



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.09.22.43-TDI

**AVALIAÇÃO DE DADOS SAR POLARIMÉTRICOS
PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM DIFERENTES
FITOFISIONOMIAS DE FLORESTAS TROPICAIS**

Igor da Silva Narvaes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. João Roberto dos Santos, aprovada em 16 de setembro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3837N9S>>

INPE
São José dos Campos
2010

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 e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.09.22.43-TDI

**AVALIAÇÃO DE DADOS SAR POLARIMÉTRICOS
PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM DIFERENTES
FITOFISIONOMIAS DE FLORESTAS TROPICAIS**

Igor da Silva Narvaes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. João Roberto dos Santos, aprovada em 16 de setembro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3837N9S>>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Narvaes, Igor da Silva.

N167a Avaliação de dados SAR polarimétricos para estimativa de biomassa em diferentes fitofisionomias de florestas tropicais / Igor da Silva Narvaes. – São José dos Campos : INPE, 2010.
xxii+168 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.09.22.43-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientador : Dr. João Roberto dos Santos.

1. Floresta tropical. 2. SAR. 3. Parâmetros coerentes/incoerentes. 4. Atributos de Touzi . I.Título.

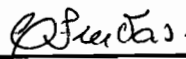
CDU 528.711

Copyright © 2010 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 © 2010 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.

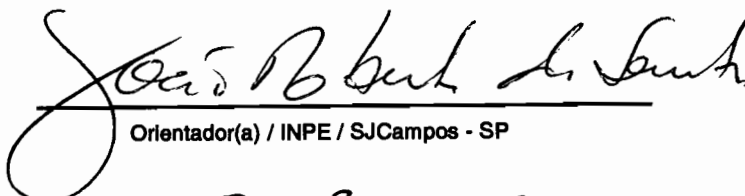
**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Doutor(a) em
Sensoriamento Remoto**

Dra. Corina da Costa Freitas



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. João Roberto dos Santos



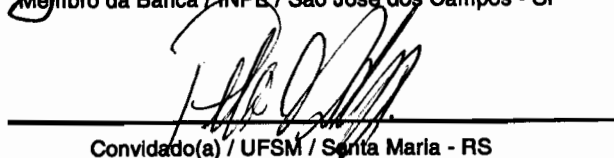
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro



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

Dr. Pedro Roberto de Azambuja Madruga



Convidado(a) / UFSM / Santa Maria - RS

**Dr. Paulo Maurício Lima de Alencastro
Graça**



Convidado(a) / INPA / Manaus - AM

Aluno (a): Igor da Silva Narvaes

São José dos Campos, 16 de setembro de 2010

À minha amada e dedicada esposa, Patrícia

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que colaboraram com a minha vida acadêmica, em especial na elaboração da minha tese.

Ao Dr. João Roberto dos Santos, pela amizade, transmissão de conhecimentos relevantes e incentivo nas horas de inquietação.

À Dra. Corina da Costa Freitas, por ter fornecido o indicativo estatístico de muitos pontos considerados cruciais neste trabalho.

Aos amigos e colegas Arnaldo Queiroz da Silva e Cléber Gonzales de Oliveira, parceiros de muitas horas, sem a ajuda nas discussões e sugestões a respeito do tema, muito do que foi feito não teria sido possível realizar, além da companhia de respeito e amizade certa na vida que segue além dos muros desta instituição.

Ao Dr. Paulo de Alencastro Graça, pelo suporte de campo e registro das fotografias hemisféricas.

Ao colega e conterrâneo Marcos Adami, pela ajuda na montagem do banco de dados das espécies levantadas no inventário florestal.

Ao Dr. Sidnei João S. Sant'Anna, pela assistência no programa de geração de respostas polarimétricas.

Ao INPE, por oferecer um serviço de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto de qualidade, e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos ao longo de todo o doutoramento.

Ao LBA/Santarém, pelo suporte logístico e apoio institucional ao longo do trabalho de campo.

A meus pais, Mariza Terezinha da Silva Narvaes e Luiz Carlos Narvaes pela atenção, amor, dedicação e carinho na minha criação e por acreditar que o caminho que escolhi sempre foi o correto para minha formação, e a meus irmãos, familiares e amigos pelo incentivo a mim concedidos.

Ao meu amigo Dr. Fabiano Pimentel Torres pelo incentivo, torcida e em especial pela sua amizade.

Ao Engenheiro Florestal Dr. Fábio Saidelles, por servir de exemplo de luta e constante superação em meus estudos.

À Pesquisadora do INPE/CRS Dra. Tania Maria Sausen, pelo incentivo e tempo cedido para o término da redação da tese.

À Maria Aurélia Dias Dornelles, carinhosamente conhecida por todos como “Prenda”, por acreditar que o conhecimento é capaz de transformar a sociedade em que vivemos.

A minha sogra Leda Iara Simões Palma e ao meu sogro Élio dos Santos Palma, pelo apoio e incentivo durante todo o percurso de minha tese.

Aos meus cunhados Bruno Leandro Simões Palma, Bruna Tanira Simões Palma, Mirian Andreise da Silva Lencina e a minha sobrinha e afilhada Ana Luiza Lencina Palma pelo apoio e incentivo na realização do doutorado.

Em especial a minha esposa Patrícia, pela paciência, compreensão, amor e carinho dedicados a mim em minha vida acadêmica e profissional.

RESUMO

Os estudos pioneiros de quantificação de biomassa em florestas utilizando dados multipolarizados comprovam que este tipo de dado é sensível à saturação do sinal até determinados níveis de biomassa. Todavia, estudos mais recentes utilizando atributos coerentes e incoerentes extraídos de imagens polarimétricas vêm sendo paulatinamente utilizados, já que nestes os valores de biomassa parecem não sofrer tanto a saturação do sinal em relação ao comprimento de onda utilizado. Baseado nisto, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de dados PolSAR L (ALOS/PALSAR) para análise da dependência da estrutura florestal no entendimento da interação do sinal de radar-alvo e para a modelagem da estimativa da biomassa florestal. O estudo foi conduzido em uma área experimental na região da Floresta Nacional do Tapajós e em seus arredores. Para alcançar o objetivo citado, primeiramente efetuou-se uma análise exploratória da sensibilidade dos atributos polarimétricos na verificação das variações florístico-estruturais da tipologia florestal em análise. A abordagem metodológica consistiu na extração de atributos polarimétricos tais como resposta polarimétrica co-polarizada, diferença de fase HH-VV e plano entropia – ângulo alfa médio. Adicionalmente, foram obtidos os valores de fração de abertura do dossel nas unidades amostrais do inventário florestal para o tratamento dos dados de florísticos e de estrutura horizontal e vertical. Para a análise da relação dos atributos polarimétricos com a biomassa florestal, foi empregado a análise de regressão como método estatístico. As variáveis explicativas utilizadas são compostas de uma gama de atributos polarimétricos considerados pela literatura como incoerentes e coerentes, ou seja, baseados apenas na medida de potência do radar – dados em amplitude- e adicionalmente na sua informação de fase da radiação retroespalhada, respectivamente. Para a modelagem de biomassa arbórea acima do solo, os atributos mais importantes foram o coeficiente de retroespalhamento na polarização HH, a componente de espalhamento volumétrico da decomposição de Freeman, a magnitude da segunda componente, a fase da segunda e terceira componentes e o ângulo de heliticidade médio de Touzi. Com o intuito de validar os resultados obtidos pelo modelo gerado foi utilizado um conjunto de dados independentes provenientes do inventário florestal, o qual indicou erros médios na estimativa de biomassa inferiores a 20%. Por sua vez, a análise de sensibilidade dos dados PolSAR e as variações florístico-estruturais, comprovou que o retroespalhamento do sinal é governado pela associação de condições fisionômicas de cada unidade amostral, tais como: número de estratos, diversidade florística, distribuição espacial e densidade de árvores. Dessa forma, este estudo corrobora a hipótese de que dados ALOS/PALSAR (banda L), no modo polarimétrico, podem ser utilizados para explicar os mecanismos de espalhamento que regem as diferenças estruturais das fitofisionomias analisadas, além de quantificar o potencial produtivo de diferentes fitofisionomias na floresta amazônica, com acurácia compatível à obtida em inventários florestais regionais.

POLARIMETRIC SAR DATA EVALUATION FOR ESTIMATING BIOMASS OF DIFFERENT TROPICAL FOREST VEGETATION TYPES

ABSTRACT

The pioneering studies of forest biomass quantification using multipolarized SAR data showed that SAR data saturated above certain levels of biomass. However, more recent studies using attributes extracted from coherent and incoherent polarimetric images showed that these data do not seem to suffer so much saturation of the signal depending on the wavelength used. Based on this, this study aims to evaluate the potential of L band PolSAR data (ALOS/PALSAR) for dependency analysis of forest structure in the understanding of the interaction the radarsignal-target and to modeling of the estimation of forest biomass. The study was conducted in an experimental area at the region where the Tapajos National Forest and its environs is located. To achieve the aforementioned goal, an exploratory analysis of the sensitivity of polarimetric attributes variations in the verification of structural-floristic forest type under consideration was first performed. The methodological approach consisted in the extraction of polarimetric attributes such as copolarized polarimetric response, phase difference HH -VV and mean alpha angle-entropy plan. Additionally, we obtained values of canopy opening fraction in forest inventory sampling units for the processing of floristic, horizontal and vertical structure. To analyze the relationship of the polarimetric attributes with forest biomass was used regression analysis as statistical method. The explanatory variables used are composed of a range of polarimetric attributes considered by literature as incoherent and coherent, in other words, based only on the radar measurement of power – amplitude data – and additionally in its phase information of the backscattered radiation, respectively. To model the above ground tree biomass the most important attributes were the backscattering coefficient at HH polarization the volume scattering component of the Freeman's decomposition, the Touzi's magnitude of the second component, the phase of the second and third components and the heliticity mean angle. Aiming to validate the results obtained by the model a set of independent data from the forest inventory were generated, which indicated that average errors in estimating biomass were below 20%. In turn, the sensitivity analysis of the data PolSAR and floristic-structural variables proved that the backscatter signal is governed by the association of physiognomic conditions of each sampling unit, such as number of strata, floristic diversity, spatial distribution and tree density. Thus, this study supports the hypothesis that ALOS / PALSAR data (L-band) in polarimetric mode can be used to explain the scattering mechanisms according to the structural differences of the vegetation types examined, and also quantify the productive potential of different vegetation types in the Amazon rainforest, with an accuracy compatible with that obtained in regional forest inventories.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Quando a componente do campo elétrico E na direção x é zero, $E_x = 0$, há somente oscilação do vetor campo elétrico na direção y, e a onda é dita como sendo verticalmente polarizada (a). Similarmente, quando a componente E na direção y é zero, $E_y = 0$, há somente oscilação do vetor campo elétrico na direção x, e a onda é dita como sendo horizontalmente polarizada (b).....	7
Figura 2.2 - Padrão de polarização no plano x-y, ângulo de rotação ψ , ângulo de elipticidade χ e ângulo auxiliar α . A dimensão da elipse é governada pelos valores máximos das componentes horizontal e vertical do campo elétrico.	8
Figura 2.3 - Sistema de convenções FSA “Forward Scattering Alignment” e BSA “Back Scattering Alignment”.....	9
Figura 2.4 - Representação gráfica com a Esfera de Poincaré, indicando os estados de polarização e seus estados intermediários entre os pólos.....	10
Figura 2.5 - Desenho esquemático dos tipos de contribuição modelados pela decomposição de Freeman-Durden. Espalhamento do tipo volumétrico (a); espalhamento do tipo double bounce (b) e superficial (c).....	14
Figura 2.6 – Desenho esquemático da associação entre entropia (H) e anisotropia (A), para quatro configurações diferentes de autovalores.....	17
Figura 2.7 - Diagrama de classificação bi-dimensional do plano de entropia (H) e ângulo de orientação (α).	18
Figura 2.8 - Representação tridimensional da resposta de polarização de um alvo teórico.	25
Figura 3.1 - Localização geográfica da FLONA Tapajós, PA, e região de entorno. A linha pontilhada mostra em destaque a área de realização do experimento, plotada em uma imagem Landsat TM (composição R5-G4-B3), obtida em 03/07/2007.....	30
Figura 3.2 - Representação esquemática da amostragem e do tipo de unidade amostral realizado no inventário florestal de 2005. P1 à P6 indicam o número em sequência de unidades amostrais realizadas nesse inventário.....	31
Figura 3.3 - Representação esquemática das unidades amostrais adotadas na área de estudo. (a) unidade básica materializada em áreas de sucessão secundária inicial; (b) unidade básica materializada em áreas de sucessão secundária intermediária e avançada e; (c) unidade básica materializada em áreas de floresta primária e floresta com exploração madeireira, no inventário de 2007 (IF ₂₀₀₇).	32
Figura 3.4 – Desenho esquemático de uma medida de fração de abertura de dossel, utilizando fotografia hemisférica.....	33
Figura 3.5 - Localização geográfica das amostras das diferentes fitofisionomias realizadas na FLONA Tapajós, nos inventários IF ₂₀₀₅ e IF ₂₀₀₇ (n=33), escolhidas para a geração do modelo final de biomassa arbórea acima do solo. A imagem corresponde ao formato intensidade, em banda L do ALOS-PALSAR (composição R _{HH} , G _{VV} , B _{HV}), obtida em outubro de 2006.	36
Figura 3.6 -Representação esquemática do procedimento de georreferenciamento das árvores inventariadas nas unidades amostrais.	37
Figura 3.7 – Precipitação diária para o mês de aquisição da imagem utilizada.	39
Figura 3.8 – Desenho esquemático da configuração das características do sistema de imageamento adquiridas pelo sensor ALOS/PALSAR.....	43
Figura 3.9 – Geração e extração dos atributos polarimétricos SAR.....	46
Figura 4.1 – Metodologia empregada para a análise da interação sinal SAR-alvo florestal e geração do modelo de biomassa para as fitofisionomias em análise.....	61
Figura 5.1 – Comportamento da curva espécie área obtida da amostragem no IF ₂₀₀₇ . ..	63

Figura 5.2 – Composição do índice de valor de importância – IVI para as espécies com maiores valores de IVI amostradas no IF ₂₀₀₇	64
Figura 5.3 – Distribuição diamétrica da totalidade de indivíduos arbóreos inventariados no IF ₂₀₀₇	66
Figura 5.4 - Agrupamento das parcelas amostrais pelo método de classificação TWINSpan ('Two Way Indicator Species Analysis'), caracterizando os ambientes internos das tipologias florestais na Floresta Ombrófila Densa.	68
Figura 5.5 - Teste K-S para as variáveis biofísicas DAP (a) e HT(b) das unidades amostrais do IF ₂₀₀₇ , representados pelo intervalo de confiança para a média, ao nível de 95%.....	72
Figura 5.6 - Distribuição diamétrica, valores médios de HT por classes de DAP e valores de biomassa arbórea acima do solo estimados para os grupos ecológicos G1 (a), G2 (b) e G3 (c).....	73
Figura 5.7 – Distribuição diamétrica das unidades amostrais do IF ₂₀₀₇ e os respectivos valores médios de HT por classe de DAP para floresta primária (a), floresta com exploração madeireira (b), sucessão secundária avançada (c), sucessão secundária intermediária (d) e sucessão secundária inicial (e).....	76
Figura 5.8 – Exemplo de fotografia tomada no interior da floresta, utilizando uma câmera ajustada com lente hemisférica (fisheye). (a) imagem 8 bits de floresta primária; e (b) imagem transformada em monocromática por intermédio de um limiar de corte, com a definição dos pixels com e sem presença de vegetação; (c) imagem 8 bits de sucessão secundária inicial; e (d) imagem transformada em monocromática por intermédio de um limiar de corte, com a definição dos pixels com e sem presença de vegetação.	82
Figura 5.9 – Diagrama de dispersão da fração de abertura do dossel (%) de todas as tipologias analisadas (FP = floresta primária; FEM = floresta com exploração madeireira; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial).	85
Figura 5.10 – (a) Histograma de distribuição dos dados de fração de abertura do dossel e (b) gráfico de probabilidade normal para todas as observações possíveis (n = 35).	86
Figura 5.11 – Diagrama de dispersão da fração de abertura do dossel (%) para todas as tipologias analisadas. As barras verticais denotam intervalos de confiança para a média ao nível de 95% e os círculos representam os <i>outliers</i>	87
Figura 5.12 – Distribuição dos pontos da diferença de fase HH-VV, para a (a) floresta primária, (b) floresta com exploração madeireira, (c) sucessão secundária avançada, (d) sucessão secundária intermediária e (e) sucessão secundária inicial.	88
Figura 5.13 – Histograma do comportamento dos valores de direção média da Φ HH-VV e dos seus respectivos desvios-padrão circular associados.....	95
Figura 5.14 – Resposta de polarização em banda L (ALOS/PALSAR) para unidades de (a) floresta primária, (b) floresta com exploração madeireira, (c) sucessão secundária avançada, (d) sucessão secundária intermediária, (e) sucessão secundária inicial na região do Tapajós – PA, Brasil.	98
Figura 5.15 – Perfil fisionômico-estrutural (transecto de 25 x 100m) de floresta com exploração madeireira (FEM15), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.	102
Figura 5.16 – Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 25 x 100m, de floresta com exploração madeireira (FEM25), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.....	102
Figura 5.17 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 100m, de floresta em estágio de sucessão secundária avançada (SSA27), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.	104

Figura 5.18 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 100m, de floresta em estágio de sucessão secundária avançada (SSA18), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.	105
Figura 5.19 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 100m, de floresta em estágio de sucessão secundária intermediária (SSInt3), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.	106
Figura 5.20 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 100m, de floresta em estágio de sucessão secundária intermediária (SSInt22, SSInt7 e SSInt26), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.	107
Figura 5.21 - Perfil fisionômico-estrutural (transecto de 10 x 100m) de floresta em estágio de sucessão secundária intermediária (SSInt10), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.	108
Figura 5.22 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) em transectos de 10 x 100m (SSI4 e SSI24) e de 10 x 50m (SSI6), de floresta em estágio de sucessão secundária inicial (SSI4, SSI6 e SSI24), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.	110
Figura 5.23 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 50m, de floresta em estágio de sucessão secundária inicial (SSI31 e SSI32), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.	111
Figura 5.24 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 50m, de floresta em estágio de sucessão secundária inicial (SSI5 e SSI28), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.	113
Figura 5.25 – Distribuição dos <i>pixels</i> no espaço de classificação bidimensional (H, $\bar{\alpha}$) para todas as fitofisionomias analisadas referentes ao IF ₂₀₀₇	115
Figura 5.26 – Fluxograma da modelagem de biomassa arbórea acima do solo, por intermédio da utilização dos atributos polarimétricos.	118
Figura 5.27 - Relação entre a biomassa e atributos incoerentes (matriz de correlação e diagramas de dispersão). Correlações significativas ao nível de 10% de significância são indicadas em vermelho.	119
Figura 5.28 – Relação entre a biomassa e atributos coerentes (matriz de correlação e diagramas de dispersão). Correlações significativas ao nível de 10% de significância são indicadas em vermelho.	120
Figura 5.29 – Diagrama de dispersão (a) e do tipo Box-whisker (b) com a presença de outliers. O ponto central refere-se ao valor da mediana do conjunto de dados para a variável explicativa em questão (σ°_{HH}).	124
Figura 5.30 – Processo de seleção do modelo. A linha contínua e tracejada indica os valores de R ² e QMR dos subconjuntos de variáveis explicativas que apresentaram os melhores desempenhos.	130
Figura 5.31 – Dispersão dos dados entre os resíduos do modelo selecionado e a combinação de cada termo de interação bivariado.	133
Figura 5.32 – Valores de distância de Cook referentes a cada observação do modelo selecionado.	136
Figura 5.33 – Diagnóstico adicional mostrando o diagrama de dispersão entre os resíduos e os valores de biomassa ajustados (a) e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos (b) para o modelo selecionado.	137
Figura 5.34 – Mapa de espalhamento de Moran dos resíduos do modelo selecionado. As zonas indicam quatro regimes espaciais: Q1 e Q2 indicam áreas com associação espacial positiva, valor positivo e médias locais positivas e valor positivo e média local negativa, respectivamente. As zonas classificadas como Q3 e Q4 são consideradas áreas	

com associação espacial negativa, não seguem o mesmo processo de dependência espacial, indicando pontos de transição entre diferentes padrões espaciais.	139
Figura 5.35 – Biomassa observada e estimada nas oito unidades amostrais inventariadas para a validação, representados pelo intervalo de confiança para a média predita, ao nível de 90%.	142
Figura 5.36 – Mapa de biomassa arbórea acima do solo obtido por intermédio dos atributos selecionados pelo modelo.	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características da imagem SAR adquirida pelo sensor ALOS/PALSAR.	38
Tabela 3.2 – Resumo dos dados meteorológicos registrados na estação de Belterra durante o mês de imageamento.	39
Tabela 3.3 – Valores do Erro Médio Quadrático e do CMAS, ambos em metros, encontrado para a imagem ortorretificada.	45
Tabela 5.1 - Composição da riqueza florística dos três grupos ecológicos formados. H' (índice de Shannon-Weaver).	70
Tabela 5.2 – Coeficiente de correlação de Spearman entre várias variáveis SAR e a fração de abertura do dossel (%) para as unidades amostrais do IF ₂₀₀₇ (n = 35; p < 0,10).	81
Tabela 5.3 – Percentagem média estimada de abertura do dossel (%) e seus respectivos desvios-padrão e número de pontos para a formação do valor médio (n = 35 observações).	84
Tabela 5.4 – Valores referentes a função densidade de probabilidade de von Mises da direção média da diferença de fase HH-VV, de cada fitofisionomia florestal analisada.	93
Tabela 5.5 – Valores da diferença de fase média (direção média) entre HH-VV e o seu desvio padrão circular da média de cada tipologia florestal analisada.	94
Tabela 5.6 – Definição das combinações de polarização, em termos do ângulo de orientação (Ψ) e de elipticidade (χ), em relação ao σ normalizado, para todas as fitofisionomias analisadas.	113
Tabela 5.7 - Valores percentuais dos <i>pixels</i> distribuídos nas zonas do espaço de classificação bidimensional ($H, \bar{\alpha}$), referentes ao IF ₂₀₀₇	117
Tabela 5.8 – Valor p do comparativo das classificações no espaço bidimensional ($H, \bar{\alpha}$) para todas as tipologias analisadas.	118
Tabela 5.9– Valores de correlação linear de Pearson dos atributos incoerentes e os seus respectivos valores p.	123
Tabela 5.10 – <i>Outliers</i> presentes na análise dos diagramas de dispersão referentes as amostras de treinamento (análise gráfica).	125
Tabela 5.11 – Avaliação da presença de <i>outliers</i> , por intermédio da análise dos resíduos padrões e da Distância de Cook, com todas as amostras de treinamento do modelo. ...	127
Tabela 5.12 – Valores de correlação linear de Pearson dos atributos incoerentes e coerentes.	129
Tabela 5.13 - Critérios de avaliação para a construção do modelo, utilizando o Best subsets.	131
Tabela 5.14 – Parâmetros resultantes da regressão gerada para o modelo selecionado.	132
Tabela 5.15 – Fatores de inflação da variância (VIF) do modelo selecionado.	135
Tabela 5.16 – Valores dos dados de validação relativo as oito unidades amostrais inventariadas.	140
Tabela 5.17 – Ajuste do modelo de regressão combinado (amostras de treinamento+validação), totalizando 41 unidades amostrais.	141
Tabela 5.18 – Valores de biomassa arbórea acima do solo das unidades utilizadas para a validação do modelo.	141

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Anisotropia
BMI - Índice de biomassa
CMAS - Circular Map Accuracy Standard
CSI - Índice de estrutura do dossel
DA_i - Densidade absoluta
DAP - Diâmetro a altura do peito
DoA_i - Dominância absoluta
DoR_i - Dominância relativa
DR_i - Densidade relativa
FA_i - Frequência absoluta
FEM - Floresta com exploração madeireira
FP - Floresta primária
FR_i - Frequência relativa
GCP - *Ground control point*
H - Entropia
H' - Índice de Shannon-Weaver
HC - Altura comercial
HT - Altura total
ICP - Independent Check Point
IVI - Índice de valor de importância
J - Índice de equabilidade de Pielou
P_d - Componente de espalhamento *double bounce*
PPD - *Polarimetric phase difference*
P_s - Componente de espalhamento superficial
P_T - Potência total
P_v - Componente de espalhamento volumétrico
R_c - Razão de polarização cruzada
R_p - Razão de polarização paralela
SAR - *Synthetic Aperture Radar*
SSA - Sucessão secundária avançada
SSI - Sucessão secundária inicial
SSInt - Sucessão secundária intermediária

VSI - Índice de espalhamento volumétrico

α_s - Magnitude de Touzi

γ - Coerência polarimétrica

$\Delta\varphi$ - Diferença de fase HH-VV

σ - Seção transversal

σ° - Coeficiente de retroespalhamento

τm - Ângulo de helicidade

χ - Ângulo de elipticidade

ψ - Ângulo de orientação

ψ_i - Ângulo de orientação de Touzi

$\Phi\alpha_s$ - Fase de Touzi

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Estabelecimento do problema	2
1.2	Contribuição científica	3
1.3	Hipótese	4
1.4	Objetivos	4
2	REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1	Conceitos de ondas polarizadas	7
2.2	Decomposição de alvos	12
2.3	Atributos polarimétricos selecionados para a análise exploratória	23
2.3.1	Síntese de polarização e respostas polarimétricas	23
2.3.2	Diferença de fase HH-VV	26
3	CONSTRUÇÃO E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS	29
3.1	Caracterização da área de estudo	29
3.2	Aquisição e tratamento dos dados de campo	31
3.2.1	Dados do inventário florestal de 2005 (IF ₂₀₀₅)	31
3.2.2	Dados do inventário florestal de 2007 (IF ₂₀₀₇)	32
3.3	Aquisição e formato dos dados de radar	38
3.3.1	Descrição dos atributos PolSAR	46
a)	Atributos incoerentes	46
b)	Atributos coerentes	48
4	MÉTODOS DE ANÁLISE	53
4.1	Florística e estrutura	53
4.1.1	Caracterização do povoamento florestal	53
4.1.2	Caracterização das unidades amostrais	54
4.2	Análise exploratória dos dados ALOS/PALSAR	55
4.3	Modelagem de biomassa arbórea acima do solo	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1	Caracterização da Cobertura Florestal	63
5.2	Caracterização das unidades amostrais	67
5.2.1	Análise Florística	67
5.2.2	Análise Estrutural	71
5.3	Análise exploratória dos dados PolSAR	81
5.3.1	Relação entre o espalhamento e a fração de abertura do dossel (%)	81
5.3.2	Determinação dos mecanismos de espalhamento das tipologias analisadas	87
5.4	Modelagem da biomassa arbórea acima do solo	118
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	145
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
	APÊNDICE A	159

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira possui um terço das florestas tropicais em nível mundial, que historicamente vem sofrendo um processo de degradação, decorrente da conversão florestal em extensas áreas de pastagem, implantação de projetos de colonização, atividades de exploração madeireira. Mais recentemente, com a pressão de novas terras para incorporação no sistema produtivo agrícola do país, há uma ocupação acelerada, sobretudo nas zonas de transição entre os domínios da floresta tropical Amazônica e dos Cerrados, muitas vezes em ciclos consoantes com políticas públicas fomentadas por órgãos governamentais de financiamento.

Entretanto, face à uma pressão ambientalista, algumas atividades voltadas ao manejo florestal e ao contexto extrativista comunitário e outras, com foco na produção madeireira de origem legal, têm se expandido nos últimos anos, sendo importante alternativa no cenário do desenvolvimento amazônico, palco de intensa exploração predatória dos recursos naturais.

As iniciativas de fiscalização do vasto território da Amazônia legal geraram algumas iniciativas governamentais, como o PRODES (Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite), realizado desde o ano de 1988 para a detecção exclusiva de corte raso e atualmente o DETER (Detecção de desmatamento em tempo real), realizado desde 2004 com o intuito de monitorar áreas de corte raso e sujeitas a degradação progressiva (INPE, 2010). Estas duas iniciativas servem como suporte à fiscalização e ao controle do desmatamento. Entretanto, estes dois programas possuem limitações referentes ao tipo de sensor utilizado (óptico) sujeito a constante cobertura de nuvens em grandes áreas e também à sua resolução espacial, não podendo detectar polígonos de dimensões pequenas.

Em face dessas limitações supracitadas e ao avanço dos sensores ativos (radar), principalmente após o lançamento de radares orbitais polarimétricos, com o advento da introdução da fase, estes exercem papel importante no monitoramento, mapeamento e inventário de grandes extensões territoriais já que esta não sofre atenuação do sinal para o cálculo volumétrico e de biomassa em inventários florestais, além de não possuírem limitações em áreas cobertas por nuvens e brumas.

1.1 Estabelecimento do problema

As avaliações florístico-estruturais da tipologia florestal são fundamentais para as etapas de caracterização e mapeamento, permitindo uma análise confiável do seu potencial, subsidiando os planos de preservação/conservação de determinados ecossistemas e do manejo sustentável da floresta. Além disso, permite que na etapa de monitoramento, se possa verificar o tipo, a direção, a intensidade e a extensão da degradação que muitas das áreas vêm sofrendo, quer seja por ações de corte raso, por atividades predatórias de exploração madeireira e mesmo, fruto de incêndios florestais. Tais avaliações também são importantes para o conhecimento acerca das áreas em processo de sucessão secundária, áreas estas abandonadas após um período no processo produtivo agropecuário, ou decorrentes de uma exploração madeireira de alto impacto.

Grande parte das informações geradas a respeito da floresta é voltada à identificação de florestas potenciais para a produção sustentável de madeira, considerando a realização de levantamentos baseados na tipologia vegetal, com limite de inclusão > 30 cm (IBGE, 1996). Este método não produz informações confiáveis a respeito de sua estatística, além de abranger apenas florestas com capacidade de produção madeireira, não levando em conta os diversos estádios de regeneração de uma floresta. Portanto, torna-se necessário a avaliação quantitativa para subsidiar o inventário da floresta amazônica, em escala a nível regional.

