH	0,734809	0,204507	0,229529	0,063881	3,59307	0,004221