Na Amazônia brasileira, inúmeras missões de inventário florestal, em nível local, vêm sendo realizadas, muitas delas sem levar em consideração um conhecimento prévio da representatividade das feições tipológicas da cobertura florestal e de sua representatividade espacial perante a vastidão desse ecossistema Amazônico. Essas operações são custosas e de intrincada logística, sobretudo em áreas de difícil acesso. Nesse contexto, os produtos de sensoriamento remoto, sobretudo em nível orbital, são considerados ferramentas fundamentais de informações, orientando a logística espacial de representatividade fisionômico-estrutural da cobertura florestal a ser estudada, ajudando dessa forma as tarefas dos inventários convencionais.

A utilização de dados de radar de abertura sintética (SAR - Synthetic Aperture Radar) é considerada altamente vantajosa, pois há restrições impostas no imageamento óptico, sobretudo pela constante presença de neblina, fumaça e nuvens, principalmente em regiões tropicais onde se deseja efetuar estudos de inventário e monitoramento florestal. O fato das microondas penetrarem nas nuvens garante uma constância na obtenção de

dados, além de ser independente do Sol como fonte de iluminação a coloca como vantagem adicional a possibilidade de aquisição de dados à noite (VAN DER SANDEN, 1997; WOODHOUSE, 2006).

Apesar de alguns trabalhos terem investigado de forma pioneira a interação do sinal de radar com a estrutura florestal, esta foi realizada na maior parte dos casos em florestas de menor diversidade florístico-estrutural, como florestas de coníferas, florestas mistas, plantios comerciais de espécies de interesse comercial, entre outros. O entendimento desta interação do sinal-radar com a estrutura fisionômico-estrutural complexa das florestas tropicais ainda é pouco estudada. podendo-se citar como recente o trabalho de Santos et al. (2009). Assim, torna-se necessário a continuação de estudos aprofundados que permitam entender o relacionamento das informações geradas por estes sensores com as informações acerca das variações estruturais dessas florestas.

1.2 Contribuição científica

Estudos que abordam a questão da utilização de dados polarimétricos voltados para a quantificação da produção florestal, mas especificamente para a modelagem volumétrica e de biomassa florestal vem sendo abordados desde a década de 90 (DOBSON et al., 1995; SANTOS et al., 2002; SANTOS et al., 2003; SAATCHI et al., 2007; COLLINS et al., 2009). Especificamente, a modelagem de biomassa tem exercido papel de fundamental importância em estudos de mudanças globais, pois é considerado um parâmetro importante para os modelos de estimativa de fluxo de carbono (BROWN et al., 1993). Porém, poucos são os estudos voltados ao entendimento dos mecanismos de espalhamento e relacionados com a complexidade estrutural da tipologia florestal (HOEKMAN e QUIÑONES, 2000; 2002; WATANABE et al., 2006; SANTOS et al., 2009; NARVAES et al., 2010). Watanabe et al. (2006) conduziu, em plantios de coníferas, uma abordagem voltada à determinação dos mecanismos de espalhamento presentes na floresta, relacionando dados SAR (banda L) com as características estruturais da vegetação, o mesmo fazendo Gonçalves (2007) e Santos et al. (2009), em áreas de floresta tropical, de maior complexidade horizontal e vertical em sua constituição fisionômica. O aspecto cronológico e do desenvolvimento das técnicas de tratamento dos dados de radar vêm evoluindo ao longo das décadas, pois os trabalhos pioneiros utilizavam apenas parâmetros relacionados a medidas de potência do radar, tais como a amplitude, e alguns atributos derivados destes em estudos voltados ao entendimento das variáveis biofísicas da cobertura florestal. Entretanto, com o advento

da polarimetria, a qual agrega a informação de fase, alguns trabalhos pioneiros foram realizados, porém não levando em conta a complexidade estrutural de ambientes florestais heterogêneos do ponto de vista florístico-estrutural. Em vista do que foi exposto, essa tese tem como contribuição principal a avaliação do potencial de uma ampla gama de atributos PolSAR, em banda L, para estimativa de biomassa arbórea acima do solo de florestas primárias, florestas com exploração madeireira e de diferentes estágios de sucessão secundária.

1.3 Hipótese

Dado a complexidade estrutural das florestas tropicais, este estudo está baseado em duas hipóteses consideradas centrais:

- Os dados ALOS/PALSAR podem ser utilizados para explicar os mecanismos de espalhamento que regem as diferenças estruturais de florestas primárias, florestas com exploração madeireira e de estágios de sucessão secundária;
- Os dados ALOS/PALSAR podem ser utilizados na quantificação da biomassa florestal a serem avaliados na região tropical, com acurácia compatível àquela obtida em inventários florestais regionais.

Para verificar estas hipóteses, foi conduzido um experimento científico na área de influência da Floresta Nacional do Tapajós (Estado do Pará).

1.4 Objetivos

Esta tese tem como objetivo geral avaliar o potencial de dados PolSAR L (ALOS/PALSAR) para análise da dependência da estrutura florestal no entendimento da interação do sinal de radar-alvo e para a modelagem da estimativa da biomassa florestal. Essa linha de pesquisa está baseada na análise de sensibilidade destes dados de radar às variações florístico-estruturais da tipologia florestal primária e inclusive, aquelas submetidas à diferentes intervenções antrópicas.

Como forma de atingir ao objetivo geral, este trabalho contemplará a realização dos objetivos específicos a seguir:

- Aplicação de técnicas de análise quantitativa com o intuito de conhecer os aspectos florístico-estruturais das fitofisionomias florestais, bem como a distribuição de biomassa arbórea acima do solo, por intermédio de informações decorrentes do inventário florestal realizado a campo;

- Descrever as diferentes fitofisionomias por intermédio da avaliação qualitativa dos dados de inventário, relacionando-os com informações geradas na interação sinal de radar e alvo, com base na estrutura florestal, grau de cobertura, composição florística e variabilidade da paisagem;
- Extrair informação de uma série de atributos polarimétricos SAR e estudar suas respostas frente às variações das características florístico-estruturais nas diferentes fitofisionomias;
- Construção e validação de modelo preditivo para a quantificação da biomassa arbórea acima do solo, por meio do emprego de métodos estatísticos multivariados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para o entendimento do tema da tese, é necessário introduzir alguns conceitos sobre a polarimetria SAR e de técnicas de classificação oriundas da decomposição de alvos, como descrito a seguir:

2.1 Conceitos de ondas polarizadas

A resposta polarimétrica de determinados alvos, bem como a caracterização do mecanismo de espalhamento dominante na cena, são regidas pelas diferentes características do alvo e pelas peculiaridades do sensor de microondas utilizado (frequência, ângulo de incidência, entre outros...), e são obtidos por meio de diferentes polarizações do radar imageador.

A forma e a posição em que a onda eletromagnética percorre uma direção conhecida é, comumente, chamada de polarização. O seu estado é descrito como um conjunto arbitrário de eixos utilizados para descrever ondas polarizadas horizontalmente na direção x (polarização H) e na direção y (polarização V) ao longo do plano de propagação da onda (z), o qual corresponde à direção de apontamento da antena (Figura 2.1). Por convenção, a direção de polarização é descrita pelo vetor campo elétrico, ao invés do campo magnético.

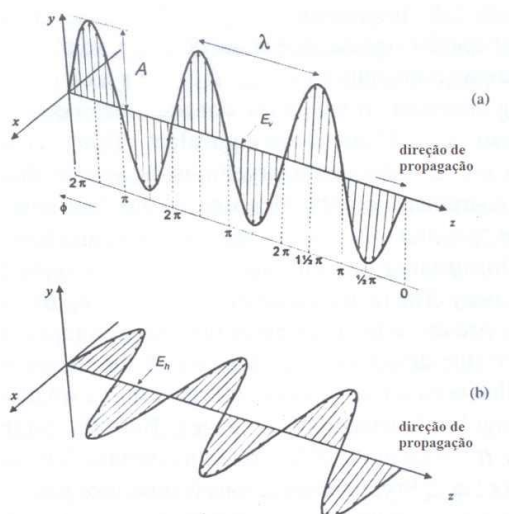


Figura 2.1 – Quando a componente do campo elétrico E na direção x é zero, $E_x = 0$, há somente oscilação do vetor campo elétrico na direção y , e a onda é dita como sendo verticalmente polarizada (a). Similarmente, quando a componente E na direção y é zero, $E_y = 0$, há somente oscilação do vetor campo elétrico na direção x , e a onda é dita como sendo horizontalmente polarizada (b).

Fonte: Modificada de van der Sanden (1997).

Sendo assim, quatro tipos de polarização são obtidos: HH para a transmissão e recepção no plano horizontal; VV para a transmissão e recepção no plano vertical; HV para a

transmissão no plano horizontal e recepção no plano vertical; e finalmente, VH para a transmissão no plano vertical e recepção na horizontal. Ulaby e Elachi (1990) e Henderson e Lewis (1998) discutem como o campo elétrico de uma onda irradiada eletromagneticamente pode ser matematicamente representada por uma elipse de polarização. Esta elipse (Figura 2.2) é descrita por intermédio de três parâmetros geométricos: o ângulo de orientação ($-90^\circ < \psi < +90^\circ$), o ângulo de elipticidade ($+45^\circ > \chi > -45^\circ$) e a amplitude (A). O fator de achatamento da elipse é dado pelo ângulo χ , havendo uma polarização linear quando $\chi = 0$; a polarização circular à esquerda e à direita ocorre quando $\chi = -45^\circ$ e $\chi = +45^\circ$, respectivamente. Na condição de $\chi = 0^\circ$ e $\psi = 0^\circ$ ocorre a polarização horizontal e na $\chi = 0^\circ$ e $\psi \pm 90^\circ$ polarização vertical. O analista que irá discutir a elipse de polarização baseado em algumas referências da literatura, deve prestar atenção na escala de representação a partir do eixo de orientação, porque a plotagem gráfica é representada de duas formas distintas: uma delas com a potência de polarização variando entre 0° e 180° ; e a outra, variando de -90° a $+90^\circ$. Essas variações na representação podem conduzir a um erro de interpretação.

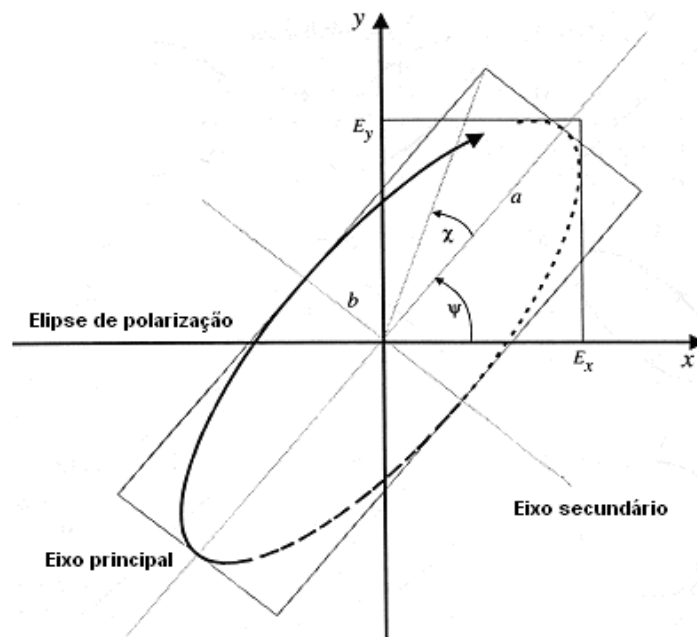


Figura 2.2 - Padrão de polarização no plano x-y, ângulo de rotação ψ , ângulo de elipticidade χ e ângulo auxiliar α . A dimensão da elipse é governada pelos valores máximos das componentes horizontal e vertical do campo elétrico.

Fonte: Woodhouse (2006).

É importante comentar que a descrição da polarização da onda pode ser diferente de acordo com a convenção considerada. No sistema “Forward Scattering Alignment (FSA), o eixo de propagação da onda muda de direção após a interação com o alvo (este caso representa as ondas espalhadas por alvos florestais). No sistema “Back Scattering

Alignment” (BSA) o eixo x e y mantêm a mesma direção, e o eixo de propagação da onda (z) é considerado paralelo, com a vantagem de algumas simplificações matemáticas em como os dados são descritos (WOODHOUSE, 2006) (Figura 2.3). Desta forma, o sistema de coordenadas parece não influenciar a natureza de polarização, mas apenas a maneira como os dados são descritos.

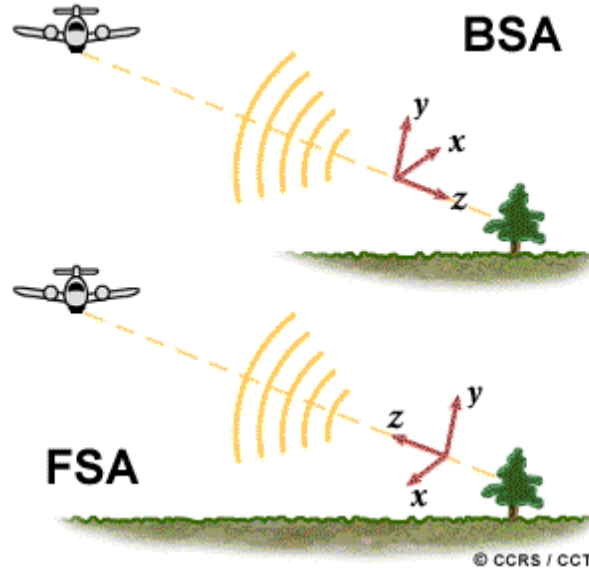


Figura 2.3 - Sistema de convenções FSA “Forward Scattering Alignment” e BSA “Back Scattering Alignment”.

Fonte: Modificada de CCRS (2001).

Existem outras formas de representar o estado de polarização. A primeira é a representação gráfica com a esfera de Poincaré (ULABY e ELACHI, 1990); onde a polarização circular à direita e à esquerda é representada pelos pólos norte e sul, respectivamente, e os estados de polarização intermediários são localizados nas regiões entre os pólos (Figura 2.4). Nesta representação os meridianos correspondem a diferentes ângulos de inclinação do eixo de maior elipse ($\psi = 0$) e os paralelos à elipticidade do campo elétrico ($\chi = \arctan(-B/A)$).

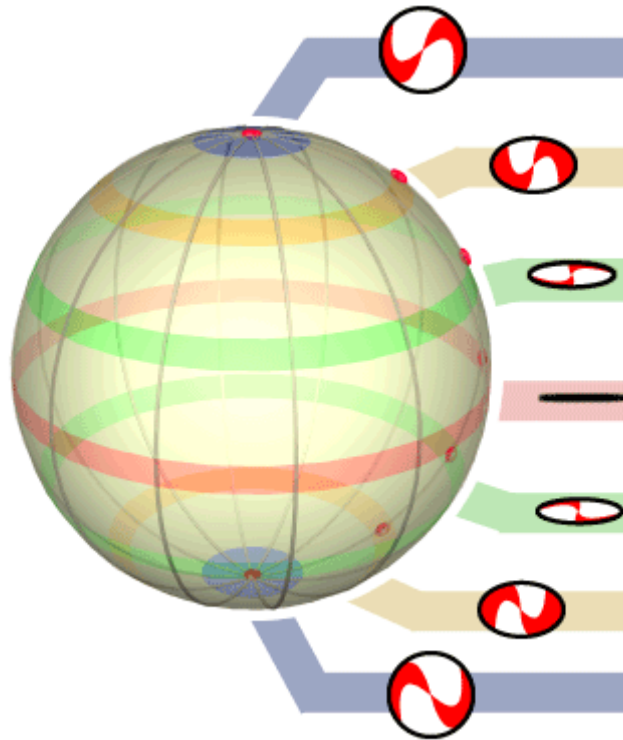


Figura 2.4 - Representação gráfica com a Esfera de Poincaré, indicando os estados de polarização e seus estados intermediários entre os pólos.
 Fonte: CCRS (2001).

Outra forma de representação matemática do estado de polarização da onda é através do vetor de Jones, em que os dados recebidos no modo complexo de cada pulso emitido, após a interação da onda com um alvo, são demodulados na forma de *in fase* (In) e *Quadratura* (Q) e convertido para o formato digital. Esta representação matemática é importante porque há uma relação direta com a elipse de polarização (VAN DER SANDEN, 1997; WOODHOUSE, 2006).

Há ainda uma quarta maneira de representar a polarização de uma onda por intermédio do vetor de Stokes, onde as ondas polarizadas podem ser caracterizadas por quatro parâmetros reais e mensuráveis, com a mesma dimensão física, porém apenas três são independentes e descrevem o estado de polarização como:

$$I_0^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \tag{2.1}$$

onde: Q = é a tendência mais vertical (Q > 0) ou polarização horizontal (Q < 0);

U = expressão da tendência a ser polarizada a +45° (U > 0) e -45° (U < 0);

V = polarização referente a regra da mão direita (V < 0) e da mão esquerda (V > 0).

Os parâmetros U e V são muitas vezes referidos como sendo co-variâncias em fase (real) e quadratura (imaginário), respectivamente entre os componentes do campo horizontal e vertical da onda (WOODHOUSE, 2006). Esta expressão é aplicada a ondas completamente polarizadas (amplitude e fase são invariantes no tempo). Além disso, o vetor de Stokes tem uma relação direta com a esfera de Poincaré, pois o seu raio corresponde ao parâmetro I_0 de Stokes (WOODHOUSE, 2006).

É importante mencionar que os primeiros radares imageadores conhecidos como “convencionais” registravam apenas a informação de amplitude do campo elétrico das componentes x e y, por exemplo, a magnitude máxima do campo elétrico de uma onda como um indicador mensurável de dimensão (VAN DER SANDEN, 1997). A amplitude leva em consideração a textura e o brilho da imagem, influenciada pela rugosidade da superfície (macro, meso e micro-escalas) e pela constante dielétrica (conteúdo de umidade do alvo). Com o avanço da tecnologia, os radares imageadores registram, além da amplitude, a informação de fase (a posição angular δ de um movimento oscilatório de um momento definido em um instante t, como uma função da distância radar-alvo), sendo assim, chamados de radares polarimétricos. Com o desenvolvimento de radares polarimétricos é possível identificar os mecanismos de espalhamento ocorrentes na cena imageada, pois com a inclusão da fase tornou-se possível a determinação destes mecanismos.

Para melhorar o conhecimento do processo de interação das microondas com certos alvos, é necessário entender os tipos de espalhadores envolvidos. Os espalhadores determinísticos, também chamados de coerentes ou alvos pontuais, são aqueles em que na interação com as ondas eletromagnéticas refletem ondas completamente polarizadas, preservando a polarização da onda incidente (ESA, 2005a). Exemplos disto são os alvos urbanos. Os alvos não determinísticos, também conhecidos como alvos incoerentes, distribuído ou aleatório, são aqueles que têm mais de um centro de espalhamento, onde o sinal medido é uma sobreposição de uma grande quantidade de ondas com polarização variável (ESA, 2005a). Este é o caso dos alvos florestais.

A mudança do estado de polarização é conhecida como despolarização, causada principalmente pelo espalhamento múltiplo devido à rugosidade da superfície e a interação volumétrica com o alvo. Além disso, há uma reflexão quase que especular em superfícies lisas, cujo conceito físico e suas representações serão apresentados a seguir, quando se considera a teoria de decomposição do alvo.

2.2 Decomposição de alvos

Na imagem polarimétrica os elementos S_{pq} são números complexos que descrevem a amplitude e a fase da onda transmitida (p) e recebida (q) e são consequência do retroespalhamento de cada célula de resolução (S_{HH} , S_{HV} , S_{VH} , S_{VV}), representada por uma matriz de espalhamento $[S]$ o qual, de acordo com Ulaby e Elachi (1990) é dada por:

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{VV} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{HH} \end{pmatrix} \quad 2.2$$

Esta matriz de espalhamento $[S]$ descreve como os espalhadores transformam as componentes do campo elétrico incidente (E^i) no campo elétrico espalhado (E^s), e é aplicado a alvos determinísticos (coerentes) (WOODHOUSE, 2006).

$$\begin{pmatrix} E_v^s \\ E_h^s \end{pmatrix} = \frac{e^{-ik_0 r}}{R} \begin{pmatrix} S_{VV} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{HH} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_v^i \\ E_h^i \end{pmatrix} \quad 2.3$$

onde: R é a distância da antena ao alvo e $k_0 = 2\pi / \lambda$

Os alvos não determinísticos (incoerentes) são representados por matrizes de segunda ordem. Quando a polarização da onda eletromagnética é representada pelo vetor de Stokes modificado, a relação entre a polarização do campo elétrico incidente F^i e o campo elétrico espalhado F^s é dado pela matriz de Müller $[K]$ (ou matriz de Stokes) no sistema FSA, ou também pela matriz de Kennaugh $[K]$ no sistema BSA (WOODHOUSE, 2006), de acordo com as equações abaixo:

$$\langle \bar{F}^s \rangle = \frac{1}{r^2} [M] \langle \bar{F}^i \rangle \quad 2.4$$

$$\langle \bar{F}^s \rangle = \frac{1}{r^2} [K] \langle \bar{F}^i \rangle \quad 2.5$$

Além dessas matrizes, o espalhamento de alvos não-determinísticos pode ser representado, de acordo com Cloude e Pottier (1996), pelas matrizes de potência de covariância $[C]$ e coerência $[T]$, desde que os pixels da imagem de radar contenham muitos espalhadores. A matriz de covariância $[C]$ é gerada pela multiplicação do vetor-alvo (Kennaugh), pelo seu conjugado complexo.

$$C = \langle \vec{K}_c \vec{K}_c^{*T} \rangle \quad 2.6$$

onde: $(...)^*T$ e $\langle \dots \rangle$ denota o conjugado transposto e a esperança matemática e $\vec{k}_c = (S_{hh}, \sqrt{2}S_{hv}, S_{vv})^T$. Esta equação é mais bem descrita abaixo (Equação 2.7).

$$C = K \cdot K^{*T} = \begin{bmatrix} S_{VV} \\ S_{HH} \\ S_{HV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{VV}^* & S_{HH}^* & S_{HV}^* \end{bmatrix} \quad 2.7$$

$$= \left\langle \begin{bmatrix} |S_{VV}|^2 & S_{VV}S_{HH}^* & S_{VV}S_{HV}^* \\ S_{HH}S_{VV}^* & |S_{HH}|^2 & S_{HH}S_{HV}^* \\ S_{HV}S_{VV}^* & S_{HV}S_{HH}^* & |S_{HV}|^2 \end{bmatrix} \right\rangle$$

De acordo com Touzi et al., (2004), a matriz de covariância (que é hermitiana, positiva e semi-definida) tem precisamente os mesmos elementos das matrizes de Muller e Kennaugh, mas com outro arranjo.

Quando se está trabalhando com o valor médio dos mecanismos de espalhamento de uma janela pré-definida de uma cena imageada, a caracterização dos alvos pela potência de polarização é uma consequência de uma média espacial (normalmente de pixels), e esta operação é chamada de processamento multi-look.

Para a definição da matriz de coerência [T], utiliza-se o mesmo procedimento anterior, com a diferença do vetor de espalhamento (\vec{K}_p) ser escrito com as matrizes da base de Pauli. Este vetor, em alguns casos, é preferido devido seus elementos terem uma interpretação física, ou seja, estão relacionados às propriedades físicas e geométricas dos processos de espalhamento (*odd bounce*, *even bounce*, difuso, etc) (CLOUDE e POTTIER, 1996), dado por:

$$\vec{K}_p = 1/\sqrt{2}[(S_{hh} + S_{vv})(S_{hh} - S_{vv})(S_{hv} + S_{vh})(S_{hv} - S_{vh})]^T \quad 2.8$$

$$[T] = \langle \vec{K}_p \cdot \vec{K}_p^{*T} \rangle \quad 2.9$$

onde: \vec{K}_p é o vetor de espalhamento escrito na base de Pauli (ESA, 2005b).

As matrizes [C] e [T] contêm a mesma informação sobre amplitude, fase e correlações, além dos autovalores serem reais e similares. Complementarmente, as matrizes [M], [K], [C] e [T] são linearmente relacionadas entre si e há métodos formais de transformação entre elas (WOODHOUSE, 2006).

As decomposições conhecidas para modelar a natureza dos alvos coerentes (representados pela matriz [S]) são as de Pauli, Krogager (SHD), Cameron e Hyunen

(TOUZI et al., 2004; ZHANG et al., 2008), mas eles estão além do escopo de discussão neste capítulo.

Para alvos não-determinísticos (representados pelas matrizes de segunda ordem) há atualmente três tipos de técnicas de decomposição polarimétrica implementadas na maioria dos *softwares*, os quais são utilizados para a discriminação do tipo de espalhamento de alvos florestais: decomposições de Freeman-Durden (1998), Cloude-Pottier (1996) e Touzi (2007).

A decomposição de Freeman-Durden modela a matriz $[C]$ como uma contribuição do espalhamento superficial (*fs*), *double-bounce* (*fd*), e do tipo volumétrico (*fv*) onde cada tipo de contribuição é representado por um alvo teórico, relacionado ao respectivo tipo de espalhamento ocorrente na floresta (FREEMAN e DURDEN, 1998) (Figura 2.5).

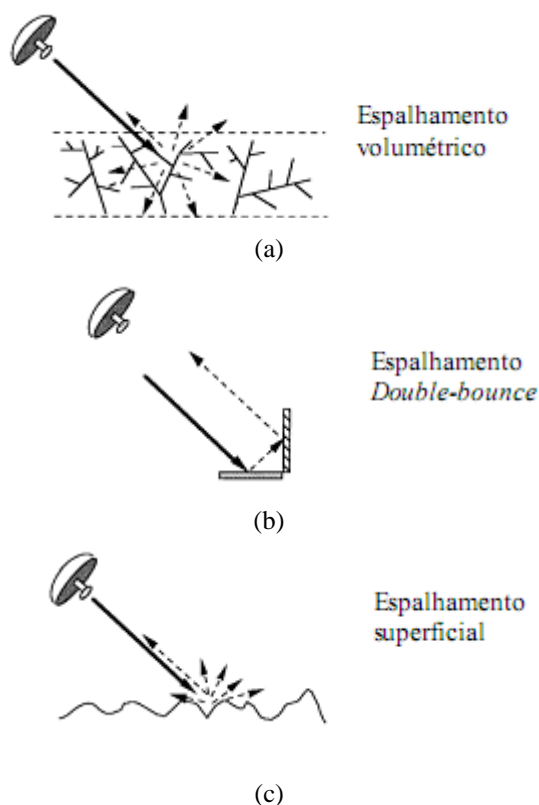


Figura 2.5 - Desenho esquemático dos tipos de contribuição modelados pela decomposição de Freeman-Durden. Espalhamento do tipo volumétrico (a); espalhamento do tipo double bounce (b) e superficial (c).

Fonte: Modificada de Freeman e Durden (1998).

Para o espalhamento volumétrico, é suposto que o retroespalhamento é simulado como uma nuvem de dipolos aleatoriamente orientados, muito finos e espalhadores do tipo cilindro (LI-WEN et al., 2007) (Figura 2.5a); as condições de *double-bounce* são modeladas pelo espalhamento de um refletor de canto do tipo diedro (Figura 2.5b); e o

espalhamento superficial é derivado pelo modelo de primeira ordem do tipo Bragg (Figura 2.5c). De acordo com Freeman e Durden (1998), a contribuição do espalhamento é obtida pelas seguintes expressões:

$$\langle |S_{hh}|^2 \rangle = fs|\beta|^2 + fd|\alpha|^2 + fv \quad 2.10$$

$$\langle |S_{vv}|^2 \rangle = fs + fd + fv \quad 2.11$$

$$\langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle = fs\beta + fd\alpha + fv/3 \quad 2.12$$

$$\langle |S_{hv}|^2 \rangle = fv/3 \quad 2.13$$

O modelo de espalhamento de três componentes baseado na matriz de covariância tem sido aplicado para decompor imagens SAR polarimétricas, sob condição de simetria de reflexão (ZHANG et al., 2008):

$$\langle S_{hh}S_{hv}^* \rangle = \langle S_{hv}S_{vv}^* \rangle = 0. \quad 2.14$$

onde: fv, fd e fs são as contribuições da potência P na polarização do volume, diedro e espalhamento de superfície, respectivamente. Os coeficientes α e β são os parâmetros que podem ser estimados de algumas variáveis biofísicas da floresta, tais como diâmetro e a densidade de árvores.

Definindo-se o tipo de contribuição de espalhamento predominante, por intermédio da parte real da imagem $Re(S_{HH}S_{VV}^*)$ (Equação 2.14), torna-se possível identificar a contribuição de cada mecanismo de espalhamento somente com a polarização do dado SAR, sem qualquer dado de campo (VAN ZYL, 1989).

A decomposição polarimétrica de Cloude e Pottier (1997) é baseada em três parâmetros (entropia, anisotropia e ângulo alfa) definidos em função da decomposição dos autovalores e autovetores da matriz [T]:

$$\langle |T_3| \rangle = \sum_{i=1}^3 [T_{3i}] = \lambda_1(e_1e_1^{*T}) + \lambda_2(e_2e_2^{*T}) + \lambda_3(e_3e_3^{*T}) \quad 2.15$$

onde: λ_i e e_i são respectivamente os autovalores e autovetores da matriz [T].

A entropia (H) é um parâmetro que indica o número de mecanismos dominantes presentes na célula de resolução da cena ($H \sim 0$ = mecanismo de espalhamento único; $0 < H < 1$ = mais de um processo de espalhamento contribui, porém não há clareza de quantos; $H \sim 1$ = combinação de três alvos puros com igual contribuição). Em uma floresta tropical densa, os valores de H são normalmente elevados, indicando uma grande variação do arranjo estrutural devido a diversidade da composição de espécies,

aos diferentes níveis de competição no crescimento, tão bem como a associação interespecífica entre as espécies. Em suma, a entropia representa o grau de aleatoriedade do processo de espalhamento (CLOUDE e POTTIER, 1996), modelada conforme a equação a seguir:

$$H = \sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i) \quad 2.16$$

O ângulo alfa (α) indica o tipo de mecanismo de espalhamento presente na interação da onda com o alvo, onde $\alpha = 0^\circ$ (espalhamento superficial), $\alpha = 45^\circ$ (espalhamento volumétrico) e $\alpha = 90^\circ$ (espalhamento *double bounce*) (Equação 2.17).

$$\bar{\alpha} = \sum p_i \alpha_i \quad 2.17$$

onde:

$$p_i = \lambda_i / \sum_{k=1}^3 \lambda_k, \text{ onde:} \quad 2.18$$

$$\lambda_1 = |HH + VV|^2$$

$$\lambda_2 = |HH - VV|^2$$

$$\lambda_3 = |HV|^2$$

A anisotropia (A) é um parâmetro complementar indicando a importância relativa do λ_2 e λ_3 (Equação 2.19). Quando $H > 0,7$, a anisotropia contribui com informação adicional para caracterizar o alvo. Abaixo deste valor, a anisotropia torna-se ruidosa e com importância limitada. A intensidade destes elementos canônicos identifica a presença de espalhadores primários, secundários e o tipo de espalhamento dominante, conforme pode ser visto na Figura 2.6.

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad 2.19$$

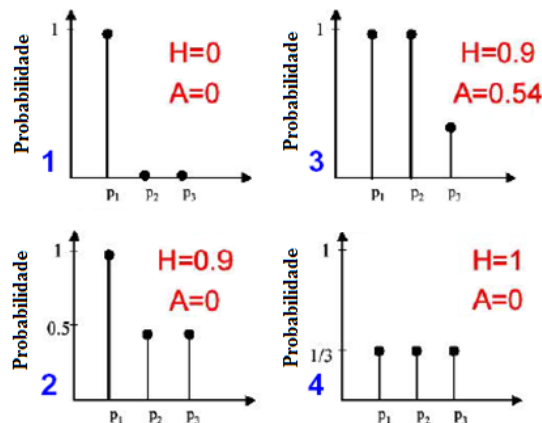


Figura 2.6 – Desenho esquemático da associação entre entropia (H) e anisotropia (A), para quatro configurações diferentes de autovalores.

Fonte: Modificada de ESA (2005b).

A associação dos planos de entropia (H) e ângulo alfa (α) é a forma mais usual e eficiente para melhorar o entendimento dos mecanismos de espalhamento predominantes para os alvos florestais. Neste procedimento de classificação por decomposição de alvos os mecanismos de espalhamento, definidos por Cloude e Pottier (1997), por intermédio do par de componentes H - α , foram plotados com zonas delimitadas (Figura 2.7), cujo espaço de atributos ajudam a definir o tipo dominante de espalhamento: *double bounce*, múltiplo (volumétrico) ou superficial. Tais conceitos que reforçam esta teoria da decomposição de alvos supõem a formação de uma imagem como um processo estocástico, onde uma imagem com um alto valor de entropia ($0.5 > H < 0.9$) apresenta muito mais detalhes.

No processo de classificação por decomposição de alvos supracitado, os mecanismos de espalhamento são definidos em 9 zonas distintas (Figura 2.7), melhores descritas em Lee e Pottier (2009), a saber:

Z1 – Espalhamento múltiplo e alta entropia: nesta região ($H > 0,9$) é ainda possível distinguir mecanismos do tipo *double bounce* em um ambiente com alta entropia. Novamente, tais mecanismos podem ser observados em aplicações florestais ou de vegetação o qual tem galhos e estrutura da copa bem desenvolvida;

Z2 – Espalhamento da vegetação e alta entropia: o espalhamento volumétrico de alta entropia alcança quando $\bar{\alpha} = 45^\circ$ e $H > 0,9$. Isto pode ocorrer devido ao espalhamento direto de uma nuvem de partículas anisotrópicas do tipo agulha (galhos finos) ou do espalhamento múltiplo de uma nuvem de partículas de baixa perda simétrica. Em ambos os casos, no entanto, a entropia H está acima de 0,9, onde a

região viável do plano $H/\bar{\alpha}$ está diminuindo rapidamente. O espalhamento da copa da floresta se encontra nesta região, assim como o espalhamento de alguns tipos de superfícies vegetadas com elementos de espalhamento anisotrópicos altamente aleatórios. O comportamento extremo nesta classe é o ruído aleatório, isto é, sem dependência de polarização, em um ponto localizado na extrema direita da zona 2;

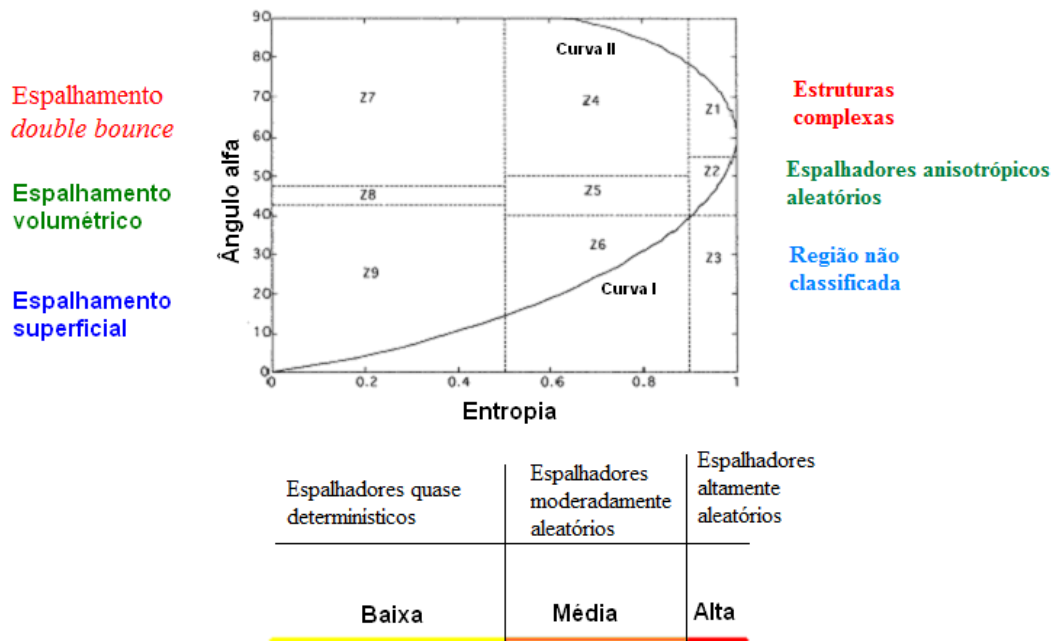


Figura 2.7 - Diagrama de classificação bi-dimensional do plano de entropia (H) e ângulo de orientação (α).

Fonte: Modificada de Lee e Pottier (2009).

Z3 – Espalhamento superficial e alta entropia: esta classe é uma região não classificada no plano $H/\bar{\alpha}$, pois é impossível distinguir espalhamento superficial com entropia $H > 0,9$;

Z4 – Espalhamento múltiplo e média entropia: esta zona leva em consideração o espalhamento do tipo diedro com entropia moderada. Isto ocorre, por exemplo, em aplicações florestais estudadas em bandas L e P, onde os mecanismos do tipo *double bounce* seguindo a propagação através do dossel. O efeito do dossel é aumentar a entropia H do processo de espalhamento. Um segundo processo importante nesta categoria são as áreas urbanas, onde um pacote de centros de espalhamento localizado pode gerar uma entropia moderada com espalhamentos múltiplos dominantes. O limite entre as zonas 4, 5, 6 e 1, 2, 3 é definido como $H = 0,9$. Esta é escolhida em função dos limites superiores para o espalhamento do tipo superficial, volumétrico e tipo diedro antes que distribuições aleatórias sejam aplicadas.

Z5 – Espalhamento da vegetação e média entropia: neste caso há moderada entropia H , mas com um mecanismo de espalhamento do tipo dipolo. O aumento da entropia H é devido a distribuição estatística centralizada do ângulo de orientação. Tal zona inclui o espalhamento oriundo de superfícies vegetadas com espalhadores anisotrópicos e correlação moderada da orientação dos espalhadores;

Z6 – Espalhamento superficial e média entropia: esta zona reflete o aumento na entropia H devido a mudanças na rugosidade da superfície e devido aos efeitos de propagação da copa. Na teoria de espalhamento da superfície, a entropia H de teorias de baixas frequências como o espalhamento do tipo Bragg é zero. De maneira idêntica, a entropia da teoria de altas frequências, como a ótica geométrica, é também zero. No entanto, entre estes dois extremos, há um aumento na entropia H devido a física de propagação de ondas secundárias e mecanismos de espalhamento. Então, como o comprimento rugosidade/correlação muda com a superfície, a entropia H irá aumentar. Além disso, uma cobertura de superfície que compreende espalhadores elipsoidais elípticos (i.e., folhas e discos) gerará uma entropia $0,6 < H < 0,7$.

Z7 – Eventos de espalhamento múltiplo e baixa entropia: esta zona corresponde a baixa entropia de eventos de espalhamento do tipo *double*, ou *even bounce*, tais como daqueles fornecidos por espalhadores dielétricos isolados e diédricos metálicos. Estes são caracterizados por valores de $\bar{\alpha}$ maiores de $47,5^\circ$. O limite inferior escolhido para esta zona é ditado pela constante dielétrica esperada dos diedros e pela medida da acurácia do radar;

Z8 – Espalhamento do tipo dipolo e baixa entropia: nesta zona ocorrem os mecanismos de espalhamento fortemente correlacionados os quais tem um grande desequilíbrio entre S_{HH} e S_{VV} em amplitude. Um espalhador do tipo dipolo isolado, quando ocorre nesta zona, seria oriundo da vegetação, fortemente correlacionado com a orientação de elementos de espalhamento anisotrópicos. A amplitude desta zona é determinada pela capacidade do radar para medir a razão S_{HH}/S_{VV} , isto é, sobre a qualidade de calibração;

Z9 – Espalhamento superficial e baixa entropia: nesta zona ocorrem os processos de baixa entropia com valores de $\bar{\alpha}$ menores do que $42,5^\circ$. Estes incluem o espalhamento superficial sob a GO (ótica geométrica), a PO (ótica física) - espalhamento do tipo Bragg - e o fenômeno especular, o qual não envolve inversões

de fase entre S_{HH} e S_{VV} . Superfícies físicas tais como a água nas bandas L e P, gelo marinho na banda L, tão bem como superfícies muito planas, todos se enquadram nesta categoria.

Com a partição dos planos entropia e ângulo alfa em várias regiões, o qual determina e rotula a intensidade de cada mecanismo de espalhamento, a zona Z3 está fora das áreas de representação das curvas I e II (Figura 2.7), e por isso é uma região inviável (não classificada) (HAJNSEK et al., 2003), pois os sistemas SAR polarimétricos não são capazes de discriminar altos valores de entropia ($H > 0.9$). As curvas I e II representam as fronteiras de valores com ângulo alfa com máximo e mínimo observáveis, como uma função da entropia, cujos limites são determinados pela variação do plano H- α oriundo da matriz de coerência com a decomposição dos menores autovalores com amplitude m ($0 \leq m \leq 1$) (CLOUDE e POTTIER, 1997).

Na decomposição de Cloude e Pottier a representação individual do tipo de espalhamento para cada autovetor da matriz de coerência do alvo, é utilizada um modelo conhecido como α - β (CLOUDE e POTTIER, 1996; 1997), a qual expressa o vetor de espalhamento do alvo \vec{K} em termos de 5 parâmetros, sob suposição de reciprocidade:

$$\vec{e}_T^{\alpha-\beta} = |\vec{e}_T| \cdot [\cos \alpha \cdot e^{j\Phi_1}, \sin \alpha \cos \beta e^{j\Phi_2}, \sin \alpha \sin \beta e^{j\Phi_3}]^T \quad 2.20$$

Os parâmetros α , β , Φ_i ($i = 1,3$), referem-se respectivamente ao tipo de espalhamento, o ângulo de orientação do alvo (também utilizado para medir o ângulo de inclinação do alvo) e os ângulos fase-alvo.

Uma das limitações presentes nesta decomposição é que muitas destas aplicações os ângulos Φ_i são ignorados e seus significados físicos ainda não são bem entendidos. Além disso, em determinados tipos de alvos o β não fornece uma medida pura do ângulo de orientação física, induzido pela declividade azimutal do retorno da superfície de espalhamento do terreno (TOUZI, 2007 e TOUZI et al., 2009).

Em adição, segundo os mesmos autores, quando os alvos são assimétricos, β e Φ_i , variam com a rotação do plano de incidência sobre a linha de visada do radar e não são invariantes quanto a mudança da base de polarização.

Para alvos simétricos não há este tipo de problema, já que os parâmetros do modelo do vetor de espalhamento α - β de Cloude-Pottier continuam idênticos. Entretanto, para a

maioria dos casos na natureza (alvos assimétricos), o modelo proposto por Touzi (2007) mantém-se invariante à base de polarização, enquanto que certos parâmetros do modelo α - β variam com o ângulo de orientação.

Com isso, Touzi (2007) introduziu um novo tipo de decomposição de espalhamento do alvo em termos de parâmetros invariantes quanto à mudança da base de rotação do alvo. Para simular o tipo de espalhamento complexo em alvos incoerentes foram introduzidos 2 novos parâmetros: α_s (magnitude de Touzi) e $\Phi\alpha_s$ (fase de Touzi):

$$\tan(\alpha_s). e^{j\Phi\alpha_s} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \quad 2.21$$

onde: μ_1 e μ_2 são os co-autovalores derivados da matriz de espalhamento.

A decomposição de alvos incoerentes invariantes quanto à mudança de base de polarização é fundamentada considerando-se um alvo recíproco, onde a decomposição característica é baseada na matriz de coerência do alvo [T] Hermitiana, semi-definida, positiva e que permite uma representação única de [T]_i como a soma de três matrizes de coerência [T]_i, representando três espalhadores únicos e independentes entre si, cada um ponderado por um autovalor real positivo apropriado λ_i :

$$\langle |T_3| \rangle = \sum_{i=1}^3 \lambda_i [T]_i \quad 2.22$$

onde: cada espalhamento individual é representado pelo autovetor da matriz [T]_i e pode ser expressa como uma função do vetor do alvo \vec{k}_i . como:

$$[T]_i = \vec{K}_i \cdot \vec{K}_i^{*t} \quad 2.23$$

onde: o expoente “*t” denota o conjugado e o transposto do vetor, onde os três vetores de espalhamento do alvo \vec{k}_i . (i= 1,3) denotam, de fato os três autovetores da matriz de coerência 3x3.

Como esboçado por Cloude e Pottier (1997) cada vetor do alvo \vec{k}_i . tem uma equivalente matriz de espalhamento única [S]_i, cujos elementos podem ser derivados de \vec{k}_i ., como segue:

$$\vec{K}_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [(S_{hh})_i + (S_{vv})_i, (S_{hh})_i - (S_{vv})_i, 2(S_{hv})_i] \quad 2.24$$

Cada espalhamento individual i é também caracterizado com o correspondente autovalor real positivo e normalizado $\lambda_i = n_i/(n_1+n_2+n_3)$ o qual é uma medida da energia relativa de cada tipo de espalhamento individual i .

Os outros três parâmetros introduzidos na decomposição de Touzi são o ângulo de orientação ψ , a helicidade τm , e a amplitude máxima m . Estes são derivados da matriz da potência de espalhamento de Graves [G], o qual deriva os parâmetros anteriormente citados de máxima polarização da matriz de Kennaugh-Huynen:

$$[G] = [S].[S]^{*t} \quad 2.25$$

O modelo de espalhamento (vetor de espalhamento (\vec{V}) de Touzi), proposto para resolver os problemas de ambigüidade dos parâmetros, sua variação referente à base de polarização e a linha de visada do radar é dado por:

$$\vec{E}_T^{SV} = m \left| \vec{E}_T \right|_m \cdot \vec{V}, \text{ onde } \vec{V} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_s \cos \chi \\ -j \cos \alpha_s \sin 2\psi \sin \chi + \cos 2\psi \sin \alpha_s e^{j\Phi_{\alpha_s}} \\ -j \cos \alpha_s \cos 2\psi \sin \chi - \sin 2\psi \sin \alpha_s e^{j\Phi_{\alpha_s}} \end{pmatrix} \quad 2.26$$

Em suma, a invariância quanto à mudança da base de polarização para o método de decomposição de alvos incoerentes é aplicada, segundo Touzi (2007) e Touzi et al. (2009) dentro de uma janela móvel computada na matriz de coerência do alvo, após diagonalizando-a e fornecendo os três autovetores e os autovalores correspondentes. Por último, é aplicado o modelo de vetor de espalhamento de Touzi (Equação 2.27) para parametrização dos três autovetores. Por fim, cada autovetor i , o qual corresponde a um espalhador único, é apresentado em termos do modelo do vetor de espalhamento dos parâmetros invariantes à mudança de base de polarização, como segue:

$$ICTD_I = (\lambda_i, m_i, \Psi_i, \tau_{mi}, \alpha_{Si}, \phi_{\alpha Si}) \quad 2.27$$

onde: λ_i = autovalores; m_i = amplitude máxima (fornece o retroespalhamento de polarização máxima proporcionada pela interação radar-alvo); ψ_i = ângulo de orientação (mede o ângulo de rotação aplicado para subtrair o efeito do ângulo de orientação no espalhamento do alvo, fornecendo uma medida intrínseca do ângulo de inclinação do alvo); τ_{mi} = helicidade (permite a medida do grau de simetria de espalhamento do alvo, separando espalhadores simétricos de assimétricos, dado o mesmo tipo de espalhamento α de Cloude); α_{Si} = magnitude (fornece a magnitude do tipo de simetria

referente ao tipo de espalhamento do alvo); e $\Phi_{\alpha_{si}}$ = fase (fornece informação para uma completa caracterização do tipo de espalhamento do alvo).

De acordo com Touzi (2007), a combinação de τ_m com m e ψ conduz a uma classificação completa do máximo retorno do alvo.

2.3 Atributos polarimétricos selecionados para a análise exploratória

2.3.1 Síntese de polarização e respostas polarimétricas

Uma vez interagindo com o alvo, a onda eletromagnética incidente pode ser despolarizada e/ou repolarizada. De acordo com McNairn et al. (2002) despolarização é a mudança no grau de polarização de uma onda totalmente ou parcialmente polarizada, resultando em um aumento (despolarização negativa) ou decréscimo (despolarização positiva) na componente não polarizada da onda. Ondas não polarizadas têm componentes de amplitude iguais e ortogonais e uma diferença de fase relativa aleatória (BOERNER et al., 1998). A despolarização é frequentemente um resultado do espalhamento múltiplo, devido a uma significativa rugosidade da superfície ou espalhamento volumétrico como ocorre na vegetação densa. De acordo com McNairn et al. (2002) estes alvos exibem uma resposta que contém uma grande componente não polarizada. Se o vetor de polarização do componente polarizado da onda também muda, a onda é dita como sendo repolarizada (BOERNER et al., 1998). Conforme Woodhouse (2006) polarizações circulares são descritas em termos do sentido de propagação da onda (*handedness*) relativos ao observador.

O sentido de propagação da polarização da onda é um conceito de difícil entendimento, pois depende do sistema de convenção utilizado para descrever a polarização e da direção do observador (WOODHOUSE, 2006).

O sentido de propagação da onda é registrado de duas formas distintas. A primeira forma, quando a onda é registrada na antena, após a interação com o alvo no sistema de convenção FSA, o sentido de propagação da onda do vetor campo elétrico para uma onda circular descreve uma espiral com um sentido conforme a regra da mão direita, ou seja, neste caso a polarização é dita como sendo circular da mão direita. Neste caso, o vetor campo elétrico descreve um círculo na direção anti-horária, pois o observador está olhando ao longo da direção de propagação da onda. No segundo caso, a mesma onda, viajando através do mesmo plano de referência, descreverá um círculo no sentido

horário observado de outra direção (oposta a direção de propagação da onda). Nesse último caso, é considerado o sistema de observação oposto a direção de propagação.

Como exemplo, quando ocorre um espalhamento direto (single bounce), como uma superfície lisa, o sentido de propagação da onda recebida (relativo ao observador) é oposto da onda transmitida. Assim, a cross-polarização circular (RL) é associada com essas superfícies lisas (EVANS et al., 1988). De forma oposta, as respostas de co-polarização circulares (RR ou LL) são associadas com o espalhamento volumétrico ou múltiplo, e o sentido de propagação da (*handedness*) onda recebida - relativa ao observador – é a mesma que da onda transmitida.

Um aspecto importante para a caracterização de alvos florestais é a síntese de polarização, porque quando a matriz [S] de um alvo é conhecida torna-se possível sintetizar seu retroespalhamento (σ) para qualquer combinação de polarização transmitida e recebida (ULABY e ELACHI, 1990; WOODHOUSE, 2006). Esta é uma vantagem do dado polarimétrico, sintetizado de acordo com as equações 28 e 29:

$$P_{\text{rec}}(\psi_r, \chi_r, \psi_t, \chi_t) = \frac{\kappa}{r^2} |\vec{F}^r \cdot [\mathbf{K}] \cdot \vec{F}^t| \quad 2.28$$

$$\sigma_{\text{r}}(\psi_r, \chi_r, \psi_t, \chi_t) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{P_{\text{r}}^{\text{rec}}}{P_{\text{r}}^{\text{trans}}} \quad 2.29$$

onde: ψ = ângulo de orientação; χ = ângulo de elipticidade; \mathbf{K} = vetor do alvo; r = raio.

Os estados de polarização dos campos elétricos E_v , E_h associados ao retroespalhamento do radar (σ) e a dependência da amplitude com polarização, pode ser representada graficamente como uma função dos ângulos de elipticidade (χ) e orientação (ψ) da onda transmitida, chamado de assinatura de polarização ou resposta de polarização (Figura 2.8). Além disso, as respostas de polarização de um dado pixel é a soma das respostas de polarização de muitos espalhadores individuais (EVANS et al., 1988). Devido a isso, a resposta de polarização captura características de muitos espalhadores do alvo, em todas as polarizações. A forma destas é significativa e podem indicar os mecanismos de espalhamento que dominam a resposta do alvo.

As respostas de polarização, além de poderem ser utilizadas para caracterizar alvos, considerando o conhecimento mais detalhado dos mecanismos que conduzem o espalhamento do sinal de radar com as características intrínsecas do mesmo (VAN ZYL et al., 1987), também podem ser utilizadas para a calibração polarimétrica.

É muito importante ressaltar que a resposta de polarização de certo alvo não é única, uma vez que diferentes combinações dos mecanismos de espalhamento podem fornecer uma configuração similar. Isto pode ser devido a composição estrutural do alvo florestal, tais como a densidade de árvores, distribuição espacial aleatória das árvores, diâmetro do tronco, intensidade e distribuição de galhos e ramos, conteúdo de umidade de folhas e do solo florestal, a constante dielétrica do alvo sob estudo, etc. Além disso, um alvo pode também apresentar comportamento polarimétrico distinto mostrado por suas respostas de polarização, em função de variações de frequência e/ou ângulo de incidência local do radar (VAN ZYL et al., 1987).

Além do que já foi exposto a respeito da forma das respostas de polarização e sua variação segundo várias condicionantes, WOODHOUSE (2006) afirma que se deve ter cuidado com suas interpretações, porque algumas vezes podem surgir algumas confusões devido a inconsistências na rotulação do eixo de orientação, pois em algumas publicações este varia de 0° a 180° e em outras de -90° a 90° (Figura 2.8).

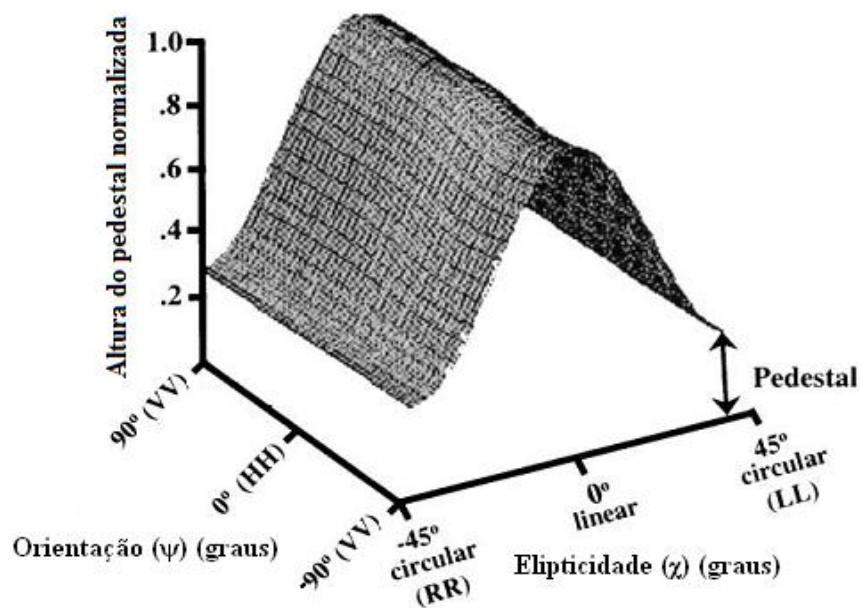


Figura 2.8 - Representação tridimensional da resposta de polarização de um alvo teórico.
Fonte: Modificada de van Zyl et al. (1987).

Outro parâmetro importante à ser avaliado na resposta de polarização paralela é a altura do pedestal, o qual é equivalente a medida da razão entre as polarizações de espalhamento ótimo mínimo e máximo, correspondendo a potência mínima e máxima obtidas com a otimização de todas as polarizações recebidas e transmitidas pela antena. Este parâmetro também é um indicativo da componente não polarizada. Este valor mínimo representa o montante da potência não polarizada no sinal recebido, e desta

forma relacionado com o nível de polarização da onda retroespalhada (CCRS, 2001). Em adição, esta razão segundo Lee e Pottier (2009) é também uma medida da componente não polarizada do retorno médio, e pode ser encontrada pela otimização de todas as polarizações transmitidas com a polarização recebida é igual a polarização transmitida.

Em floresta a altura do pedestal relativamente alta é típica de alvos que são dominados pelo espalhamento volumétrico ou por espalhamento múltiplo (MCNAIRN et al., 2002). Com relação a alvos florestais, Evans et al. (1988) reportam que a altura do pedestal é diretamente proporcional à densidade da vegetação. Porém, em áreas florestais em estágios de sucessão menos desenvolvidos e em áreas onde já existam clareiras, a rugosidade da superfície é importante, pois de acordo com de Matthaeis et al. (1991); Ray et al. (1992) e van Zyl (1989), alturas do pedestal maiores estão relacionadas com o aumento da rugosidade.

Se na interação do sinal do radar com um alvo único, a onda retroespalhada é completamente polarizada, ou se a resposta polarimétrica é calculada de uma medida isolada com um único centro de espalhamento, a altura do pedestal é zero. Todavia, se a resposta de polarização é calculada por uma média de várias amostras, e há espalhadores múltiplos e dissimilares presentes na cena ou se há ruído no sinal recebido, a altura do pedestal será diferente de zero. Assim, a altura do pedestal é também uma medida do número de diferentes tipos de mecanismos de espalhamento encontrados nas amostras. O pedestal da resposta polarimétrica pode ser também uma fonte de informação confiável na caracterização do alvo (MCNAIRN et al., 2002). De fato, o pedestal corresponde à razão da potência extrema recebida, quando as antenas são co-polarizadas ou cross-polarizadas. Portanto, o pedestal fornece informações equivalentes àquelas obtidas com o coeficiente de variação (VAN ZYL et al., 1987). No estudo de Touzi et al. (2004) o coeficiente de variação foi considerado mais eficaz, pois os autores verificaram que este não se limita as co e cross-polarizações, levando em conta todas as polarizações possíveis de ocorrer por ocasião da interação da onda incidente com o alvo.

2.3.2 Diferença de fase HH-VV

Com o intuito de avaliar os mecanismos de espalhamento presentes, a diferença de fase também deve ser considerada, pois representa a diferença de fase entre dois estados de polarização (Equação 2.30). Além disso, a diferença de fase de polarizações lineares é empregada na classificação de um pixel, considerando que este parâmetro caracteriza o

número de saltos (*bounce*) que uma onda eletromagnética experimenta durante a reflexão (CCRS, 2001).

$$\Delta\varphi = \arg (S_{HH}S^*_{VV}) \quad 2.30$$

De acordo com Woodhouse (2006) a fase HH-VV é um parâmetro importante com significado físico relacionado ao número de interações e pode também ser um indicador de efeitos de mudança ou transmissão. Segundo o mesmo autor, a diferença de fase HH-VV é usualmente chamada de diferença de fase polarimétrica, termo esse denominado de acordo com a sigla (PPD – “*polarimetric phase difference*”).

A PPD tem sido utilizada em um número de aplicações para classificar os mecanismos de espalhamento do alvo presente na cena, em que uma PPD com valores próximos a 0° é interpretada como espalhamento médio do tipo direto (*single bounce*) e valores de PPD próximos a 180° é considerado como espalhamento do tipo *double bounce*, que se refere à interação entre duas superfícies adjacentes, mas perpendiculares. Os valores de PPD que se encontram entre estes dois extremos são interpretados como espalhamento múltiplo se a distribuição em toda a gama de ângulos de fase é aproximadamente uniforme (WOODHOUSE, 2006).

Os valores de PPD são importantes devido à sua estreita relação com os mecanismos de espalhamento presentes na floresta, pois de acordo com Evans et al. (1988) os valores intermediários (espalhamento volumétrico) podem ser relacionados com as copas das árvores, pois possuem PPD típica de múltiplas interações ocorrentes em sua estrutura. Adicionalmente, a PPD pode ser resultante de um tempo de atraso quando a velocidade de fase das ondas H e V diferem no interior do alvo.

Hoekman e Quiñones (2000), utilizando dados polarimétricos AIRSAR nas bandas C, L e P, investigaram diferentes combinações de frequência, polarizações, polarimetria, efeitos do ângulo de incidência e do ruído (*speckle*) na classificação de tipos de cobertura vegetal em uma região de floresta tropical na Colômbia. Esses estudos tinham como objetivo subsidiar a definição da configuração mais adequada para futuros SAR orbitais dedicados ao monitoramento de floresta. Uma das observações tiradas deste estudo é a pouca dependência do retroespalhamento com a variação no ângulo de incidência. A descrição estatística dos dados foi baseada na análise do retroespalhamento gama γ , diferença de fase polarimétrica Φ_{hh-vv} e magnitude da

correlação polarimétrica $|\rho|$. Entre as várias combinações de frequência e polarizações testadas, concluíram que a melhor configuração para classificação de tipos de cobertura (floresta primária, floresta secundária, pastagem e solo exposto) e estimação de biomassa, deveria contemplar as bandas P com L ou C. Porém, considerando as limitações operacionais da banda P (sensível ao efeito de Faraday) em plataformas orbitais, uma solução viável seria um sistema operando com as bandas L e C no modo polarimétrico (a classificação alcançou índice Kappa de 0,87).

De forma análoga, esses mesmos autores utilizando a PPD como um dos atributos polarimétricos para a identificação de diferenças entre parâmetros biofísicos encontraram comportamento distinto com relação a variações estruturais da floresta sob diferentes condições de solo, de inundação e de tipologias, evidenciando que a PPD é um atributo importante em estudos florestais. Adicionalmente, nesse estudo os autores comprovaram que houve um decréscimo nos valores de PPD com um aumento do comprimento de onda para o mesmo alvo, pois foram utilizadas as bandas C, L e P.

É importante salientar que a diferença de fase de polarizações cruzadas não é comumente empregada, pois são frequentemente muito aleatórias e há geralmente pequena correlação entre os canais HH e HV (CCRS, 2001).

3 CONSTRUÇÃO E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A Floresta Nacional é definida pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) como sendo uma área com cobertura florestal de espécies predominantemente nativas e que tem como objetivo básico o uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e a pesquisa científica, com ênfase em métodos para exploração sustentável, sendo permitida a permanência de população tradicional existente quando da sua criação, conforme o ICMBio/MMA (http://www4.icmbio.gov.br/flona_tapajos/). Por se tratar de uma área de intensa pesquisa científica, a escolha desta área deveu-se a logística adequada para a coleta de dados e de uma ampla gama de dados de inventário de unidades amostrais anteriormente materializadas – inventário florestal contínuo -, como forma de se comparar as análises subsequentes.

A Floresta Nacional do Tapajós, localizada no Estado do Pará, entre os paralelos de 2^o45' e 4^o 10' S de latitude sul e entre os meridianos de 54^o 45' e 55^o 30' de longitude oeste, limitando-se ao norte com o paralelo que cruza próximo ao quilômetro 50 da rodovia Cuiabá-Santarém (BR-163); ao sul com a rodovia Transamazônica e os rios Cupari e Cuparitinga; a leste com a rodovia BR-163 e a oeste em toda a sua extensão com o Rio Tapajós. A área da FLONA é estimada em aproximadamente 545.000 ha, fazendo parte dos municípios de Belterra, Aveiro, Rurópolis e Placas.

A região do entorno é caracterizada por possuir diferentes usos e cobertura do solo, causada pela forte pressão antrópica, principalmente pelo avanço da agricultura mecanizada e da pecuária extensiva. Sua escolha deve-se, além da conexão com as áreas já inventariadas na região central da FLONA do Tapajós, a uma ampla variação fitofisionômica, decorrente da ação antrópica.

Por conseguinte, selecionou-se para esse trabalho uma área na porção central sob a influência da FLONA Tapajós, situada entre os paralelos 3°23'4,89" e 2°56'45,34"S e os meridianos 54°46',51,57' e 55°5'47,38"W, estendendo-se por uma área aproximada de 109.929 ha (Figura 3.1).

O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Ami – tropical úmido. A temperatura média anual fica em torno de 24,8° C, com variação térmica anual inferior a 5°C, e a umidade relativa do ar é, em média, de 90%. A precipitação média anual é de 2.100 mm, sendo que nos meses de dezembro a maio há maior ocorrência de chuvas e

de julho a agosto uma queda pluviométrica brusca, caracterizando-se um período seco, onde a precipitação é inferior a 60 mm, coletadas da Estação Meteorológica do Ministério da Agricultura, no município de Belterra, ao norte da área experimental (COSTA et al., 2007).

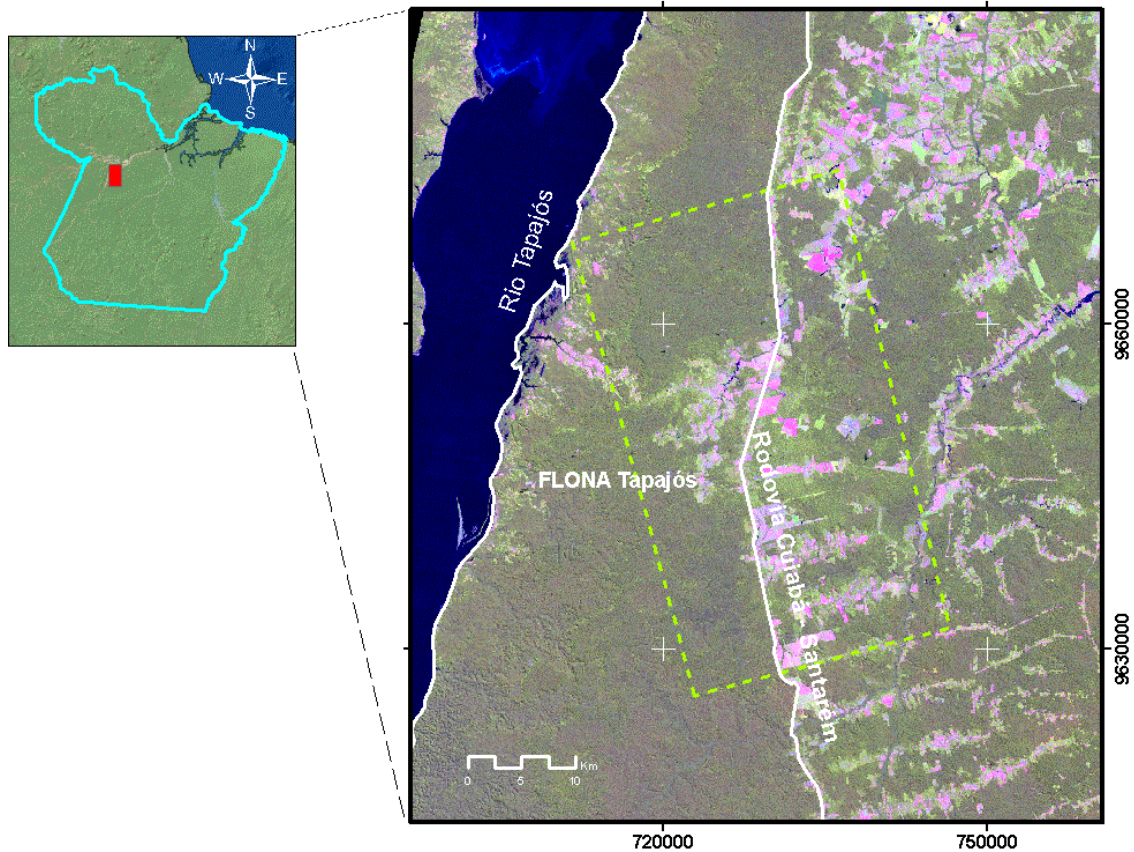


Figura 3.1 - Localização geográfica da FLONA Tapajós, PA, e região de entorno. A linha pontilhada mostra em destaque a área de realização do experimento, plotada em uma imagem Landsat TM (composição R5-G4-B3), obtida em 03/07/2007.

O relevo local se apresenta com topografia de suavemente ondulada a ondulada e é dividido em duas unidades morfoestruturais bem distintas. O primeiro, denominado de Planalto Tapajós-Xingu (cotas altimétricas de 120 a 170 m) e o Planalto Rebaixado do Médio Amazonas (cotas altimétricas de cerca de 100 m). O solo é predominantemente do tipo Latossolo Amarelo Distrófico, associados a este os Argissolos Vermelho-Amarelo, embora em menores proporções (RADAMBRASIL,1976). A verificação do modelo digital de elevação, extraídos SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission* - para a área experimental permitiu verificar que as altitudes variam entre 80 e 200m.

3.2 Aquisição e tratamento dos dados de campo

Foram utilizados dados oriundos de dois inventários florestais neste estudo. A seguir será realizada a descrição metodológica de cada uma, enfatizando sua metodologia e o tratamento a ser aplicado nos dados. É importante salientar que os dados provenientes do Inventário Florestal de 2005 (IF₂₀₀₅), efetuados em florestas sobre regime de exploração madeireira, servirão como complementação para a análise exploratória dos dados PolSAR, com o intuito de melhorar a intensidade amostral desta fitofisionomia, bem como para aumentar o número de observações para a geração da equação de biomassa arbórea acima do solo.

3.2.1 Dados do inventário florestal de 2005 (IF₂₀₀₅)

Este inventário foi conduzido em setembro de 2005 (GONÇALVES, 2007), simultaneamente ao imageamento SAR-R99B, de forma a subsidiar o conhecimento da composição florística e da estrutura florestal na área-piloto de investigação. Nesse estudo citado 6 unidades amostrais de 1 ha (100 x 100m) foram alocadas em áreas que sofreram exploração madeireira de impacto reduzido, na porção norte da FLONA do Tapajós, onde a alocação das unidades amostrais foi delimitada por amostragem aleatória estratificada, conforme pode ser visto com maiores detalhes em Gonçalves (2007). O desenho esquemático da unidade amostral pode ser visto na Figura 3.2.

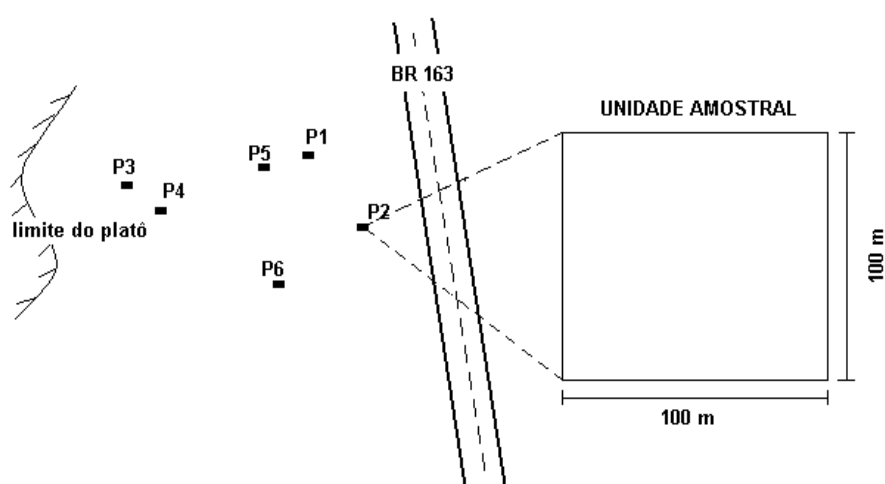


Figura 3.2 - Representação esquemática da amostragem e do tipo de unidade amostral realizado no inventário florestal de 2005. P1 à P6 indicam o número em sequência de unidades amostrais realizadas nesse inventário.

Fonte: Adaptada de Gonçalves (2007).

No interior das unidades amostrais foi realizado um inventário de todos os indivíduos arbóreos com *DAP* maior ou igual a 10 cm. Todas as demais mensurações realizadas no interior destas parcelas seguem a metodologia descrita na secção 3.2.2.

3.2.2 Dados do inventário florestal de 2007 (IF₂₀₀₇)

Este inventário foi conduzido entre agosto e setembro de 2007, de forma a subsidiar o conhecimento da composição florística e da estrutura de florestas primárias, florestas com exploração madeireira e também de diferentes estádios de sucessão ocorrentes na área de estudo.

Com o intuito de avaliar a variabilidade florística e estrutural da área experimental foram estabelecidas pela amostragem de 35 unidades amostrais, com diferentes formas e dimensões, variando desde 500 m² para estádios de sucessão secundária até 10.000 m² (1 ha) para áreas de floresta primária e florestas sob regime de exploração, conforme podem ser vistos na Figura 3.3.

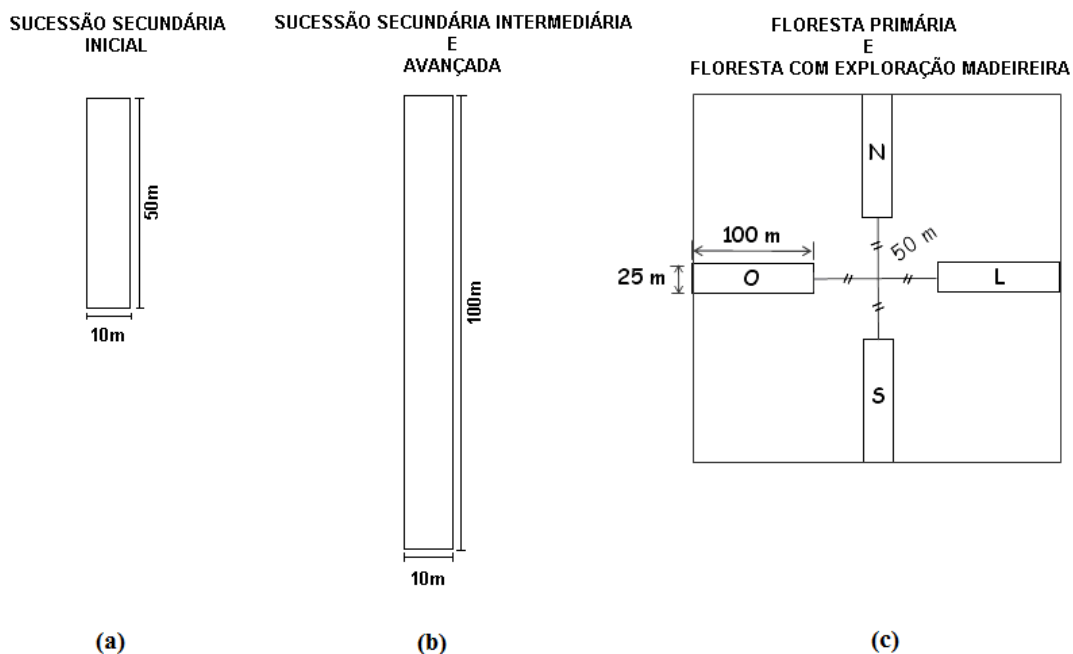


Figura 3.3 - Representação esquemática das unidades amostrais adotadas na área de estudo. (a) unidade básica materializada em áreas de sucessão secundária inicial; (b) unidade básica materializada em áreas de sucessão secundária intermediária e avançada e; (c) unidade básica materializada em áreas de floresta primária e floresta com exploração madeireira, no inventário de 2007 (IF₂₀₀₇).

O estágio de desenvolvimento da regeneração florestal, além de influir na dimensão da unidade amostral também definiu o limite inferior de inclusão dos indivíduos na unidade amostral. No inventário foram mensurados todos os indivíduos arbóreos com diâmetro a altura do peito (*DAP*), medido à altura de 1,30 m, maior ou igual a 10 cm, para as unidades amostrais em sucessão secundária avançada (SSA), florestas com exploração madeireira (FEM) e florestas primárias (FP). Nos estágios de sucessão secundária inicial (SSI) e de sucessão secundária intermediária (SSInt), o limite inferior

de inclusão foi de 5 cm de *DAP*, obtido com fita métrica. Em todos os estádios de sucessão, foram realizadas estimativas visuais da altura comercial (HC) e da altura total (HT), sempre obtida pelo mesmo observador, com o intuito de evitar discrepâncias em suas estimativas. Essas estimativas visuais foram corrigidas por intermédio da Equação 3.3 citada a seguir, cuja modelagem foi feita por GONÇALVES E SANTOS (2008), envolvendo como referência medidas de alturas de árvores com um clinômetro. Adicionalmente, foram adquiridas as coordenadas locais de cada indivíduo, com o uso de uma trena métrica, além da mensuração dos semi-eixos da copa (dimensões *x* e *y*).

Como forma de obter informações adicionais a respeito das tipologias e traçar um paralelo entre a interação do sinal de radar com a floresta, foram efetuados os registros de fotografias hemisféricas de todas as unidades amostrais ($n=35$), onde o número de registros variou de acordo com a dimensão das unidades em análise.

A escolha deste método de análise está ligada com sua semelhança da geometria de observação do radar, conforme pode ser visto na Figura 3.4. Além disso, essa medida é comumente utilizada para estudos em florestas e, diretamente relacionados com o regime de luz e microclima. De acordo com Jennings et al. (1999) este tipo de medida pode ser relacionado com a sobrevivência e o crescimento das árvores em cada ponto de medição.

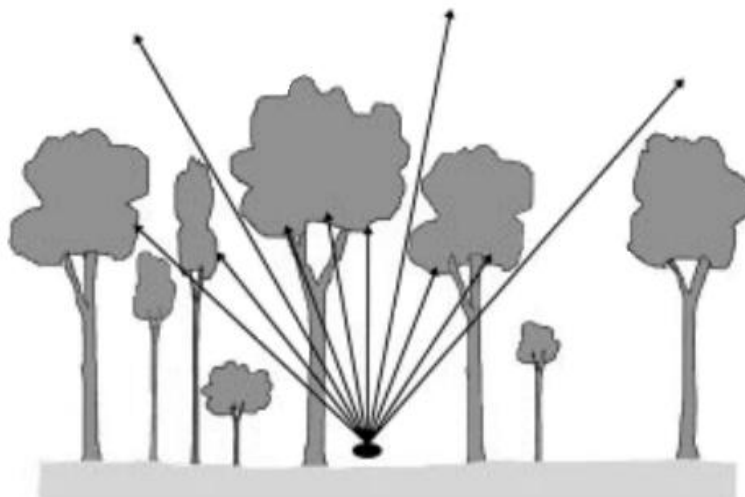


Figura 3.4 – Desenho esquemático de uma medida de fração de abertura de dossel, utilizando fotografia hemisférica.

Fonte: Jennings et al. (1999).

Os registros foram efetuados ao longo da linha central de todas as unidades amostrais. Nas unidades de FP e FEM foram registradas a cada 30 m dentro de cada transecto,

totalizando 12 registros por unidade; as unidades de SSA os registros foram realizados a cada 25 m em unidades de 10x100 m, totalizando 8 registros, já que neste estágio de sucessão todas essas são compostas de dois transectos; as unidades de SSInt seguiu-se o mesmo procedimento, entretanto o número total de observações foi de 4 pois essas são compostas de apenas um transecto nas mesmas dimensões da tipologia anterior; as unidades de SSI seguiram o mesmo intervalo de registro do que as unidades de SSA e SSInt, entretanto quando as unidades possuíam a dimensão de 10x50 m (Figura 3.3a) este intervalo distou em 10 m, totalizando 4 registros por unidade amostral. Apenas a unidade FEM15 o número de observações foi inferior, pois o número de transectos foi menor do que as demais, devido à limitação de área para a sua materialização (2 transectos paralelos de 10x100 m cada), totalizando 6 observações.

A abertura do dossel foi estimada por intermédio de fotografias no interior da tipologia florestal, apontadas em direção a copa das árvores e ajustadas com uma lente hemisférica (campo de visão de 180°), comumente chamada no meio científico de olho de peixe (*fisheye*). O desenvolvimento deste procedimento foi então realizado utilizando o processamento de imagem digital semi-automatizado, o qual derivou estimativas de percentagem de abertura de copa, definida por Green (1998) como a razão do número de *pixels* com o dossel aberto e o número de *pixels* com o dossel considerado fechado. Para esse cálculo a imagem colorida de 8 bits foi transformada em monocromática e estabelecido pelo operador um limiar de corte para a definição dos pixels com e sem presença de vegetação (GLA 2.0, 1999). A estimativa da média da fração de abertura de dossel foi derivada de todas as fotografias tiradas no interior de cada unidade amostral. A utilização de lentes hemisféricas assegura um amplo campo de visão, assim a amostragem do dossel é realizada tanto quanto possível com apenas um único registro fotográfico, pois conforme Green (1998) o total de luz que penetra no dossel florestal é registrado em um filme fotográfico e é proporcional ao total de espaços abertos na copa.

No interior das unidades amostrais foi realizado o inventário de todos os indivíduos arbóreos, seguindo os limites de inclusão referentes a todas as fitofisionomias avaliadas e elucidadas no parágrafo supracitado. A biomassa arbórea acima do solo destes indivíduos foi estimada pelas Equações 3.1 e 3.2, contidas nos trabalhos de Brown et al. (1989) e Uhl et al. (1988), ambas desenvolvidas na floresta tropical primária e em diferentes estágios de sucessão, respectivamente:

$$Y(\text{t.ha}^{-1}) = 0,044 * ((\text{DAP})^2 * \text{HT})^{0,9719} \quad 3.1$$

$$Y(\text{t.ha}^{-1}) = e^{(2,17+(1,02*(\ln(\text{DAP})^2)+(0,39*(\ln(\text{HT})))} \quad 3.2$$

em que: Y é a variável dependente corresponde à biomassa arbórea acima do solo, expressa em toneladas por hectare do tronco, excluindo-se a casca e todos os galhos; DAP é o diâmetro do tronco (fuste) em metros, medido à altura de 1,3m do solo; e HT corresponde à altura total, medida do solo ao ápice do tronco, após o ajuste por intermédio da Equação 3.3.

Como forma de se obter informações a respeito das alturas dos indivíduos, foram realizadas aleatoriamente 227 mensurações empregando-se um clinômetro eletrônico. Este procedimento foi realizado em setembro de 2005 por Gonçalves (2007), onde a partir deste conjunto de dados foi ajustado um modelo de regressão linear simples. Cada medida obtida por estimativa visual foi utilizada na comparação da medida obtida pelo clinômetro eletrônico. É importante salientar que este procedimento só é válido quando as estimativas visuais forem realizadas pelo mesmo observador, pois são acrescentadas as tendências de estimativas inerentes a cada observador.

$$H_{CE} = e^{0,1845} H_{EV}^{0,9480} \quad 3.3$$

em que: H_{EV} corresponde à medida estimada visualmente e H_{CE} a medida realizada com o clinômetro eletrônico, em metros. Mais detalhes a respeito de sua acurácia e desenvolvimento podem ser vistos em Gonçalves (2007). A estimativa das alturas foi gerada por meio da utilização deste modelo.

Por sua vez, a definição da alocação das unidades amostrais foi realizada pelo processo de amostragem aleatório com o apoio de imagens TM/Landsat com data de imageamento próxima à realização dos trabalhos de campo, considerando-se a representatividade da paisagem para se dispor de “manchas florestais” com homogeneidade. Além disto, a distribuição ao longo da área de pesquisa e a facilidade de acesso por ocasião do trabalho de campo também foram consideradas (Figura 3.5). O posicionamento geográfico das parcelas foi realizado com o auxílio do Sistema de Posicionamento Global (GPS) de navegação e, os erros de posicionamento relativo também foram considerados.

A identificação botânica das espécies foi realizada em campo por um identificador botânico familiarizado com a flora local, cuja associação foi devidamente checada com os nomes científicos de listas de espécies publicadas em outros artigos científicos realizados na mesma região desta pesquisa, considerando os dados obtidos pelo mesmo identificador botânico (GUIMARÃES e PYLE, 1999; OLIVEIRA, 2005; GONÇALVES, 2007). Os detalhes referentes às espécies, bem como o nome científico associados foram também confirmados com a utilização do banco de dados *International Plant Names Index* – IPNI (<http://www.ipni.org>). Após este procedimento, as espécies correspondentes foram agrupadas em suas famílias respectivas, conforme o sistema de classificação *Angiosperm Phylogeny Group* (APG II, 1998).

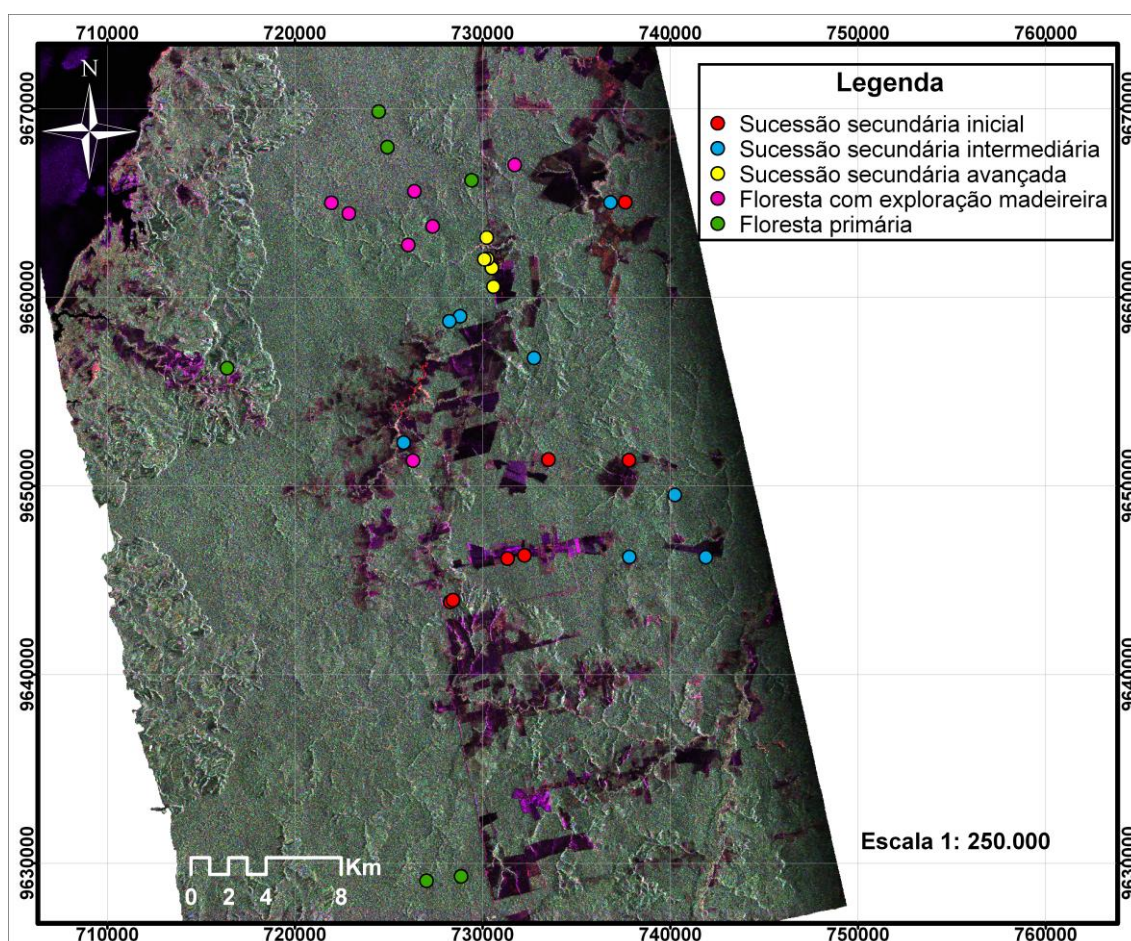


Figura 3.5 - Localização geográfica das amostras das diferentes fitofisionomias realizadas na FLONA Tapajós, nos inventários IF₂₀₀₅ e IF₂₀₀₇ (n=33), escolhidas para a geração do modelo final de biomassa arbórea acima do solo. A imagem corresponde ao formato intensidade, em banda L do ALOS-PALSAR (composição R_{HH}, G_{VV}, B_{HV}), obtida em outubro de 2006.

Adicionalmente, foi avaliada a posição relativa de cada árvore dentro de uma mesma unidade amostral por meio do procedimento de georreferenciamento de cada árvore inventariada. A Figura 3.6 é uma representação esquemática de uma unidade amostral

referente ao estágio de sucessão inicial e serve como base a elucidação do procedimento de alocação dos indivíduos, sendo aplicadas as demais formas e dimensões de unidades amostrais.

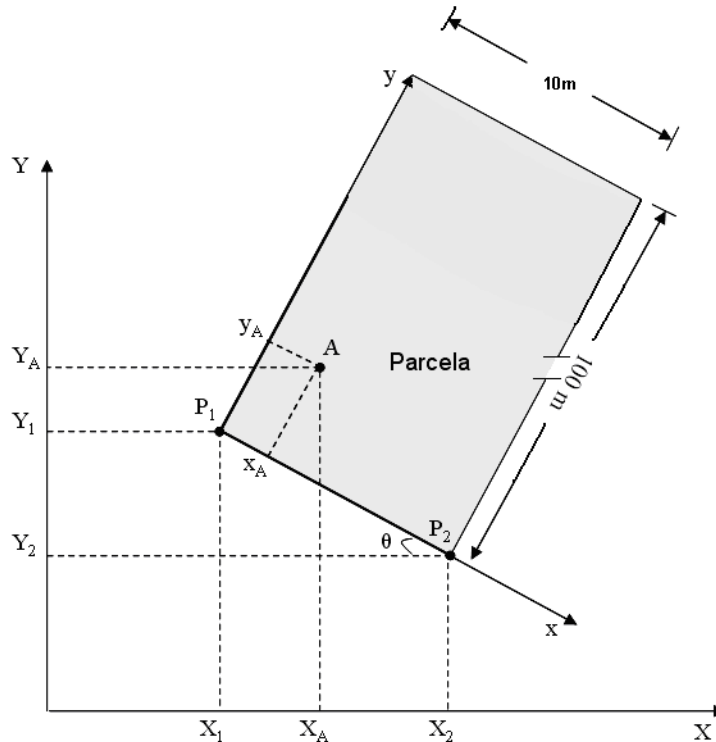


Figura 3.6 -Representação esquemática do procedimento de georreferenciamento das árvores inventariadas nas unidades amostrais.

Fonte: Modificada de Gonçalves (2007).

De acordo com MATHER (1999) as variáveis x, y correspondem ao sistema de coordenadas locais, enquanto que X, Y referem-se ao sistema de coordenadas *UTM*, em metros. Os pontos P_1 e P_2 (X_n, Y_n), referem-se às coordenadas obtidas com o sistema GPS para o posicionamento do ponto central de cada unidade amostral. Com o conhecimento de todas as variáveis mencionadas anteriormente foi obtido o ângulo Θ , formado entre ambos os sistemas planos. Dessa maneira, a obtenção da transformação das coordenadas do local em coordenadas no sistema *UTM*, para cada árvore (A) foi obtida com a aplicação da Equação 3.4.

$$\frac{X}{Y} = \frac{X_1}{Y_1} + R \frac{x}{y}, \text{ com}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \text{ se a rotação do sistema } (x, y) \text{ for no sentido anti-horário}$$

3.4

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ \text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \text{ se a rotação do sistema } (x, y) \text{ for no sentido horário}$$

Esta avaliação tem como objetivo complementar a avaliação da fração de abertura do dossel e geração dos perfis florestais, pois é necessário o conhecimento da distribuição da copa, bem como de sua dimensão, ou seja, a biomassa arbórea acima do solo, leva em conta além da dimensão do diâmetro do tronco, altura de fuste e galhos, a dimensão da copa. Além disto, o grau de cobertura da copa também é um indicativo do grau de perturbação o qual a floresta está inserida, servindo como uma variável importante na definição da fitofisionomia da floresta que ocorre na paisagem investigada.

3.3 Aquisição e formato dos dados de radar

Os dados utilizados para este estudo foram obtidos durante o processo de validação e calibração das imagens PALSAR no modo multipolarimétrico 1.1 PLR (imagem single look complex), visto que este sensor está atualmente disponível a bordo do satélite avançado de observação da terra “*Advanced Land Observing Satellite*” (ALOS), com um radar de abertura sintética em Banda L “*Phased-Array L-band Synthetic Aperture Radar*” (PALSAR).

O imageamento da área de estudo foi realizado em 21 de outubro de 2006, no modo de operação polarimétrico, denominado por Shimada et al. (2009) de PLR. As principais características da imagem são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características da imagem SAR adquirida pelo sensor ALOS/PALSAR.

Parâmetro	ALOS/PALSAR
Frequencia GHz (Banda)	1,27 (Banda L)
Comprimento de onda - cm	23,6
Polarização (Modo de aquisição)	HH/HV/VH/VV (Fine-Quad-Pol)
Nível de processamento	1.1
Tipo de dado (n° de looks)	Complexo (1)
Resolução - m (rg. x az.)	9, 50 x 4, 50
Espaçamento em pixel - cm (rg. x az.)	9, 3685 x 3, 5605
Órbita de aquisição	Ascendente
Data de aquisição	21/10/2006
Ângulo de incidência	24, 308°

O imageamento foi realizado em banda L (1,27 GHz), nas quatro polarizações lineares (HH, VV, HV e VH), com um ângulo de incidência de 24,308°, e resolução em alcance (line spacing) de 9,37 metros e azimutal (pixel spacing) de 3,56 metros, fazendo parte da faixa imageada de aproximadamente 30 Km.

O retroespalhamento registrado pelo sensor de radar é dependente da geometria e das condições elétricas dos alvos imageados, por isto é importante no tratamento dos dados

de radar, observar previamente as condições meteorológicas em que a imagem foi adquirida, pois a presença de chuva tende a elevar a constante dielétrica do alvo e, por conseguinte reduzir o contraste radiométrico entre os elementos constituintes de uma cena.

A Tabela 3.2 apresenta um resumo das condições meteorológicas, registradas na estação de Belterra, durante o mês de imageamento.

Tabela 3.2 – Resumo dos dados meteorológicos registrados na estação de Belterra durante o mês de imageamento.

Parâmetro Meteorológico	Valor Registrado (outubro/2006)
Número de dias com chuva	4
Chuva acumulada	49,9 mm
Umidade relativa média do ar	72-92%
Temperatura diária média	25-28,5 °C

Entretanto, é necessário analisar a distribuição das chuvas ao longo do mês de imageamento (Figura 3.7), com intuito de avaliar a qualidade da mesma verificando a incidência de chuvas no período próximo a data de aquisição do dado. Como pode ser visto nesta figura, a precipitação acumulada nos dias antecedentes foi de apenas 8,7 mm. Com isso, o baixo acúmulo da precipitação nos dias anteriores ao imageamento não acarreta problemas relativos ao aumento da constante dielétrica quando da extração dos atributos polarimétricos da imagem em questão.

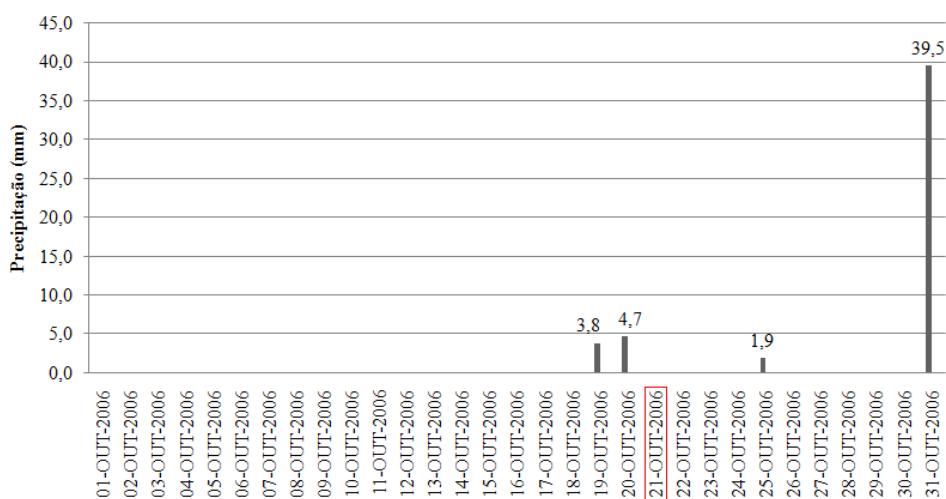


Figura 3.7 – Precipitação diária para o mês de aquisição da imagem utilizada.

A imagem gerada para a área de estudo é oriunda de uma série de produtos PALSAR (imagem *single look complex*, nível de processamento 1.1), disponível na geometria *slant range*, com preservação integral de fase em 32 bits na parte real e imaginária. A reamostragem na direção de azimute é uma prática usual, denominada de processamento

multilook, tendo sido aplicada com o intuito de produzir imagens com dimensões regulares em ambas as direções (*range* e *azimute*) – elementos de resolução com 25 m – além de reduzir o efeito do ruído *speckle*.

A calibração radiométrica da imagem PALSAR segue os passos realizados em Shimada et al. (2003) e Shimada et al. (2005). Nestes trabalhos, encontram-se os procedimentos de correção do padrão da antena, calibração polarimétrica e calibração absoluta dos dados, pois de acordo com os mesmos autores há a necessidade de tais correções para a obtenção dos verdadeiros valores referentes a cada polarização analisada. O procedimento para a realização destas calibrações, foram realizadas utilizando as respostas radiométricas de refletores de canto, utilizados pelos centros de calibração distribuídos ao redor do globo em cooperação com a Agência Espacial Japonesa (JAXA), os quais podem ser vistos com maiores detalhes em Shimada et al. (2005).

Com o intuito de remover a variação do ganho na direção do alcance, para correção do padrão da antena, foram utilizados como base, dados de alvos na região Amazônica. De acordo com Shimada et al. (2009) essa correção é realizada por meio da avaliação da dependência do ângulo de incidência das polarizações HH e HV.

Essa correção, realizada pelos mesmos autores, por intermédio da avaliação antes do seu lançamento, utilizando 2 das 4 subfaixas, com 1,9 m em *azimute* x 2,9 em *range*, onde estes foram conectados e medidos em testes de bancada para determinar o valor de uma porção pré-estabelecida do padrão da antena. Estes dois conjuntos de dados foram sintetizados para formar um valor simulado para os 4 painéis da antena e sua posterior correção.

Este procedimento adotado foi também realizado em Shimada et al. (2009), pois a variação do ganho na direção do alcance pode sofrer mudanças em órbita devido a grandes vibrações durante a fase de lançamento e a diferença entre condições no solo e no espaço. Dessa forma, este procedimento é recomendado pelo comitê espacial de avaliação dos dados ALOS da JAXA, como uma forma de analisar as Florestas da Amazônia que fornecem um valor de gama zero independente do ângulo de incidência (σ_0 dividido pelo cosseno do ângulo de incidência) (MOORE e HEMMAT, 1988; HAWKINS, 1990).

A calibração do padrão da antena foi realizada utilizando-se diversas faixas de imageamento na Amazônia por intermédio de métodos estatísticos descritos em Shimada e Freeman (1995). Na obtenção de resultados confiáveis, áreas consideradas não uniformes (i.e, áreas desflorestadas, rios, áreas com intensidade de brilho diferente) foram excluídas através do teste F com um nível de confiança de 99,5%. A descrição do modelo pode ser visto em maiores detalhes em Shimada et al. (2009) e a equação do ganho da antena pode ser vista logo abaixo:

$$G_R(\varnothing) = \alpha + \beta(\varnothing - \varnothing_0)^2 + \gamma (\varnothing - \varnothing_0) \quad 4 \quad 3.5$$

onde: \varnothing é o ângulo off-nadir; \varnothing_0 é o ângulo fora do off-nadir; e G_R é o ganho da antena em decibéis. Os coeficientes α , β e γ são não conhecidos, e α é relacionado ao f_c absoluto.

Por intermédio da determinação do ganho da antena foi possível verificar que a dependência do ângulo de incidência das polarizações HH e HV foi bem determinada e não houve nenhum erro em sua correção (problemas com a correção do padrão da antena).

A realização dos demais procedimentos de calibração polarimétrica (*cross-talk* e *channel imbalance*) foi necessária para a correção de distorções causadas na matriz de espalhamento dos dados em imagens polarimétricas. A medição do *cross-talk* é muito sensível à precisão da matriz de distorção e à rotação de Faraday causado pela interferência da ionosfera, o qual é associado com a banda L (SHIMADA et al., 2009). Este valor foi considerado demasiadamente pequeno e foi ignorado, ou seja, foi possível isolar os canais H e V sem que nenhum destes tenha interferido no sinal do outro.

A determinação da matriz de distorção polarimétrica foi obtida pela aplicação do método de Quegan (1994) para monitorar a estabilidade dos valores de *channel imbalance*, utilizando órbitas ascendentes e descendentes. Na operação de calibração e validação dos dados SAR, Shimada et al. (2009) consideraram o *channel imbalance* estável. Com isso, é possível afirmar que a resposta das componentes H e V foram as mesmas.

Para tanto, Shimada et al. (2004), atribuíram com vantagem principal a obtenção dos valores de *cross-talk* e *channel imbalance* como função dos elementos da matriz de covariância [C], contendo as matrizes de distorção e as componentes de espalhamento

em floresta tropical, estes baseados na teoria de decomposição de alvos incoerentes e modelados por Freeman e Durden (1998).

As constantes de calibração foram determinadas usando refletores de campo dispostos ao longo do globo, por ocasião dos testes de avaliação da calibração e validação dos dados, no sentido de avaliar a estabilidade do sistema. Já para a determinação dos valores de *channel imbalance* e *cross-talk* foram selecionados *corner reflectors* na região amazônica.

Para a imagem PLR a conversão da amplitude (Digital Number – *DN*) para sigma zero foi feita por meio da expressão presente em Shimada et al. (2009) e descrita a seguir:

$$\sigma^0 = 10 \times \log_{10}(I^2 + Q^2) + f_c - A \quad 3.6$$

onde: f_c (fator de calibração = - 83);

A (fator de conversão = 32 (valor derivado teoricamente));

I e Q (parte real e imaginária do produto PLR (nível 1.1)).

No caso das imagens PLR 1.1 a parte real e imaginária corresponde aos números digitais (*DN*) da imagem (amplitude).

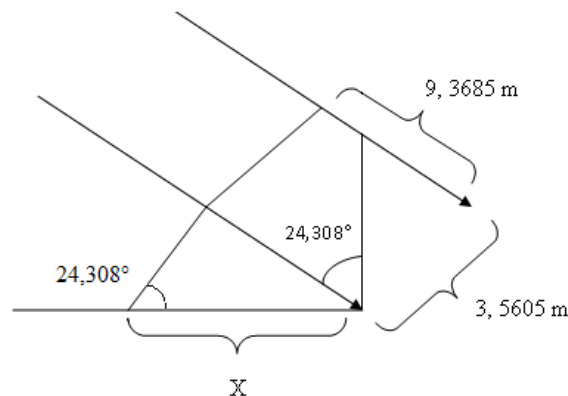
Nas imagens recebidas pelo INPE (PLR, nível de processamento 1.1) foram aplicados os procedimentos e os valores de calibração sugeridos por Shimada et al. (2009), obtendo como produto final uma imagem cujos níveis digitais (*DN*) correspondem a valores de amplitude (A) do sinal, sendo que por ocasião deste foram transformados em intensidade (I). Desta forma, a equação utilizada para converter os dados de nível digital (*DN*) para $\sigma^0_{[dB]}$ é mostrada abaixo:

$$\sigma^0_{[dB]} = 10 * \log_{10} I \quad 3.7$$

Após a geração dos atributos coerentes e incoerentes foram realizados dois procedimentos distintos. Primeiramente, com a finalidade de correlacionar a variável dependente oriunda do inventário florestal (biomassa arbórea acima do solo, em $t.ha^{-1}$) aos atributos polarimétricos da imagem de radar, foi necessário “registrar” a imagem e as parcelas de campo ao mesmo sistema de referência. Como a ortorretificação pode alterar a parte complexa da imagem SAR polarimétrica (fase), a extração dos atributos SAR polarimétricos de cada região de interesse – ROI (unidade amostral) foi realizada pela projeção do elemento amostral, inicialmente no sistema de referência cartográfico

geodésico WGS84 (imagem ortoretificada), em uma imagem no sistema de coordenadas em *ground range*.

A matriz de espalhamento foi então convertida para matriz [C] ou [T] com uma média espacial de 7 x 1 (azimute por range, respectivamente) *pixels* para a extração dos atributos coerentes e incoerentes, listados e exemplificados no ítem subsequente. A média espacial utilizada converte o espaçamento do pixel de 3,5605 m em azimute por 9,3685 m em range no alcance inclinado (*slant range*) para 22,848 m em azimute x 24,92 m em range no alcance do terreno (*ground range*). Este procedimento é a forma correta de se obter um elemento de resolução mais próximo de um elemento regular, resultando em uma menor distorção do *pixel*, além de facilitar a identificação de pontos notáveis para a realização da ortoretificação. A Figura 3.8 demonstra mais claramente o procedimento de cálculo para a definição dos fatores de reamostragem para a imagem PLR 1.1:



$$\text{sen } 24,308^\circ = \frac{9,3685 \text{ (cat. oposto)}}{x \text{ (hip)}}$$

$$x = \frac{9,368}{\text{sen } 24,308^\circ} = \frac{9,3685}{0,41} = 22,848 \text{ m (espaçamento em pixel "range")}, \text{ então:}$$

$$22,848/3,5606 = 6,46 \text{ (valor real do presuming)} \approx 7, \text{ então:}$$

$$7 \times 3,5606 = 24,92 \text{ m (espaçamento em linha "azimute")}$$

Dimensão do elemento de resolução
22,848 m (range) x 24,92 m (azimute)

Figura 3.8 – Desenho esquemático da configuração das características do sistema de imageamento adquiridas pelo sensor ALOS/PALSAR.

O segundo procedimento realizado foi a ortoretificação da imagem PLR 1.1. Para tanto, para a correção geométrica utilizou-se o módulo polarimétrico do Envi, denominado de SARscape. Este utiliza um modelo matemático considerado rigoroso, no

qual o processo de ortoretificação reflete a realidade física da geometria de aquisição das imagens e corrige as distorções devido à plataforma (posição, velocidade e atitude), ao sensor (azimute de visada, ângulo de incidência), à Terra (elipsóide) e à projeção cartográfica (ENVI SARscape 4.1.001, 2008). Além disso, o método leva em conta para cada elemento de resolução com uma correspondente posição do sensor estimada, equações de *slant range* e de frequência *Doppler* extraídas de Meier et al. (1993) nesse processo. Outra vantagem desse método reside na não obrigatoriedade da utilização de pontos de controle (GCP – *ground control point*), desde que os parâmetros orbitais da imagem considerados sejam precisos (efemérides da imagem fornecidas nos seus metadados).

Este procedimento foi realizado para comparar os resultados da geração do modelo de biomassa dos valores extraídos do inventário florestal. O procedimento de ortoretificação foi realizado, pois corrige erros de posicionamento causado pela variação altimétrica, utilizando o modelo polinomial de primeiro grau e a reamostragem pelo método do vizinho mais próximo (MATHER, 1999). Além disso, a ortoretificação é indicada em detrimento do registro simples da imagem, já que esta corrige as distorções ocasionadas pelo relevo, devido à geometria de visada do radar. Já a correção geométrica polinomial (registro) é realizada apenas nas direções x e y, sendo indicada apenas para imagens obtidas de sensores ópticos, os quais corrigem a imagem em ângulos próximos ao nadir. Em adição, enquanto a ortoretificação tem uma dependência menor de número de pontos de controle a correção geométrica polinomial não corrige a informação devido ao relevo (correção é feita localmente – maior dependência de pontos de controle) (TOUTIN, 2004).

Os valores do Erro Médio Quadrático (RMSE) encontrados na validação das imagens resultantes do processo de correção geométrica são mostrados na Tabela 3.3, assim como a quantidade de pontos GCP's e pontos independentes de validação (ICP's – *Independent Check Points*) utilizados para a correção e validação, respectivamente. Outro parâmetro importante que foi utilizado para estimar a precisão alcançada no processo de correção das imagens é o *The Circular Map Accuracy Standard* – CMAS (NSDI, 1998), o qual se constitui de um parâmetro estatístico usado para estimar um raio, dentro do qual há 90% de confiança de se encontrar a posição de um ponto.

O procedimento de avaliação da análise de exatidão dos pontos utilizando-se a ortoretificação baseou-se na análise das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos

homólogos, os quais foram obtidos a partir de observações realizadas em campo (GPS de navegação), consideradas como coordenadas de referência. De posse dessas discrepâncias, neste trabalho procurou-se seguir alguns procedimentos sugeridos por Merchant (1982).

Tabela 3.3 – Valores do Erro Médio Quadrático e do CMAS, ambos em metros, encontrado para a imagem ortoretificada.

ALOS/PALSAR					
RMSE (m) (E)	RMSE (m) (N)	RMSE (m) (Total)	CMAS (m)	Nº GCPS	Nº ICPS
24,701	20,057	31,818	66,819	9	31

Uma questão importante se refere ao número de pontos (ICP's) necessários para uma análise segura, pois de acordo com Galo e Camargo (1994), para a validação dos pontos após a ortoretificação não se deve ter um número de pontos na qual não se pode afirmar que a análise seja segura ou ter um número excessivo de pontos, onde se tem uma análise segura e um custo inviável para esta tarefa. Merchant (1982) sugere vinte como sendo o número mínimo de pontos, bem distribuídos por toda a extensão da imagem, sendo que para esta análise o número de 31 ICPS foi mais do que suficiente.

Após a realização da transformação da imagem *single look complex* em uma imagem com dimensões semelhantes, esta foi reamostrada para 12,5 m, pois esta dimensão foi considerada ideal devido a menor dimensão das unidades amostrais de SSI. Com isso, aumentou-se o número de observações para a composição dos valores médios dos atributos polarimétricos de cada unidade. Para reduzir o ruído *speckle*, foi utilizado o filtro Lee Modificado (LEE et al., 1999), janela 5x5 na imagem em formato intensidade.

O procedimento anterior resultou em uma imagem com número equivalente de looks igual a 175 (7x25), decorrentes do processo de reamostragem e posterior filtragem da imagem.

Com o intuito de facilitar o entendimento da descrição metodológica realizada neste ítem a Figura 3.9 mostra como o procedimento de geração e extração dos atributos polarimétricos.

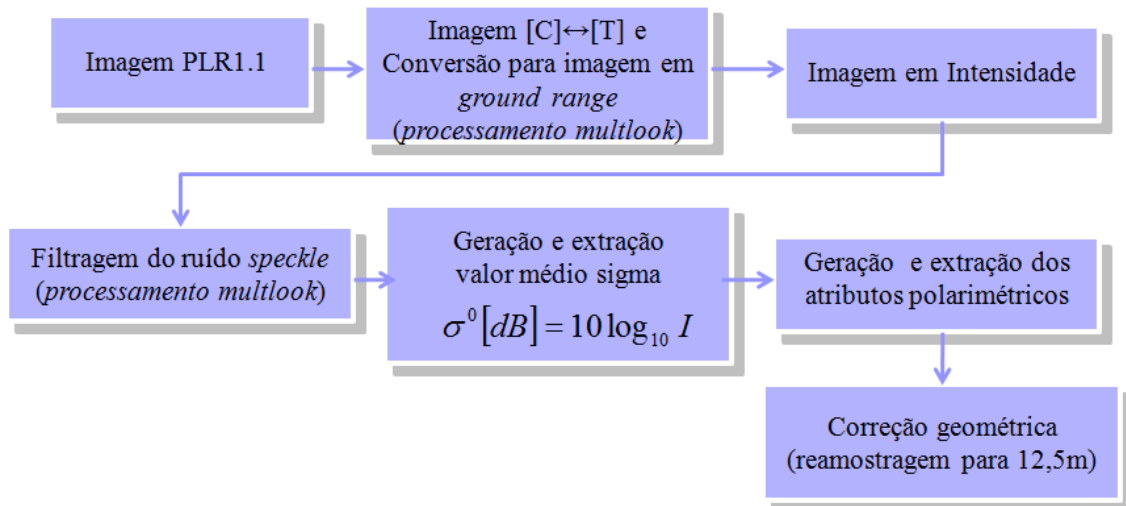


Figura 3.9 – Geração e extração dos atributos polarimétricos SAR.

3.3.1 Descrição dos atributos PolSAR

A matriz de espalhamento complexa, composta por valores de amplitude e fase, possui diferentes características polarimétricas, descritas por uma série de atributos amplamente consagrados na literatura, com comportamento próprio, de acordo com o alvo em questão. Objetivando estudar suas respostas, perante as características florístico-estruturais das diferentes fitofisionomias, foi realizada a avaliação das características polarimétricas das unidades amostrais em análise. No caso das imagens PolSAR esta matriz foi obtida para cada elemento de resolução e posteriormente extraído o seu valor médio. Os atributos utilizados para a descrição dos alvos e geração do modelo de biomassa arbórea acima do solo dividem-se em incoerentes e coerentes.

a) Atributos incoerentes

Este tipo de atributo é baseado nas informações da parte real de cada pixel da imagem estando representado essa categorização por: coeficiente de retroespalhamento (σ^0), descritos por Woodhouse (2006); van der Sanden (1997), a razão de polarização paralela (R_p) e razão de polarização cruzada (R_c), descritos por Henderson e Lewis (1998); CCRS (2001). Além destes, tem-se ainda a potência total (P_T), apresentados por Woodhouse. (2006); Lee e Pottier (2009) e os índices formulados por Pope et al. (1994) em ambiente florestal, nomeados como índice de biomassa (*BMI*, biomass index), de estrutura do dossel (*CSI*, canopy structure index) e de espalhamento volumétrico (*VSI*, volume scattering index). A seguir será exibida a formulação e um breve comentário a respeito de cada atributo.

Coefficiente de retroespalhamento: Também chamado de seção de radar cruzada normalizada (m^2/m^2). Leva em conta a geometria do alvo por unidade de área de superfície e, dessa forma como uma propriedade do alvo e não a propriedade da geometria de medida. Em dosséis florestais, o valor de σ° varia na proporção da área projetada da energia incidente, como uma função do cosseno do ângulo de incidência local. Este valor é obtido em todas as polarizações possíveis por intermédio da Equação 3.7 e expresso em escala linear¹, medindo a quantidade de energia registrada pela antena.

$$\sigma_{HH}^0 = 10^{\frac{(\sigma_{HH}^0)_{dB}}{10}}$$

$$\sigma_{VV}^0 = 10^{\frac{(\sigma_{VV}^0)_{dB}}{10}} \quad 3.8$$

$$\sigma_{HV}^0 = 10^{\frac{(\sigma_{HV}^0)_{dB}}{10}}$$

Razão de polarização paralela: É considerada uma medida da rugosidade da superfície, para todos os ângulos de incidências, polarizações e superfícies. Em alvos florestais, é um parâmetro do indicativo do mecanismo de espalhamento atuante. Valores elevados indicam (>1) indicam que o espalhamento é do tipo *double bounce* (maior sensibilidade ao espalhamento em HH em relação ao elementos na polarização VV):

$$R_p = \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{HH}^0} \quad 3.9$$

Razão de polarização cruzada: É também considerado um parâmetro relacionado a rugosidade da superfície, porém fracamente dependente da umidade. De ampla utilização em alvos florestais, quando os valores deste parâmetro são elevados consituem-se em um indicativo do aumento do espalhamento no volume da copa (elementos espalhadores aleatórios):

$$R_c = \frac{\sigma_{HV}^0}{\sigma_{HH}^0} \quad 3.10$$

¹ É referido ao formato intensidade, extraída da posterior transformação da matriz [S] na matriz [C] e posterior obtenção de sua diagonal principal. O coeficiente de retroespalhamento é obtido transformando-se a Equação 3.8 sobre um dado em escala logarítmica.

Potência total (*Span*): Parâmetro considerado polarimetricamente invariante, ou seja, independe da base utilizada para descrever a onda de radar, representado pela soma total dos mecanismos de espalhamento ocorrentes na floresta, sendo que nesta representação toda a informação de fase é perdida:

$$P_T = \sigma_{HH}^0 + \sigma_{VV}^0 + 2\sigma_{HV}^0 \quad 3.11$$

Índice de biomassa: Parâmetro considerado indicador da quantidade relativa de madeira pela biomassa foliar. Este índice possui valores superiores para florestas com características de senescência do que para as perenifólias, devido à absorção dos sinais de microondas pela umidade das folhas verdes. Todavia, esse índice é influenciado pelo ângulo de incidência local:

$$BMI = \frac{\sigma_{HH}^0 + \sigma_{VV}^0}{2} \quad 3.12$$

Índice de estrutura do dossel: O CSI tem relação com ecossistemas dominados pela estrutura vertical (florestas de terra firme) em comparação com a importância daqueles dominados por galhos horizontais ou quase horizontais (florestas inundadas). Dado a este fato, florestas de terra firme apresentam valores mais elevados de *CSI* do que florestas inundadas. As reflexões de canto ocorrentes na floresta (*double bounce*) tendem a reduzir este índice, ou seja, quando há uma maior contribuição dos elementos horizontais em relação às estruturas predominantemente verticais:

$$CSI = \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{HH}^0} \quad 3.13$$

Índice de espalhamento volumétrico: É considerada uma medida da despolarização do retroespalhamento, pois esta ocorre pelo multicaminhamento no interior da estrutura aleatória do dossel florestal, provocando espalhamento múltiplo (volumétrico). Devido a sua formulação, e dependendo do tipo florestal em análise, pode fornecer melhor resposta com a biomassa dos troncos do que o índice de biomassa:

$$VSI = \frac{\sigma_{HV}^0}{\sigma_{HV}^0 + BMI} \quad 3.14$$

b) Atributos coerentes

Estes atributos fazem uso da informação de fase, tendo sido avaliados a coerência polarimétrica HH-VV (γ) e a diferença de fase HH-VV ($\Delta\phi$), descritos por Henderson e Lewis (1998). Além disso, foram analisados os parâmetros resultantes da decomposição por autovetores da matriz [T] (CLOUDE e POTTIER, 1996; 1997; LEE e POTTIER,

2009) denominados de entropia (H), anisotropia (A) e o ângulo alfa médio ($\bar{\alpha}$); a magnitude de Touzi (α_s), a fase de Touzi Φ_{os} , também derivados da mesma decomposição anterior, além do ângulo de orientação ψ e helicidade τ_m , derivados em dois estágios, primeiramente da matriz de Graves [G] e logo após da matriz de Kennaugh-Huynen, melhores descritos em Touzi (2007) e Touzi et al. (2009); e as componentes de espalhamento volumétrico (P_v), *double bounce* (P_d) e superficial (P_s), resultantes da decomposição da matriz [C] (FREEMAN e DURDEN, 1998):

Diferença de fase HH-VV: Contém informações específicas sobre os alvos definidos pelo tipo de mecanismo de espalhamento. Valores próximos à 0° representam o espalhamento direto (superfícies relativamente lisas), enquanto que valores próximos à $\pm 180^\circ$ o espalhamento é considerado *double bounce* (diedro), correspondente a interação solo-tronco. No intervalo entre 0 e $\pm 180^\circ$ o alvo é considerado difuso, representando múltiplas interações ocorrente no interior da estrutura aleatória dos dosséis florestais.

$$\Delta\varphi = \arg(S_{HH} S_{VV}^*) \quad 3.15$$

onde: \arg = função argumento; $*$ = conjugado complexo.

Coerência polarimétrica: Também conhecido como coeficiente de correlação complexa, indicando o grau de correlação da fase entre as polarizações lineares. Caso a magnitude desse coeficiente seja menor que 1, como a maior parte dos alvos naturais, significa que o retroespalhamento em HH e VV não são diretamente relacionados e a diferença de fase tende a valores próximos a zero:

$$\gamma = \frac{|\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle|}{\sqrt{\langle S_{HH} S_{HH}^* \rangle \langle S_{VV} S_{VV}^* \rangle}} = |\rho_{HH \ VV}| e^{j\delta_{HH \ VV}} \quad 3.16$$

onde: $\langle \rangle$ = média espacial.

Entropia: A entropia (H) é um parâmetro que indica o número de mecanismos dominantes presentes na célula de resolução da cena, determinando a aleatoriedade de seu processo ($H \sim 0$ = mecanismo de espalhamento único; $0 < H < 1$ = mais de um processo de espalhamento contribui, porém não há clareza de quantos; $H \sim 1$ = combinação de três alvos puros com igual contribuição):

$$H = -\sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i), \quad \text{com } p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k} \quad 3.17$$

onde: p_i = a razão entre os autovalores λ_i e o soma dos demais, oriundos da matriz [T].

Anisotropia: Parâmetro complementar indicando a importância relativa do λ_2 e λ_3 . Quando $H > 0,7$, a anisotropia (A) contribui com informação adicional para caracterizar o alvo. Abaixo deste valor, a anisotropia torna-se ruidosa e com importância limitada. A intensidade destes elementos canônicos identifica a presença de espalhadores primários, secundários e o tipo de espalhamento dominante:

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad 3.18$$

onde: os autovalores λ_2 e λ_3 são o segundo e terceiro autovalores, em ordem decrescente de importância, derivados da matriz $[T]$.

Ângulo alfa médio: O ângulo alfa (α) indica o tipo de mecanismo de espalhamento presente na interação da onda com o alvo, onde $\alpha = 0^\circ$ (espalhamento superficial) para alvos isotrópicos, $\alpha = 45^\circ$ (espalhamento volumétrico) para alvos anisotrópicos e $\alpha = 90^\circ$ (espalhamento *double bounce*) para alvos com alteração significativa da fase, correspondendo a 2π :

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad 3.19$$

onde: α_i são as coordenadas iniciais dos autovetores associados a λ_i .

Magnitude de Touzi: Parâmetro que fornece a magnitude do tipo de simetria referente ao tipo de espalhamento do alvo (considerado complementar ao ângulo alfa de Cloude). Os valores mais baixos de ($\alpha_{si} = 0$) indicam o que o alvo possui simetria e o espalhamento é considerado do tipo direto (*single bounce*), enquanto que valores intermediários ($\alpha_{si} = \pi/4$) indicam que o alvo apresenta assimetria de 45° em relação a interação com o alvo, considerado do tipo múltiplo. Valores extremos de magnitude ($\alpha_{si} = \pi/2$) indicam que o alvo está orientado a 90° em relação a onda incidente e o espalhamento é considerado do tipo *double bounce*. De acordo com Touzi et al. (2009) a α_{si} e a $\Phi\alpha_{si}$ são definidas segundo as coordenadas polares da esfera de Poincaré como função da matriz de espalhamento $[S]$.

$$\tan(\alpha_s). e^{j\Phi\alpha_s} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \quad 3.20$$

onde: μ_1 e μ_2 são os coautovalores da matriz $[S]$.

Fase de Touzi: Parâmetro que fornece uma completa caracterização do tipo de espalhamento do alvo, considerado similar a diferença de fase HH-VV. Entretanto, os valores de $\Phi\alpha_{si}$ possuem menor variabilidade de valores (menor desvio padrão da

média) dentro da mesma classe classificada, além de ser invariante a base de polarização quando analisados alvos não-simétricos (TOUZI, 2007; TOUZI et al., 2009). Na verdade, a diferença entre os dois parâmetros está relacionada a diferença de conceitos, enquanto a $\Phi_{HH}-\Phi_{VV}$ fornece a diferença de fase entre as polarizações HH e VV ao passo que a $\Phi_{\alpha_{si}}$ fornece a medida da diferença de fase entre o espalhamento diédrico e triédrico, além de ser independente da base de polarização ao passo que $\Phi_{HH}-\Phi_{VV}$ esteja estritamente relacionado ao espalhamento nas polarizações HH e VV.

Valores próximos de ($\Phi_{\alpha_{si}} = 0$) indicam que o alvo possui espalhamento do tipo direto, enquanto que valores de ($\Phi_{\alpha_{si}} = \pm 90^\circ$) o espalhamento é do tipo *double bounce*. Valores intermediários indicam que o espalhamento é oriundo de múltiplas interações.

$$\tan(\alpha_s). e^{j\Phi_{\alpha_s}} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \quad 3.21$$

Ângulo de orientação: Parâmetro que mede o ângulo de rotação aplicado para subtrair o efeito do ângulo de orientação no espalhamento do alvo, fornecendo uma medida intrínseca do ângulo de inclinação do alvo. Valores de ângulo de orientação próximos a zero ($\psi = 0$) indicam que não há rotação do alvo, enquanto que os valores entre $-\pi/4 \leq \psi \leq \pi/4$ significa que o alvo está rotacionado com relação a linha de visada do radar.

$$[R(\psi)] = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \quad 3.22$$

onde: ψ é a orientação da máxima polarização com respeito a polarização horizontal.

Ângulo de heliticidade: Parâmetro que permite a medida do grau de simetria de espalhamento do alvo, separando espalhadores simétricos de assimétricos, dado o mesmo tipo de espalhamento α de Cloude. Valores de $\tau_{mi} = 0$ indicam que o alvo possui simetria, enquanto que valores de heliticidade $-\pi/4 \leq \tau_{mi} \leq \pi/4$ representam o espalhamento do tipo hélice orientado à direita e à esquerda representados na esfera de Poincaré, respectivamente.

$$[T(\tau_m)] = \begin{bmatrix} \cos\tau_m & -j\sin\tau_m \\ -j\sin\tau_m & \cos\tau_m \end{bmatrix} \quad 3.23$$

onde: τ_m é o ângulo de heliticidade utilizado para avaliar o grau de simetria do alvo.

Espalhamento volumétrico: Atributo que modela a matriz [C] como uma contribuição do espalhamento do tipo volumétrico (fv) por intermédio da potência total

retroespalhada (*Span*). Considera que o retroespalhamento é simulado como uma nuvem de dipolos aleatoriamente orientados, muito finos e do tipo cilindro, simulando a estrutura aleatória do dossel florestal:

$$P_v = \frac{8f_v}{3} \quad 3.24$$

onde: f_v = contribuição do espalhamento volumétrico na polarização VV.

Espalhamento *double bounce*: Atributo que modela a matriz [C] como uma contribuição do espalhamento do tipo *double bounce* (f_d) por intermédio da potência total retroespalhada (*Span*). Considera que o retroespalhamento é modelado pelo espalhamento de um refletor de canto do tipo diedro, como por exemplo, a interação solo-tronco no interior de ambientes florestais para a polarização VV:

$$P_d = f_d (1 + |\alpha|^2) \quad 3.25$$

Espalhamento superficial: Atributo que modela a matriz [C] como uma contribuição do espalhamento do tipo superficial (f_s) por intermédio da potência total retroespalhada (*Span*). Para este tipo de mecanismo é assumido que o espalhamento superficial é derivado pelo modelo de primeira ordem do tipo Bragg, modelado por superfícies rugosas (superfície do oceano), assumindo que esta superfície possui distribuição periódica dos elementos espalhadores na direção de propagação da onda eletromagnética:

$$P_s = f_s (1 + |\beta|^2) \quad 3.26$$

onde os coeficientes α e β são os parâmetros de estimação de algumas variáveis biofísicas da floresta, tais como diâmetro e a densidade de árvores, conforme estatística de segunda ordem, após sua normalização na polarização VV (Equação 2.12).

OBS: Todos os atributos desenvolvidos por FREEMAN e DURDEN (1998) têm sido aplicados para decompor imagens SAR polarimétricas, sob condição de simetria de reflexão, conforme a Equação 2.14.

4 MÉTODOS DE ANÁLISE

4.1 Florística e estrutura

As análises relativas à variação da florística e da estrutura florestal foram baseadas em dois níveis: a primeira refere-se ao tipo de cobertura florestal, a qual foi realizada com o intuito de caracterizar as diferentes fitofisionomias no qual estão fundamentadas as análises posteriores; a segunda análise refere-se a unidade amostral, como forma de relacionar as diferenças advindas dos atributos polarimétricos analisados nas imagens PolSAR com às variações florístico-estruturais observadas no inventário local realizado.

4.1.1 Caracterização do povoamento florestal

A suficiência amostral do IF₂₀₀₇ foi avaliada com base na curva espécie-área ou curva do coletor. Esta é construída pela progressão do acúmulo de área e do número de novas espécies presentes a cada input em área. A construção da mesma, foi realizada por intermédio da decomposição na menor unidade de trabalho de campo (500m² -10x50m), referentes a unidade amostral de SSI com idade entre 4-6 anos. Essa avaliação efetuou-se pela sequência expedita amostral de campo e o seu ordenamento utilizado para a contagem do aparecimento de espécies novas. Como amplamente divulgado, o ponto de saturação foi determinado visualmente, por intermédio da função de regressão linear ajustada à curva espécie-área.

Para a análise da composição florística na área experimental foram empregadas técnicas de análise quantitativas amplamente divulgadas no meio científico. Apesar de uma das fontes de erro mais substancial provenha do fato de não se conseguir incluir todas as espécies da comunidade na amostra, é recomendado o uso do Índice de Shannon-Weaver (H') para expressar a diversidade florística. Tal índice é o mais utilizado em fitossociologia e, portanto, passível de comparação com estudos realizados em outras comunidades florestais, bem como o índice de equabilidade de Pielou (J), sugeridos por Magurran (1988):

$$H' = - \sum_{i=1}^S [p_{e_i} \ln(p_{e_i})], \text{ com } p_{e_i} = \frac{n_i}{N} \quad 4.1$$

$$J = \frac{H'}{\ln(S)} \quad 4.2$$

em que: n_i é o número de indivíduos da espécie i ; N é o número total de indivíduos; e S é o número total de espécies amostradas.

Na avaliação da estrutura horizontal do povoamento analisado os parâmetros fitossociológicos (densidade, dominância e frequência) foram estimados e interpretados segundo as proposições de Mueller-Dombois e Ellenberg (1974):

$$DA_i = \frac{n_i}{A_{ha}} \quad e \quad DR_i = \frac{DA_i}{\sum_{i=1}^s DA_i} 100 \quad 4.3$$

$$DoA_i = \frac{AB_i}{A_{ha}} \quad e \quad DoR_i = \frac{AB_i}{\sum_{i=1}^s AB_i} 100 \quad 4.4$$

$$FA_i = \frac{u_i}{u_t} 100 \quad e \quad FR_i = \frac{FA_i}{\sum_{i=1}^s FA_i} 100 \quad 4.5$$

em que: DA_i ; DoA_i ; FA_i , e DR_i ; DoR_i ; FR_i , correspondem respectivamente à densidade, dominância e frequência absoluta e relativa, da espécie i ; n_i = número de indivíduos da espécie i ; A_{ha} = total em área amostrada, em hectares; S = número total de espécies amostradas; AB_i = área basal individual da espécie i , em metros quadrados; u_i = é referente a ocorrência do número de unidades amostrais nas quais a espécie i está presente; e u_t = número total de unidades amostrais.

As definições dos parâmetros supracitados serviram para o cálculo do IVI (Índice de Valor de Importância), o qual representa a soma dos valores relativos de densidade, frequência e dominância (Equação 4.6), introduzido por Curtis e McIntosh (1951).

$$IVI = DR_i + FR_i + DoR_i \quad 4.6$$

Este índice é de grande relevância, pois segundo Lamprecht (1964) o estudo dos parâmetros de frequência, dominância e densidade revelam aspectos importantes da composição florística da floresta em estudo, porém analisados separadamente, fornecem apenas informações parciais da estrutura florística.

4.1.2 Caracterização das unidades amostrais

Para a avaliação da diversidade para cada grupo florístico foi utilizado o índice de Shannon-Weaver, assim como na caracterização do povoamento florestal. Já para a avaliação dos grupos florísticos, ou seja, se os mesmos apresentaram diferenças significativas quanto à diversidade, analisando-se funções de distribuição cumulativas duas a duas, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (ZWILLINGER e KOKOSKA,

1999). Adicionalmente, na determinação da similaridade florística entre as diferentes unidades amostrais utilizou-se a técnica multivariada de acordo com o método de classificação TWINSpan “Two Way Indicator Species Analysis” (HILL, 1979; MC CUNE e MEFFORD, 1995; 1997). Isso permitiu entender melhor os padrões de distribuição fitogeográfica na área sob investigação, realizando-se comparações florístico-quantitativas entre todos os transectos amostrados. Essa metodologia foi empregada visando observar as variações da tipologia florestal em um contexto espacial. Para tal todas as parcelas foram subdivididas em unidades de dimensões iguais (10 m x 50 m), coincidindo com o menor transecto realizado a campo (SSI).

Além das análises anteriores, foi realizada a caracterização estrutural das unidades amostrais, por intermédio do emprego das variáveis biofísicas de fácil medição e consideradas fundamentais na determinação da biomassa arbórea acima do solo (*DAP* e *HT*). Adicionalmente, foi empregado o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov, com o intuito de detectar diferenças entre a estrutura dos grupos florísticos formados pelo agrupamento de suas unidades amostrais.

Na análise florestal, como usualmente proposto em literatura, foram realizadas três suposições principais a respeito do comportamento do conjunto de dados analisados: (1) se cada observação possui independência em relação à outra; (2) se a variável dependente deve ser normalmente distribuída nos tratamentos; e (3) se as variâncias dos diferentes tratamentos devem ser homocedásticas (iguais). No cumprimento das três suposições, foram utilizados os testes de Moran (ANSELIN, 1996), Lilliefors (LILLIEFORS, 1967) e Bartlett (ZWILLINGER e KOKOSKA, 1999).

4.2 Análise exploratória dos dados ALOS/PALSAR

Com o advento da polarimetria tornou-se possível separar contribuições de espalhamento com diferentes naturezas, associadas a mecanismos físicos. Baseado nisso, foram efetuadas análises exploratórias, com o intuito de avaliar a sensibilidade das técnicas polarimétricas decorrentes da variação florístico-estrutural existente entre as fitofisionomias avaliadas.

De acordo com a premissa de que variações de comportamento do dossel florestal, ou seja, variações das propriedades biofísicas podem ter influência direta no comportamento do sinal do radar foi realizada a primeira análise exploratória, onde os valores percentuais de fração de abertura do dossel foram relacionados com o

retroespalhamento, o coeficiente de variação em todas as polarizações, bem como as razões de polarização cruzada e paralela.

Na segunda análise exploratória foi analisado o comportamento da diferença de fase, bem como os valores da direção média e o seu desvio padrão circular, como forma de tentar distinguir o espalhamento oriundo das diferentes fitofisionomias analisadas (diferentes superfícies). Nessa fase, foram analisadas todas as unidades amostrais constituintes das amostras de treinamento ($n = 33$).

A terceira análise exploratória constitui-se na resposta de polarização paralela de cada unidade amostral, constituinte das amostras de treinamento, descrito em van Zyl et al. (1987), e melhor fundamentado na seção 2. Esta representação foi plotada graficamente, levando em conta a seção cruzada de radar de um alvo qualquer (σ), plotada em um gráfico de três dimensões, como função de todas as combinações possíveis dos ângulos de orientação (ψ) e elipticidade (χ) da elipse de polarização (Figura 2.2). Ainda, para facilitar as comparações entre estas os plots foram normalizados para um intervalo de intensidade de 0 – 1.

Foi utilizado o valor médio, no formato complexo (parte real e imaginária), do conjunto de todos os pixels que compõe a área de influência de cada unidade amostral, para a construção da resposta de polarização. As superfícies resultantes foram comparadas visualmente e os seus resultados foram interpretados baseando-se naqueles obtidos na etapa de caracterização das unidades amostrais.

Por fim, como análises complementares foram extraídos dos *pixels* e plotados no espaço de classificação bidimensional ($H, \bar{\alpha}$), os valores de entropia e ângulo alfa médio, introduzido por Cloude e Pottier (1997), referentes às 35 unidades amostrais do IF₂₀₀₇. Nesta técnica de decomposição de alvos, os mecanismos de espalhamento são plotados em um espaço bidimensional, divididos em 9 zonas distintas (Figura 2.7). O significado físico associado a estes atributos é elucidado em maiores detalhes na fundamentação teórica (seção 2.2).

Após a geração da classificação, foram avaliadas as diferenças significativas entre as classificações, conforme adotado em Santos e Gonçalves (2008), pois é esperado que existam diferenças decorrentes das características florístico-estruturais variadas das unidades amostrais, que conseqüentemente produziriam resultados diferentes nesta classificação por decomposição de alvos.

Após a inclusão da resposta SAR para cada fitofisionomia no espaço bidimensional $(H, \bar{\alpha})$, as classificações resultantes foram comparadas aos pares utilizando técnicas de análise de regressão linear (FREESE, 1964; NETER et al., 1996). Primeiramente, um modelo de regressão linear foi ajustado para cada par de classificações pela regressão do número percentual de pixels classificados em cada zona do plano $(H, \bar{\alpha})$. Os coeficientes da regressão estimada foram então testados para checar se há relação linear entre os resultados de um dado par de classificações, e se a linha ajustada passa a 45° através da origem, utilizando-se respectivamente os testes F de $b_1 = 0$ versus $b_1 \neq 0$; teste t de $b_0 = 0$ versus $b_0 \neq 0$; e o teste t de $b_1 = 1$ versus $b_1 \neq 1$; onde b_0 e b_1 são os coeficientes da regressão. Os resultados obtidos servem como um indicativo da diferença significativa, ou não, de duas classificações testadas ao nível de significância de 5%, avaliando-se dessa forma, o desempenho da técnica para discriminação entre dois tipos de fitofisionomias.

A realização de todas as análises exploratórias foi utilizada com o fim de confrontar os seus resultados com os da caracterização das unidades amostrais, utilizadas em conjunto com as demais análises exploratórias supracitadas.

4.3 Modelagem de biomassa arbórea acima do solo

Buscando avaliar o potencial dos dados ALOS/PALSAR L na estimativa da biomassa arbórea acima do solo, foi empregado o método estatístico de análise de regressão pelo ajuste de modelos. Isso foi feito com um processo auto-regressivo de primeira ordem para a predição da variável dependente Y das diferentes fitofisionomias, com base na equação abaixo:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad 4.7$$

em que: Y_i = variável dependente na i-ésima observação; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{p-1}$ = parâmetros do modelo; $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{i,p-1}$ = valores das $p-1$ variáveis explicativas na i-ésima observação; ε_i = termo de erro aleatório* com média $E\{\varepsilon_i\} = 0$ e variância $\sigma^2\{\varepsilon_i\} = \sigma^2$ (*média zero e variância constante).

Para o ajuste do modelo final foram utilizados dados das unidades amostrais dos IF₂₀₀₅ e do IF₂₀₀₇, sorteados aleatoriamente (33 observações), correspondentes a mais de 80% das observações possíveis para as amostras de treinamento, conforme sugerido por

NETER et al. (1996). Para isto, o conjunto de variáveis explicativas correspondeu ao valor médio dos atributos polarimétricos extraídos sobre cada área de interesse. A delimitação de cada unidade amostral e posterior extração foi baseada na sua localização em coordenadas geográficas e, posteriormente, transformada na projeção cartográfica da imagem reamostrada, descritas detalhadamente na seção 3.3.

Para a extração dos atributos PolSAR, as regiões de interesse (ROIS) foram inseridas na imagem e os valores referentes a cada uma foram posteriormente exportados e organizados em planilha eletrônica. Com o intuito de mitigar os efeitos decorrentes do erro de posição da ortorretificação dos dados, foi aplicado um *buffer* externo às unidades amostrais com distância similar ao erro de posicionamento verificado (seção 3.3). Com isso, garante-se que as unidades delimitadas em campo forneçam os correspondentes valores na recuperação de seus atributos polarimétricos.

As análises de regressão foram baseadas na literatura constante em Neter et al. (1996). Primeiramente, na análise exploratória dos dados foram utilizados os diagramas de dispersão e matrizes de correlação para verificar a tendência, a força e principalmente a natureza das relações entre as variáveis independentes e dependente, bem como a relação entre as próprias independentes. Para verificar a ocorrência de possíveis *outliers* também foram utilizados diagramas de dispersão.

A obtenção do modelo final foi realizada por intermédio da obtenção dos melhores subconjuntos de variáveis explicativas, com técnicas de seleção baseadas no coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajustado}) e no Cp Mallow, analisados conjuntamente com o quadrado médio dos resíduos (QMR). Em sua seleção foram consideradas todas as possíveis regressões geradas, na geração de modelos preditivos, com um número pré-determinado de parâmetros. Após esta etapa exploratória, foi realizado o refinamento do modelo previamente selecionado por intermédio da avaliação da presença de efeitos de interação, realização de diagnóstico de multicolinearidade, análise de *outliers* e análise de resíduos.

Partindo da premissa de que a biomassa é uma medida direta do potencial produtivo da floresta e também da possibilidade de geração de modelos preditivos de fácil aplicação, não foram consideradas transformações nas variáveis independentes e também na variável dependente.

No exame da presença de efeitos de interação de todas as variáveis explicativas de todos os modelos previamente selecionados foi realizado o seu ajuste, onde os respectivos resíduos foram plotados contra cada termo da interação na análise dos seus padrões resultantes. A avaliação da detecção da presença de multicolinearidade é baseado nas definições de Neter et al. (1996) e Sá (2007) por intermédio do cálculo dos fatores de inflação da variância (VIF). Com base nesta literatura, no presente estudo considerou-se que valores superiores a 10 eram indicativos de multicolinearidade e que provavelmente, poderiam influenciar em excesso às estimativas de mínimos quadrados.

Os testes formais para a identificação dos *outliers* em X e Y foi realizada por intermédio da utilização dos resíduos excluídos padronizados e dos valores de Leverage da matriz Hat (NETER et al., 1996; RENCHER e SCHAALJE, 2007). Para X foram considerados *outliers*, as observações com valor de Leverage superior a $2p/n$. Ao passo que, para Y foram considerados *outliers* as observações com valor de resíduo excluído padronizado superior ao seu respectivo valor crítico $t(1-\alpha/2n; n-p-1)$, baseando-se no procedimento de Bonferroni (onde p = número de observações e α = nível de significância) (RENCHEER e SCHAALJE, 2007). Para a determinação condicional da influência dos *outliers* encontrados nas regressões ajustadas, foi utilizada a medida de influência denominada distância de Cook (NETER et al., 1996; RENCHER e SCHAALJE, 2007; SÁ, 2007). Utilizando-se esta medida, a qual considera a influência da i -ésima observação em todos os valores ajustados, foi utilizada a distribuição F ($p, n-p$) na determinação de cada valor percentil correspondente. Com isso, foram considerados como *outliers* influentes os que apresentaram valor percentil superior a 50%.

Na investigação da aptidão do modelo selecionado foi realizada uma análise de seus resíduos com o emprego de gráficos, diagramas e testes formais. Já a variância dos resíduos referente ao modelo final foi avaliada com diagramas de dispersão dos seus resíduos e os valores ajustados, bem como com o teste de Levene modificado para comparar a sua variância residual (NETER et al., 1996; SÁ, 2007). Estes mesmos diagramas também foram empregados na avaliação da função linear gerada, ou seja, se esta se apresenta adequada aos dados. Os gráficos de probabilidade normal e o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO et al., 1968), foram utilizados para a verificação da normalidade dos resíduos. Complementarmente, foi realizada por intermédio da estatística de Moran e de seu diagrama (ANSELIN, 1996), a análise da medida da autocorrelação espacial a partir do produto dos desvios dos resíduos em relação à média

(RAMOS, 2002), o qual indica o grau de associação espacial global presente no conjunto de dados. Estes cálculos referem-se a uma matriz de proximidade espacial baseada nos dois vizinhos mais próximos de cada observação. Para a avaliação de sua significância, foi construída uma pseudo-distribuição empírica através de 999 permutações aleatórias dos valores obtidos para os resíduos.

O processo de validação do modelo selecionado foi segmentado em três métodos distintos. No primeiro método, a precisão das predições do modelo foi avaliada com a utilização da soma dos quadrados da predição (PRESS value) (NETER et al., 1996; RENCHER e SCHAALJE, 2007). Este valor é obtido por intermédio da estimativa da biomassa arbórea acima do solo para cada observação a partir do ajuste da função com as $n-1$ observações restantes. O cálculo deste valor foi realizado para ser comparado à SQR do modelo ajustado com todas as n observações possíveis. Conforme Neter et al. (1996), quando o valor PRESS possui valor próximo à soma do quadrado dos resíduos (SQR), o seu respectivo quadrado médio dos resíduos (QMR) é considerado um indicador mais adequado da capacidade de predição do modelo, além de ser considerado por Rencher e Schaalje (2007) uma melhor medida do que o SQR de como será o modelo por meio da predição de futuras observações.

Na análise da capacidade preditiva do modelo, o segundo método constitui-se na avaliação de sua predição com um conjunto de dados independentes. Este procedimento foi segmentado em duas fases distintas, os quais correspondem primeiramente a aplicação do modelo na estimativa da biomassa arbórea acima do solo das 8 unidades amostrais do modelo de validação (selecionadas com o intuito de representar todas as fitofisionomias). Em paralelo, foi computado para cada unidade amostral do modelo de validação um intervalo de predição com nível de confiança de 95%. Estes resultados encontrados foram interpretados e comparados com os valores de biomassa arbórea acima do solo, obtidos com os dados de inventário florestal.

No terceiro método, para a análise da eficácia preditiva do modelo foi gerado um modelo com todas as observações possíveis ($n = 41$), constituído das amostras de treinamento ($n = 33$) e validação ($n = 8$), com intuito de analisar os coeficientes dos modelos e seus respectivos desvios-padrão e compará-los ao modelo selecionado composto apenas das amostras de treinamento.

Com o intuito de facilitar o entendimento dos procedimentos realizados para a análise da interação sinal SAR (atributos polarimétricos) com as diferentes fitofisionomias, e

geração do modelo de biomassa, a Figura 4.1 mostra de forma elucidativa a sequência realizada no trabalho.

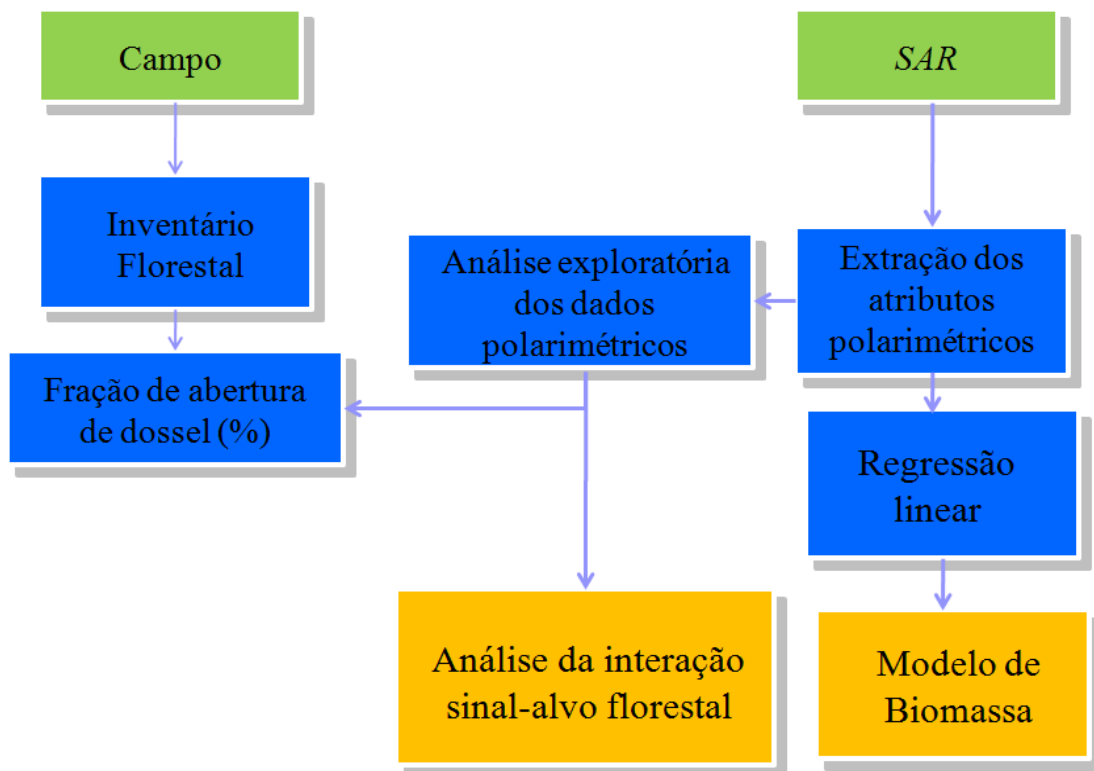


Figura 4.1 – Metodologia empregada para a análise da interação sinal SAR-alvo florestal e geração do modelo de biomassa para as fitofisionomias em análise.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da Cobertura Florestal

Nos 13,1 hectares amostrados em todas as fitofisionomias avaliadas, foram encontrados 6.821 indivíduos arbóreos, distribuídos em 57 famílias botânicas, compostas por 196 espécies. Em adição, somente 0,62% dos indivíduos foram identificados apenas pelo nome comum.

A suficiência amostral foi determinada pela elaboração da curva espécie-área, apresentada na Figura 5.1, indicando uma tendência de estabilização de recrutamento de novas espécies a partir de 3 ha. Embora haja a necessidade de grandes extensões amostrais em inventários florestais na Amazônia, como discutido em Jardim e Hosokawa (1986), a considerável redução no aparecimento de novas espécies com a inclusão de novas parcelas, a intensidade amostral do IF₂₀₀₇ (13,1 ha) mostrou-se plenamente satisfatória para representar a composição florística da área em estudo.

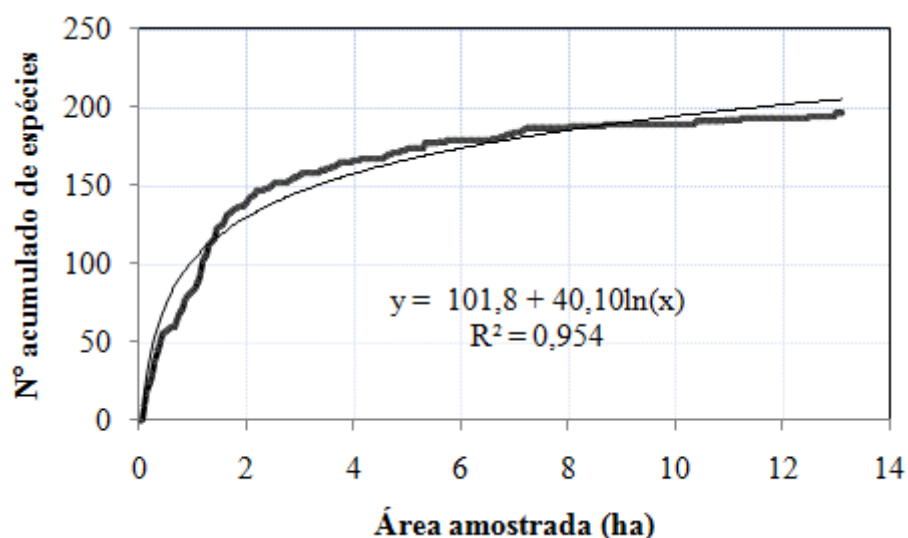


Figura 5.1 – Comportamento da curva espécie área obtida da amostragem no IF₂₀₀₇.

O valor de diversidade florística obtido por intermédio do índice de Shannon-Weaver de $H' = 4,48$ indicou alta diversidade florística local, ao passo que a equabilidade de Pielou apresentou valor de 0,85, indicando a existência de uma elevada diversidade florística, para as diferentes fitofisionomias analisadas. Almeida et al. (1993) constataram que esta elevada diversidade está diretamente relacionada com a alta porcentagem de espécies raras, o qual contribui significativamente para o aumento da diversidade local. Desta forma, o elevado índice de espécies consideradas raras neste estudo pode explicar, em parte, o alto valor de diversidade encontrado. Os resultados obtidos se assemelham com

aqueles relatados na região da Floresta Nacional do Tapajós (CARVALHO, 1982; ESPÍRITO-SANTO et al., 2005; OLIVEIRA, 2005; GONÇALVES e SANTOS, 2008).

Analisando a Figura 5.2 é possível concluir que o povoamento florestal estudado foi caracterizado por uma alta concentração de indivíduos arbóreos em um pequeno número de famílias botânicas. Da totalidade de indivíduos inventariados (6.821 indivíduos), 4087 indivíduos (60%) são pertencentes somente pelas famílias citadas nesta figura, representadas pelos maiores valores de IVI das dez famílias amostradas, em ordem decrescente.

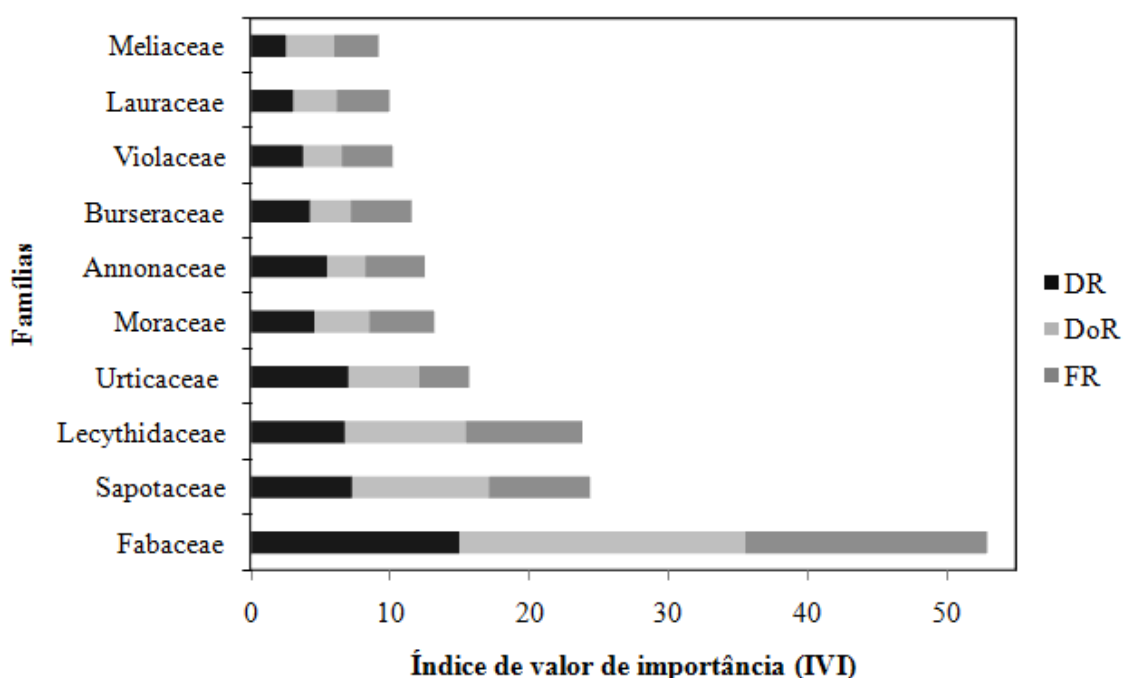


Figura 5.2 – Composição do índice de valor de importância – IVI para as espécies com maiores valores de IVI amostradas no IF₂₀₀₇.

Neste estudo, foi constatado que um pequeno número de famílias botânicas (apenas 7) contribuiu com 49% do total de espécies encontradas, como segue: Fabaceae (42), Moraceae (13), Lecythidaceae (9), Apocynaceae (8), Euphorbiaceae (8), Lauraceae (8), Malvaceae (8). Este padrão é frequentemente encontrado em estudos realizados para florestas naturais tropicais de terra firme na Amazônia (CARVALHO, 1982; ESPÍRITO-SANTO et al., 2005; SOUZA et al., 2006; GONÇALVES e SANTOS, 2008 e SILVA et al., 2008). Estes autores citam que poucas famílias botânicas representam grande parte da riqueza florística na região, caracterizando padrão semelhante em termos de riqueza florística ao encontrado, relatando haver a predominância das famílias Fabaceae, Moraceae, Lecythidaceae, dentre outras em relação à diversidade e número

de indivíduos. A importância da família Fabaceae é evidenciada, mesmo em outros trechos de floresta tropical, como na Floresta Estacional Pteridófila, no norte do Mato Grosso (KUNZ et al., 2008), sendo a mais representativa em termos de riqueza, detendo 16% do total de espécies. Adicionalmente, observou-se que 41,5% das famílias contribuíram com apenas 1 espécie, caracterizando-se como espécies localmente raras. Este alto valor de espécies consideradas localmente raras está diretamente relacionado com a diversidade das comunidades arbóreas, ou seja, a alta porcentagem de espécies raras contribui significativamente para o aumento da diversidade local (ALMEIDA et al., 1993). Dessa forma, esta observação pode explicar, em parte, o valor elevado de diversidade encontrado.

Para uma representação completa do povoamento analisado, são apresentados na Tabela A.1 do apêndice A os parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas, divididas em ordem alfabética de famílias e em ordem decrescente de índice de valor de importância relativo (%) em todas as fitofisionomias analisadas. Nesta Tabela, foi possível constatar que as 6 espécies com maior IVI dentre todas as fitofisionomias analisadas foram *Pouteria* sp. 1 (abiu), *Protium apiculatum* (breu), *Cecropia leucoma* (embaúba branca), *Inga* sp. (ingá), *Rinorea guianensis* (aquariquarana), *Gutteria poeppigiana* (envira preta). Tais espécies geralmente são as mais representativas nos estudos realizados em floresta ombrófila densa de terra firme como citado nos estudos de Souza et al. (2006) e Gonçalves e Santos (2008). No entanto, em trabalhos que analisam variações sucessionais na floresta *Cecropia leucoma* apresenta valores significativos de importância (ESPÍRITO-SANTO et al., 2005), sendo que as espécies supracitadas representam 23,16% da densidade total observada neste estudo. A contribuição elevada de espécies com apenas 1 indivíduo (17 espécies – 8,7% do total), ou seja, considerada espécies localmente raras, são condizentes com o esperado para esta tipologia florestal, pois estudos como o de Silva et al. (2008) citam e comprovam este tipo de comportamento, indicando que estas são dizimadas e os habitats associados a elas são modificados por ações antrópicas, afetando a resistência e a resiliência dos ecossistemas locais.

A determinação da estrutura diamétrica é mostrada na Figura 5.3, onde a distribuição da totalidade de indivíduos arbóreos, foi dividida em classes de diâmetro com intervalos de 5 cm. Sua estrutura seguiu o padrão próximo de J-invertido, usual para florestas inequidâneas, demonstrando a existência de um balanço entre o recrutamento e a

mortalidade de árvores em suas classes diamétricas. Longhi (1980) observou que esse tipo de distribuição garante que o processo dinâmico da floresta se perpetua, pois a súbita ausência de indivíduos dominantes dará lugar para as chamadas “árvores de reposição”. A estrutura diamétrica da floresta caracteriza-se por árvores de pequeno porte nas menores classes de diâmetro, indicando tendência de distribuição balanceada. Isto se deve, conforme Souza et al. (2006) e Carvalho e Nascimento (2009) a capacidade de regeneração das espécies vegetais. Nesta Figura, foi possível verificar uma grande concentração de indivíduos nas menores classes diamétricas (93,16% dos indivíduos até o limite de 35 cm), com uma redução dessa concentração nas maiores classes de diâmetro.

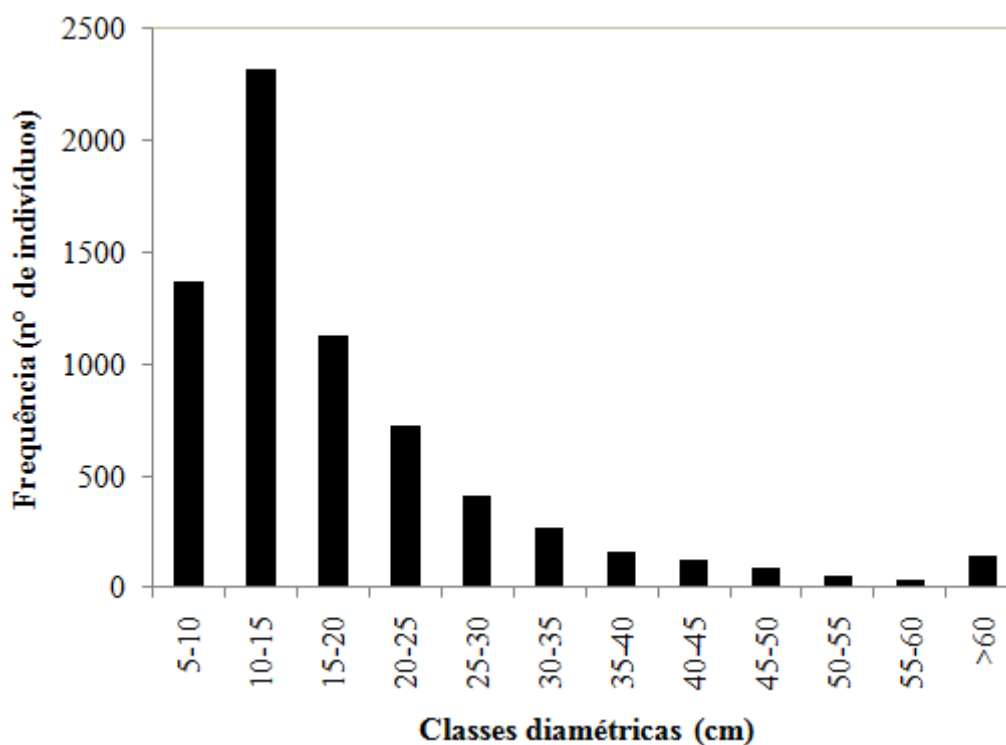


Figura 5.3 – Distribuição diamétrica da totalidade de indivíduos arbóreos inventariados no IF₂₀₀₇.

Os valores referentes à capacidade produtiva do povoamento florestal analisado foram de 520,7 árvores.ha⁻¹ (densidade total), 21,67 ± 2,15 m².ha⁻¹ (área basal média) e 116,55 ± 74,57 t.ha⁻¹.ha (biomassa arbórea acima do solo). É importante salientar que a ampla variação dos dados de biomassa e o menor número de indivíduos na primeira classe diamétrica analisada é decorrente do espectro de análise, composta de todas as tipologias florestais. Os valores de área basal média são semelhantes ao estudo realizado por Gonçalves e Santos (2008) em área com exploração madeireira ($G = 22,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), todavia a densidade total do povoamento foi inferior (369 árvores.ha⁻¹), pois o balanço entre a retirada de espécies de interesse comercial e consequente diâmetro elevado e o

recrutamento de espécies das classes inferiores para as classes diamétricas passíveis de extração provam que o povoamento possui menor densidade e árvores mais desenvolvidas do ponto de vista estrutural, com relação a análise do remanescente florestal decorrente da grande variação tipológica em questão.

5.2 Caracterização das unidades amostrais

5.2.1 Análise Florística

Na Figura 5.4 é apresentada a classificação dos grupos formados pela totalidade das unidades amostrais seguindo o método de classificação TWINSpan (HILL, 1979). Houve a formação de três grandes grupos, divididos de acordo com a preferência de determinado agrupamento de espécies em relação às características ambientais existentes na área de estudo.

A classificação das unidades amostrais em grupos se deu da seguinte forma: a primeira divisão, com autovalor de 0,4144 mostrou que houve diferenciação entre elas, de acordo com o tipo de cobertura analisado por ocasião do inventário. A formação desse grande grupo ecológico mostrou que existe similaridade florística para as parcelas de floresta primária e grande parte das florestas com exploração madeireira de baixa intensidade de intervenção (Grupo Ecológico 1) em relação as demais parcelas, compostas principalmente pelos estágios de sucessão (SSA, SSInt e SSI), indicando a existência de um grupo com espécies menos desenvolvidas do ponto de vista estrutural.

O gênero *Pouteria* sp. foi o indicador do G-1, descrita por Monteiro et al. (2007) como mais freqüente na região amazônica, de lenho pardo-rosado-claro, considerado um gênero de importância econômica, entretanto ainda pouco estudado.

Por outro lado, espécies como *Guatteria poeppigiana*, *Cecropia leucoma*, *Jacaranda copaia* e *Bagassa guianensis* foram as espécies indicadoras do grupo formado pelos estágios de sucessão menos avançados e também em áreas de exploração madeireira. Essas espécies possuem caráter colonizador de áreas abertas, decorrentes dos efeitos da derrubada de árvores de valor comercial e das trilhas de arraste.

A segunda divisão, com autovalor de 0,2257 mostrou não ser suficiente para a formação de grupos ecológicos - valores inferiores a 0,30 não são considerados suficientes para explicar as variações ocorrentes na natureza (KENT e COKER, 1992) -, tendo sido desconsideradas para a análise.

Já a terceira divisão, com autovalor de 0,3191 mostrou uma forte separação das unidades amostrais pertencentes a estágios de sucessão menos desenvolvidos em dois grupos ecológicos, um com unidades pertencentes a estágios de sucessão menos avançados (SSI e SSInt) e florestas com exploração madeireira (Grupo ecológico 2 – G2) e outro formado basicamente por unidades amostrais de sucessão secundária avançada (Grupo ecológico 3 – G3).

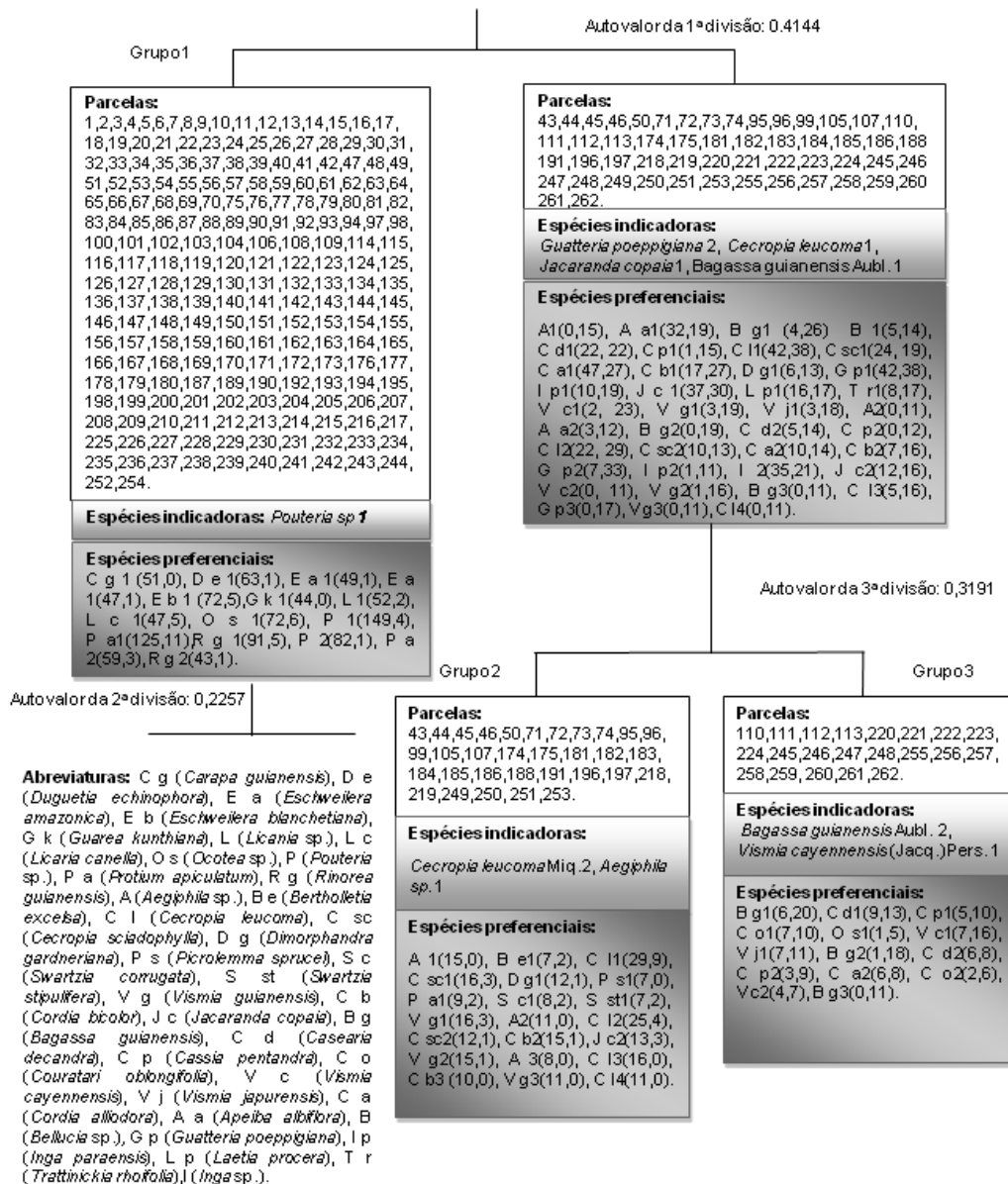


Figura 5.4 - Agrupamento das parcelas amostrais pelo método de classificação TWINSpan ('Two Way Indicator Species Analysis'), caracterizando os ambientes internos das tipologias florestais na Floresta Ombrófila Densa.

O grupo ecológico 2 teve como espécies indicadoras *Cecropia leucoma* e *Aegiphila* sp.. A espécie *Cecropia leucoma* é descrita por Carvalho (1992) como pioneira, colonizadora de áreas degradadas e por apresentar ciclo de vida curto, possuindo alta

taxa de mortalidade. A espécie *Aegiphila* sp., (tabaco-bravo) é pioneira, colonizadora de regiões com forte interferência humana, encontrada facilmente via banco de sementes (estoque de sementes no solo) e/ou por chuva de sementes (transporte propágulos, resultante de processos de dispersão) (SIQUEIRA e MESQUITA, 2007), indicando ser o grupo menos desenvolvido do ponto de vista ecológico. Ao analisar os dados do inventário é possível constatar que *Cecropia leucoma* (embaúba-branca) apresentou alta densidade de indivíduos nas parcelas de FEM em áreas abertas pelo corte seletivo. Portanto, o processo de colonização da espécie provavelmente é decorrente da maior quantidade de luz incidente nessas clareiras.

Aegiphila sp. esteve presente somente nas parcelas de SSI e SSInt, mostrando que tal espécie é pioneira, de caráter colonizador, formando um ambiente propício para o surgimento de novas espécies em estágio evolutivos mais avançados.

As espécies indicadoras do grupo 3 (G3) foram *Bagassa guianensis* e *Vismia cayennensis*. De acordo com Maués et al. (2007) *Bagassa guianensis* é descrita como uma espécie arbórea pioneira e dióica, conhecida popularmente como tatajuba, encontrada em toda bacia Amazônica, mostrando que apesar de ser pioneira apresenta um ciclo de vida longo, favorecendo o aparecimento de espécies em estágios evolutivos mais avançados (BERG, 2001). *Vismia cayennensis*, no estudo de Costa (2000) é considerada uma espécie intolerante a sombra (lacre-branco), caracterizando sua condição de espécie pioneira, típica de áreas que sofreram intervenção antrópica. Apesar desse grupo florístico apresentar espécies de caráter evolutivo incipientes, constatou-se que *Bagassa guianensis* e *Vismia cayennensis* foram espécies ocorrentes em abundância somente nas parcelas de SSA, comprovando o ciclo de vida longo dessas duas espécies pioneiras características do grupo.

Na definição dos grupos ecológicos as espécies preferenciais servem, também para melhor caracterizar cada grupo, mostrando o número de parcelas onde ocorreu tal espécie. No caso do grupo ecológico 2 (G2), que apresentou *Bertholletia excelsa* 1 (Castanha-do-Pará) em sete parcelas de um lado da divisão (G2) e em duas parcelas do outro lado (G3), indicando ser uma espécie preferencial, neste caso pela não derrubada de indivíduos nas parcelas da região do grupo 2 para a extração do fruto da castanheira.

Com o intuito de demonstrar possíveis diferenças entre os grupos ecológicos formados, na Tabela 5.1 é apresentado, o número de indivíduos arbóreos, famílias e espécies

inventariadas, bem como o índice de Shannon-Weaver. Os grupos ecológicos formados diferiram em até 604 árvores por hectare, onde o grupo ecológico 1 (G1) foi o de menor densidade (431 árvores.ha⁻¹). As espécies *Cecropia leucoma* e *Vismia guianensis* (128,8 e 116,9 árvores.ha⁻¹, respectivamente), encontradas no grupo ecológico 2 (G2) foram as mais abundantes, dessa forma, influenciando no maior número de árvores por hectare desse grupo.

Tabela 5.1 - Composição da riqueza florística dos três grupos ecológicos formados. H' (índice de Shannon-Weaver).

Grupos	Árvores	Famílias	Espécies	H'
Grupo1	4491	47	190	4,46
Grupo2	1656	37	102	3,54
Grupo3	674	33	75	3,3

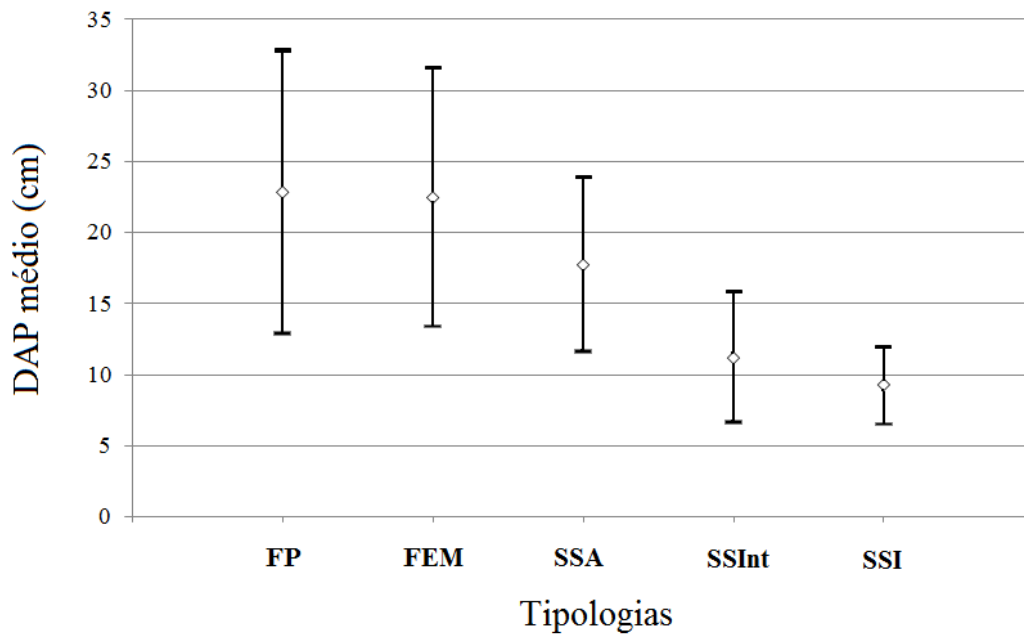
Com relação a sua riqueza florística, o G3 foi o de menor riqueza, tendo apresentado 75 espécies em 33 famílias, enquanto que o grupo com maior riqueza florística (G1) apresentou 190 espécies em 47 famílias botânicas.

Para todos os grupos florísticos analisados, o índice de Shannon-Weaver indicou apresentou alta diversidade florística local, considerando-se o valor mínimo de DAP de 5,0 cm. Com amplitude de variação dos valores de H' relativamente alta (máximo de 26 % em relação ao menor valor), o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov evidenciou que a distribuição dos valores médios referentes ao índice de diversidade de Shannon-Weaver do G1 foi estatisticamente diferente em relação ao G2 e G3 ($p < 0,05$), enquanto que os grupos G2 e G3 indicaram ser estatisticamente iguais. Portanto, é possível constatar que o G1 é o que possui a maior diversidade florística, decorrente principalmente da formação do grupo já que o mesmo é formado em sua maioria por unidades de floresta primária e grande parte das florestas com exploração madeireira de baixa intensidade de intervenção, possuindo maiores valores de H' (4,46), semelhantes aos valores encontrados nos estudos de Espírito-Santo et al. (2005) em áreas de floresta primária ($H' = 4,44$) e Gonçalves e Santos (2008) em áreas de exploração madeireira sustentável ($H' = 4,22$). Os valores menos expressivos de diversidade florística para os grupos G2 (SSI e SSInt e florestas com exploração madeireira) de 3,54 e para o G3 (SSA) já era esperado, pois tais valores são condizentes com ambientes que sofreram intervenção antrópica.

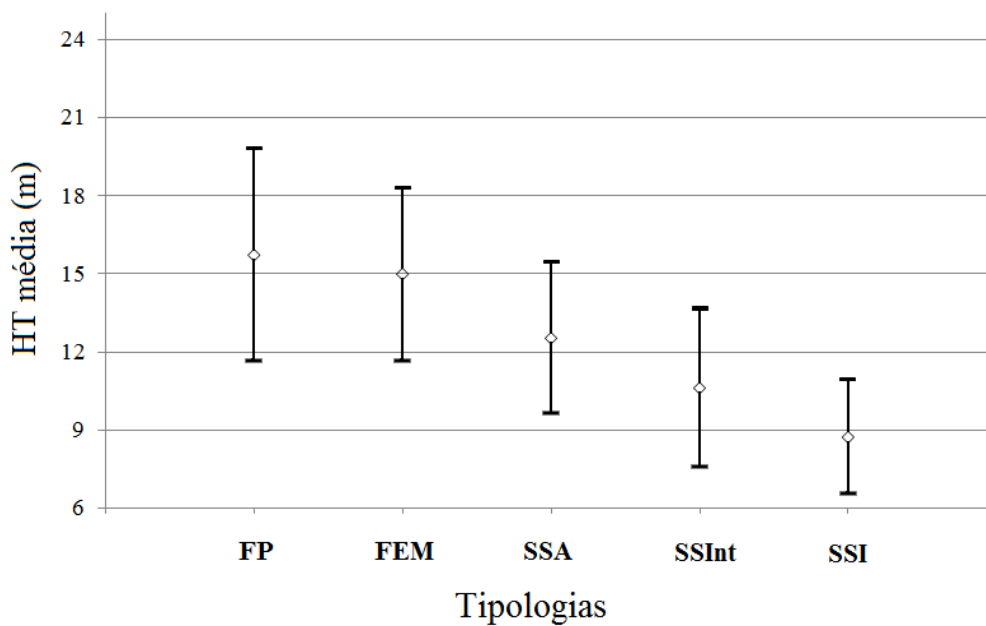
5.2.2 Análise Estrutural

O grau de diversidade biológica foi avaliado por intermédio dos resultados das médias de DAP e HT de cada fitofisionomia (tratamentos) na Figura 5.5a e b pelo teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov, com seus respectivos intervalos de confiança a 95%. Os valores médios das variáveis e biofísicas apresentaram amplitude de variação significativa (DAP = 13,55 cm; HT = 7 m) entre todos os grupos em análise. Aliado a esta amplitude de variação constatada, o teste não paramétrico K-S indicou a ocorrência de diferenças significativas nas funções densidade de probabilidade (fdp's) para a HT e o DAP ($p < 0,05$). O mesmo teste mostrou que as fdp's provêm de distribuições diferentes, tanto para a HT como para o DAP para todos os grupos analisados, ao nível de 5% de significância. Resultados similares foram encontrados no trabalho de Gonçalves e Santos (2008), porém os valores médios de DAP para áreas sob exploração madeireira não indicaram diferenças significativas. Houve diferença estatisticamente significativa entre as médias da HT para todos os grupos analisados em que o G1 ($15,00 \pm 5,64$ m) diferiu da média do G2 ($10,25 \pm 3,72$ m) e do G3 ($12,32 \pm 4,02$ m), além disso, houve diferença significativa entre os valores médios de G2 e G3. As mesmas diferenças também foram verificadas para o DAP, pois os valores médios do G1 ($21,35 \pm 15,22$ cm) diferiram da média dos demais grupos (G2 = $11,16 \pm 6,82$ cm; G3 = $17,22 \pm 7,84$ cm) e também entre G2 e G3.

As três suposições feitas a respeito da adequação do conjunto de dados, em relação à ANOVA indicaram a ausência de autocorrelação espacial entre os desvios em relação à média de todas as observações (observações vizinhas) de cada fitofisionomia (tratamento) ($p < 0,05$). Por intermédio do teste de *Lilliefors* foi observado que as variáveis biofísicas HT e DAP não se apresentam normalmente distribuídas nos tratamentos e que as variâncias dos diferentes tratamentos não poderiam ser as mesmas, utilizando-se o teste de *Bartlett*, ambos a 95% de significância.



(a)



(b)

Figura 5.5 - Teste K-S para as variáveis biofísicas DAP (a) e HT(b) das unidades amostrais do IF₂₀₀₇, representados pelo intervalo de confiança para a média, ao nível de 95%.

Ainda, na avaliação dos grupos ecológicos, e partindo do pressuposto de que há um decréscimo no diâmetro das árvores e, em consequência na estrutura da floresta, conforme pode ser visto em Merino et al. (2007), são apresentadas na Figura 5.6 as suas respectivas distribuições diamétricas, os valores médios de altura total por classe diamétrica (HT) e os valores estimados de biomassa arbórea acima do solo. De acordo com o teste K-S, a distribuição diamétrica e da altura total (HT) em suas respectivas

classes sugeriram a ocorrência de variabilidade significativa em seus padrões estruturais, como já era esperado levando-se em consideração o espectro de análise.

O grupo 1 (G1) foi o que apresentou o componente arbóreo com estrutura mais desenvolvida, além dos maiores valores de biomassa arbórea acima do solo ($179,89 \pm 71,23 \text{ t.ha}^{-1}$). Na distribuição deste grupo pôde-se visualizar, em comparação com os demais, um maior balanceamento das frequências entre as diferentes classes de *DAP*, com uma concentração de árvores menos acentuada nos primeiros intervalos diamétricos. Em contrapartida, o Grupo 2 (G2) foi o que se mostrou menos desenvolvido do ponto de vista estrutural, pois a maior concentração de indivíduos deu-se nas primeiras classes diamétricas (98,91% até o limite de 35 cm) e o menor valor de biomassa arbórea acima do solo ($66,18 \pm 32,31 \text{ t.ha}^{-1}$). Ao analisar o terceiro grupo (G3) foi possível constatar que o mesmo possui características estruturais intermediárias em relação aos demais grupos analisados.

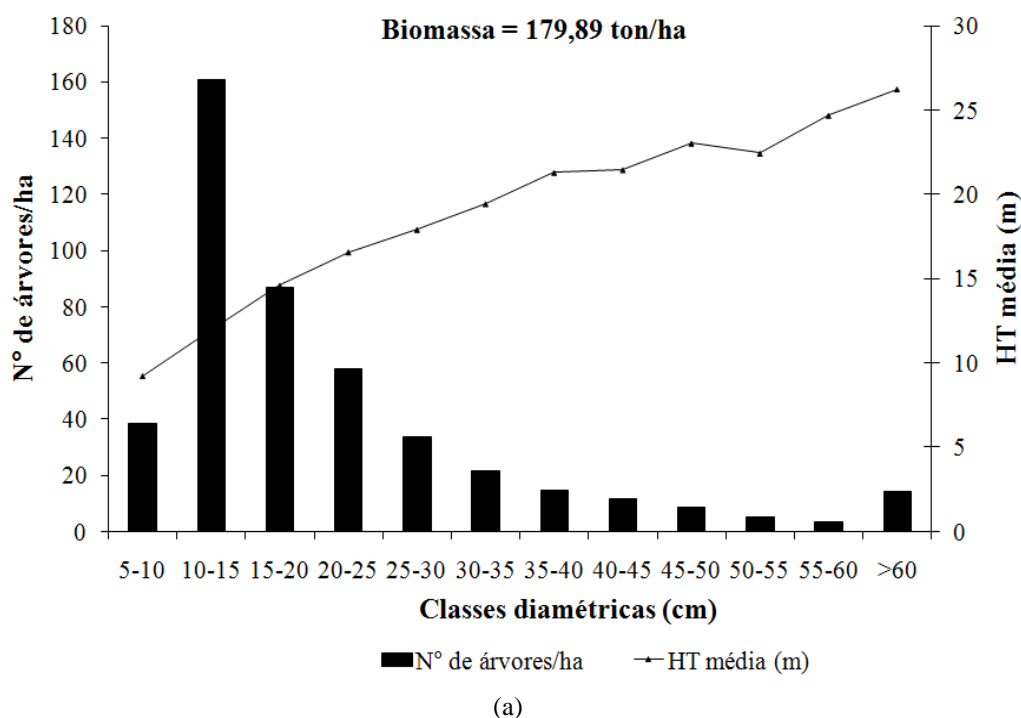
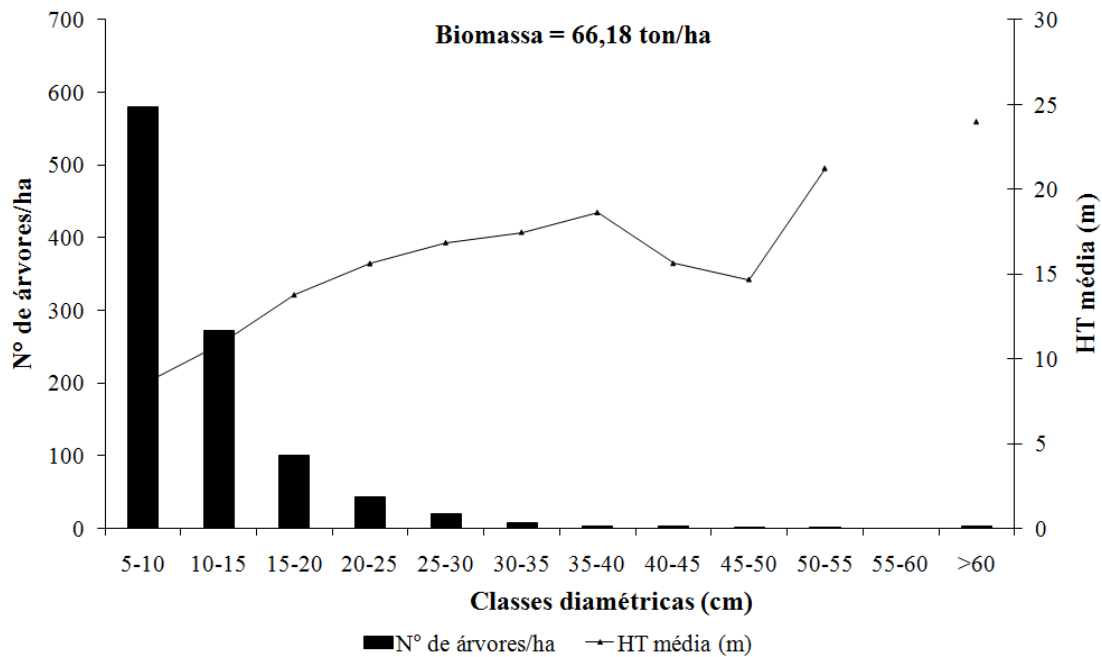
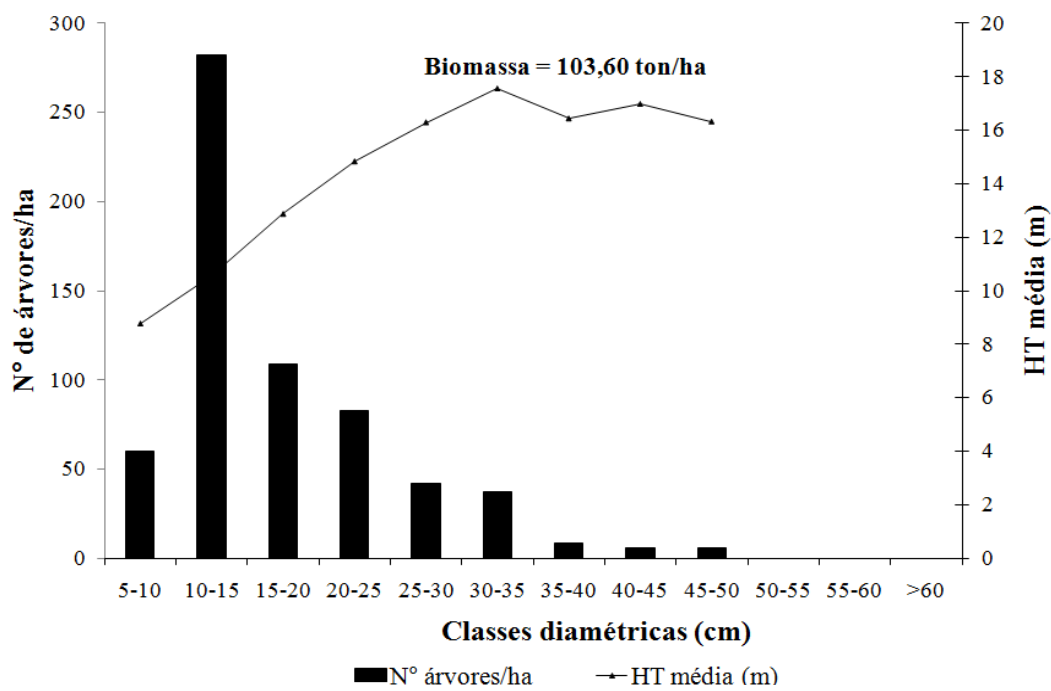


Figura 5.6 - Distribuição diamétrica, valores médios de HT por classes de *DAP* e valores de biomassa arbórea acima do solo estimados para os grupos ecológicos G1 (a), G2 (b) e G3 (c).

(continua)



(b)



(c)

Figura 5.6 – Conclusão.

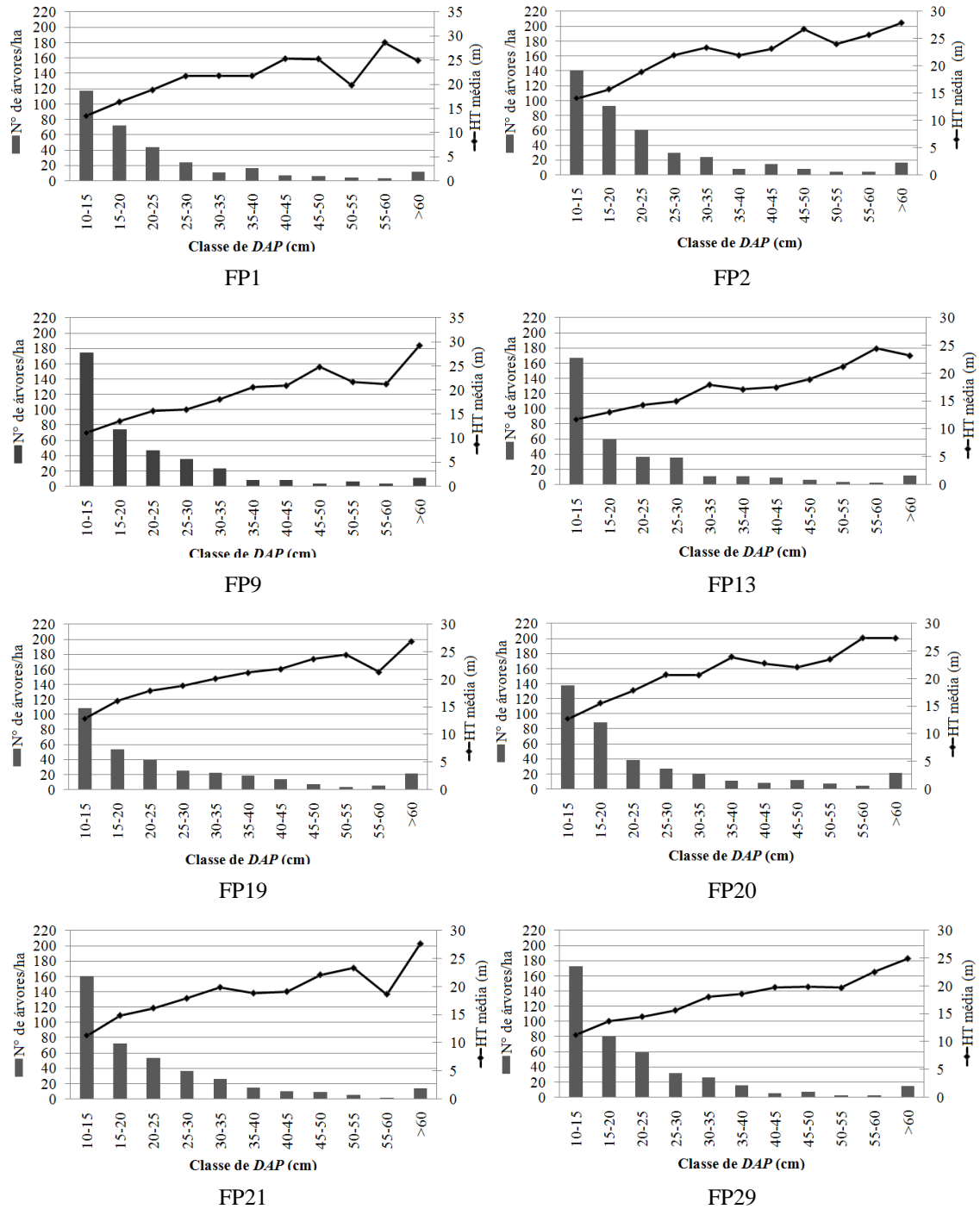
Apesar de haver uma grande concentração de indivíduos nas primeiras classes diamétricas (96,84% até o limite de 35 cm), essa foi menos evidente que a do grupo intermediário, evidenciada pelo maior número de indivíduos nas classes diamétricas superiores (indivíduos maiores do que 35 cm), comprovado pelo maior valor de biomassa arbórea acima do solo (103,60 t.ha⁻¹).

Na análise da HT os valores médios superiores para o grupo mais desenvolvido estruturalmente (G1) já era esperado, devido ao fato desse grupo possuir uma distribuição mais homogênea em sua estrutura horizontal. Ou seja, os indivíduos arbóreos com DAP entre 40 e 60 cm apresentaram, em média, maiores alturas totais do que aquelas observadas nos demais grupos formados, exceto na classe 45-50 cm encontrado no G2, com apenas 1 indivíduo.

As diferenças relatadas são resultantes da composição florística específica do G1. Como mostrado no dendrograma da Figura 5.4, esse grupo apresentou uma composição florística distinta dos demais grupos, evidenciada pelo agrupamento de parcelas em sua maioria de FP e FEM antiga e de baixo impacto. Alia-se ainda o fato do grupo ser formado por coberturas florestais mais desenvolvidas sob ponto de vista estrutural (FP e FEM).

No que diz respeito ao G2 (66,18 t.ha⁻¹), cabe ainda ressaltar que apesar deste grupo apresentar estrutura diamétrica relativamente similar ao G3 – parcelas de SSA - (103,60 ± 41,54 t.ha⁻¹), o G2 demonstrou ser o grupo de maior diversidade de tipologias (SSI, SSInt e algumas parcelas de FEM), obtendo-se o maior coeficiente de variação para a biomassa com relação a todos os grupos analisados.

Para o entendimento de como as variações estruturais da floresta nas diferentes fitofisionomias associadas as suas condições de sítio se comportam, são apresentadas na Figura 5.7 as respectivas distribuições diamétricas e os valores médios de HT por classe de DAP. Como pode ser observado nas análises estruturais anteriores, houve diferenças estatísticas significativas entre o DAP médio das unidades, demonstrando variabilidade nos seus padrões estruturais. Como era esperado, as tipologias analisadas apresentam comportamento distinto entre elas, devido às diferentes condições de desenvolvimento e de sítio. Dado ao que foi exposto, as diferenças estruturais serão analisadas dentro de cada tipologia. A estrutura mais desenvolvida das árvores nas unidades FP19, FEM15, SSA30, SSA33, SSInt3, SSInt17 e SSI28 demonstrou que suas distribuições, comparando-se com as demais, possuem um maior balanceamento de frequências entre as diferentes classes de DAP, com menor concentração de indivíduos nas classes iniciais de diâmetro.



(a)

Figura 5.7 – Distribuição diamétrica das unidades amostrais do IF₂₀₀₇ e os respectivos valores médios de HT por classe de DAP para floresta primária (a), floresta com exploração madeireira (b), sucessão secundária avançada (c), sucessão secundária intermediária (d) e sucessão secundária inicial (e).

(continua)

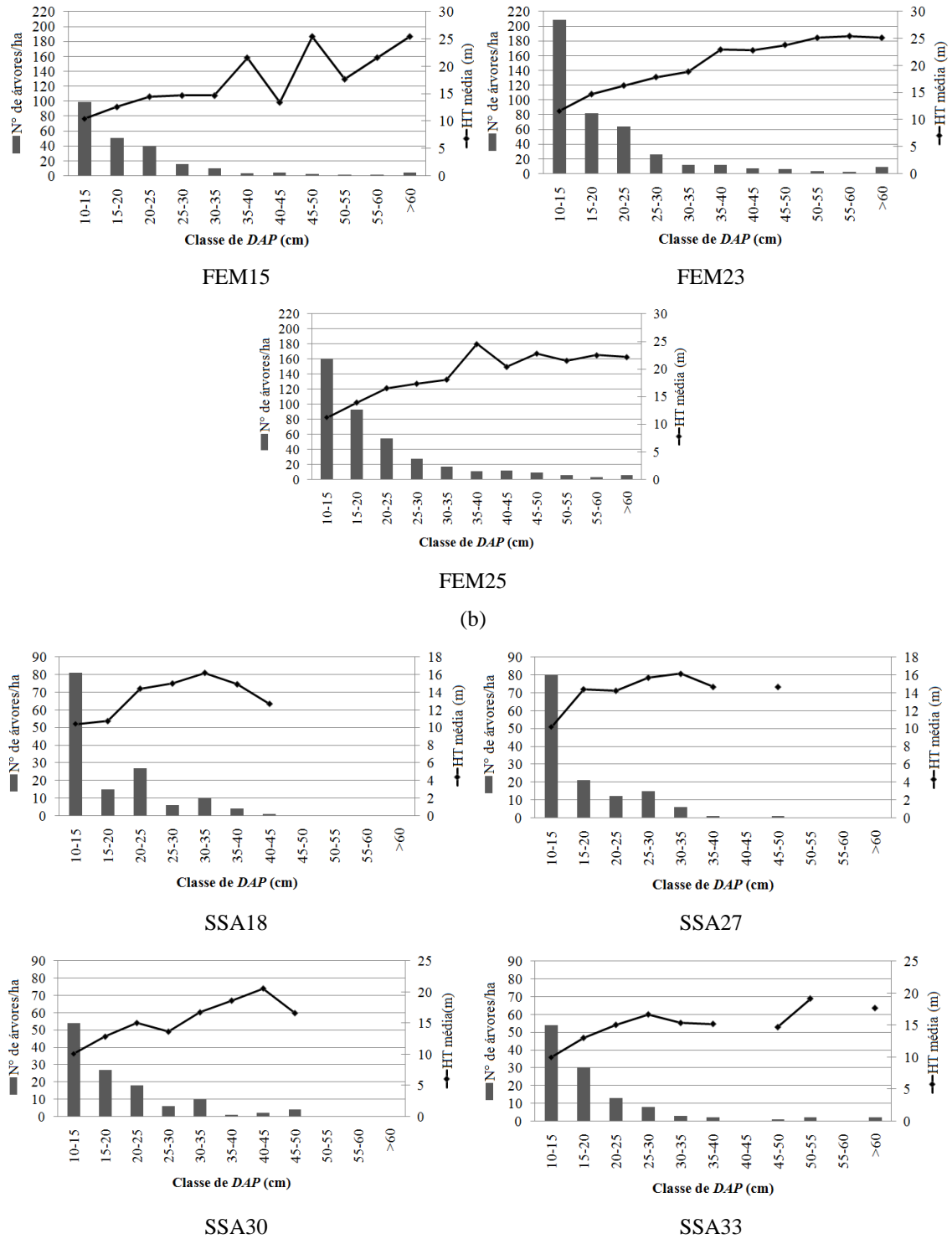
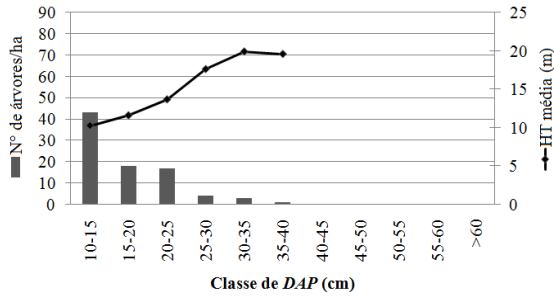
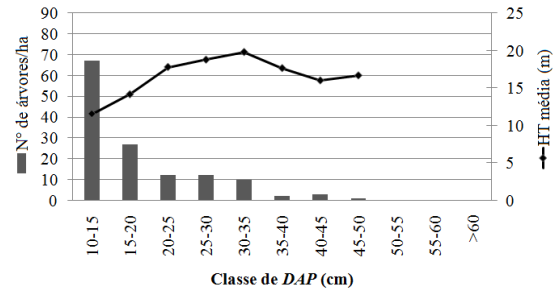


Figura 5.7 – Continuação.

(continua)

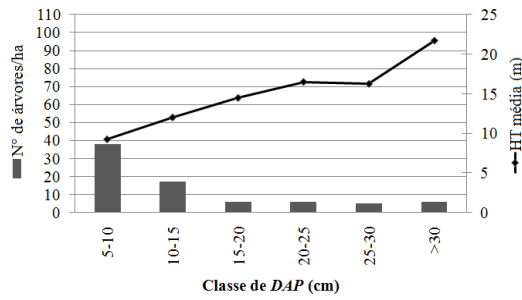


SSA34

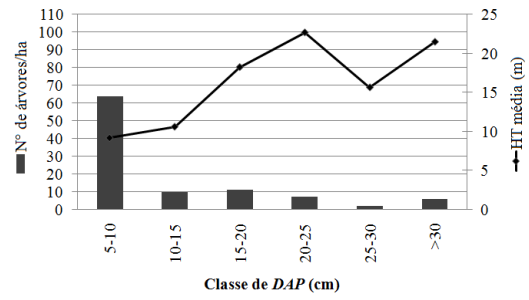


SSA35

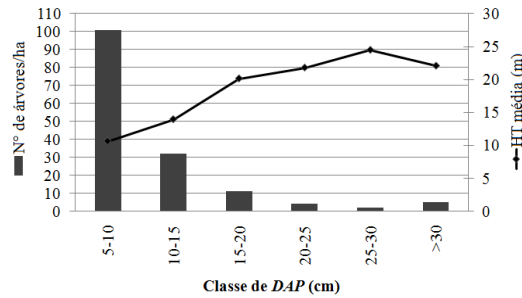
(c)



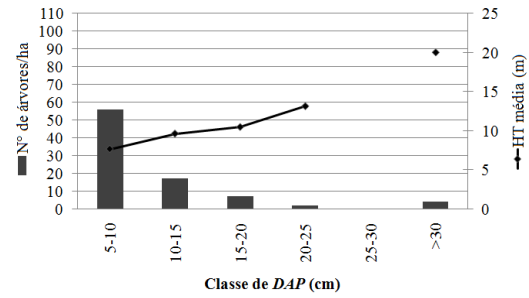
SSInt3



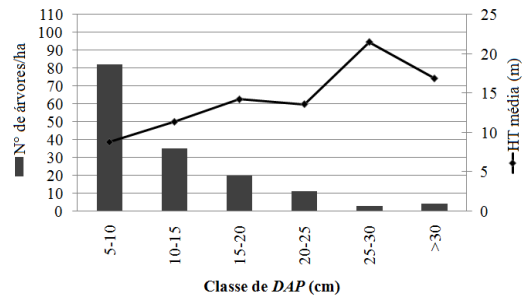
SSInt7



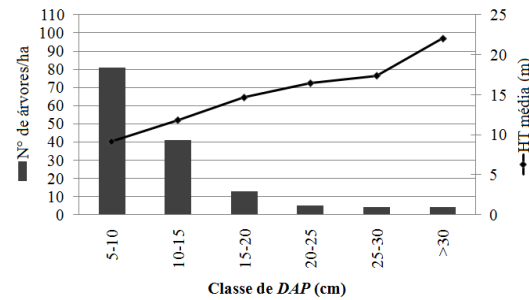
SSInt8



SSInt10



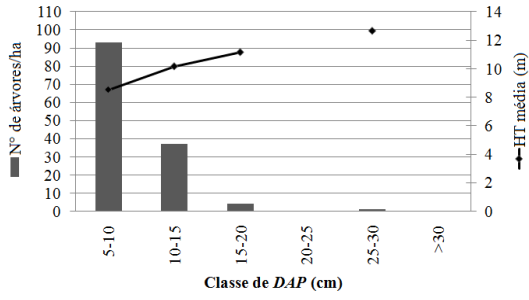
SSInt11



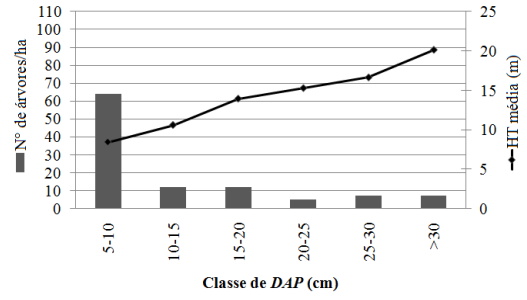
SSInt12

Figura 5.7 – Continuação.

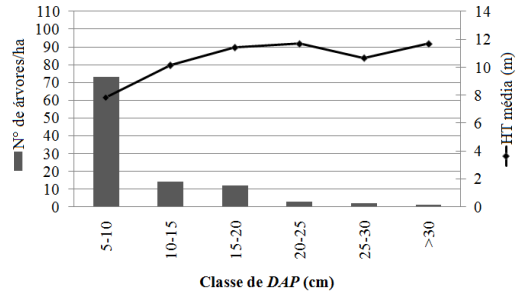
(continua)



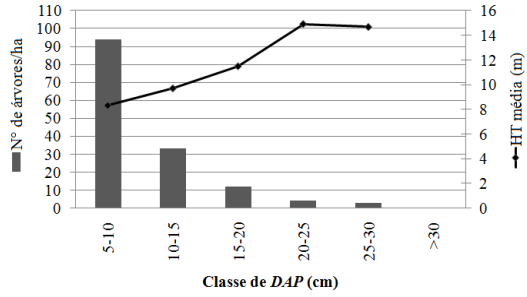
SSIInt14



SSIInt17

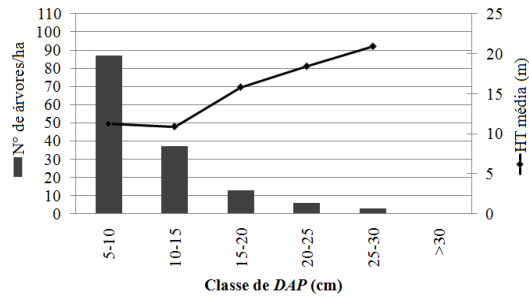


SSIInt22

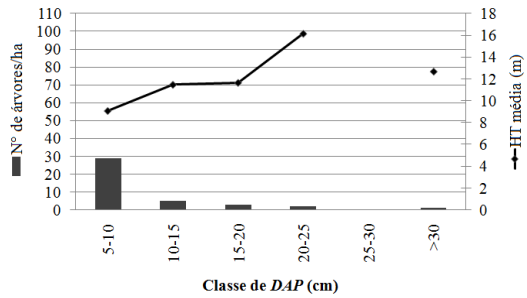


SSIInt26

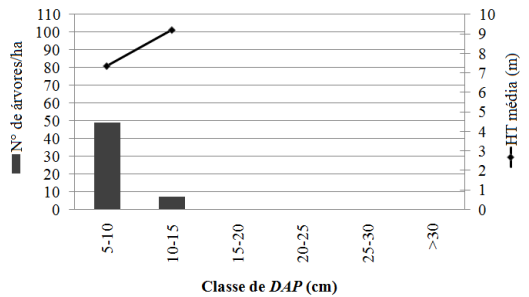
(d)



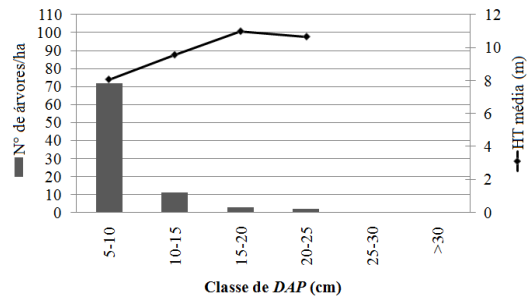
SSI4



SSI5



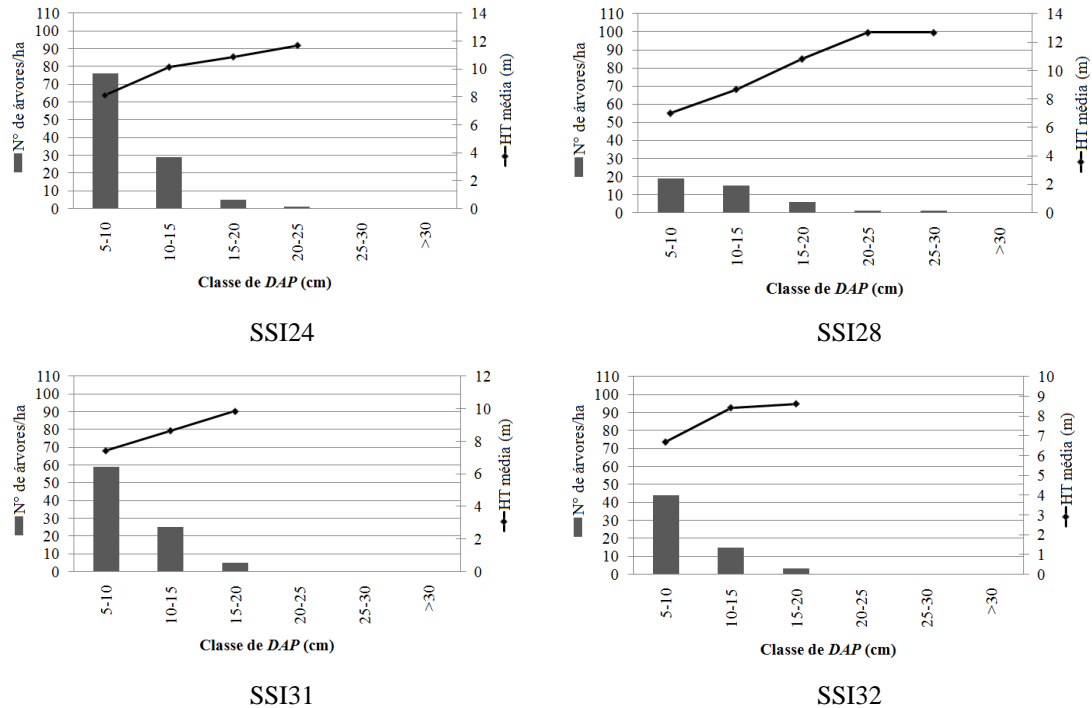
SSI6



SSI16

Figura 5.7 – Continuação.

(continua)



(e)

Figura 5.7 – Conclusão.

De acordo com as variações de sítio, formas de manejo e efeitos antrópicos atuantes, as unidades amostrais tendem a possuir diferentes condições estruturais. Com isso, as unidades FP9, FP13, FP21, FP29, FEM23, FEM25, SSA18, SSA27, SSA35, SSInt8, SSInt12, SSInt14, SSInt26, SSI4, SSI16 e SSI24, pertencentes ao IF₂₀₀₇ foram as que apresentaram a componente estrutural mais diferenciada. Em sua distribuição diamétrica verificou-se uma grande concentração de indivíduos nas classes iniciais de DAP, com variação de 86 a 98% até o limite de 35 cm para as unidades de FP, FEM e SSA e para as unidades de SSInt e SSI variando de 82 a 96% até o limite de 15 cm. Já para as unidades de sucessão secundária SSA18 e SSA35 a HT apresentou um comportamento diferenciado em relação as demais unidades (teste não paramétrico K-S).

Os indivíduos componentes destas unidades apresentaram indivíduos com HT menor, em média entre as classes de DAP de 35 e 45 cm, do que os das demais unidades, apesar da baixa frequência nestas classes. Estes resultados corroboram os de Merino et al. (2007), os quais citam que tais diferenças são decorrentes de sua heterogeneidade estrutural, devido a sua composição florística específica, além da sua adjacência a ambientes de grande perturbação antrópica. Isto pode ser explicado pela afirmação de Jardim et al. (2007), em que a maior competitividade de indivíduos dos estratos inferiores, na ocupação de clareiras, principalmente nas consideradas de dimensões

médias, no processo regenerativo, comprovado pela abertura do dossel para esta tipologia florestal (Tabela 5.3).

O comportamento considerado similar para a maioria das unidades amostrais já era esperado, com maior frequência de indivíduos nas menores classes diamétricas, pois é esperado que as altas taxas de crescimento de indivíduos e sua consequente mortalidade natural garantam a perpetuação da floresta.

5.3 Análise exploratória dos dados PolSAR

5.3.1 Relação entre o espalhamento e a fração de abertura do dossel (%)

Não houve nenhuma relação significativa entre os valores de retroespalhamento em todas as polarizações possíveis e os valores de fração de abertura do dossel, por intermédio da utilização do coeficiente de correlação de Spearman, ao nível de significância de 10% (Tabela 5.2). Os valores da relação entre o coeficiente de variação e a fração de abertura do dossel e a sua não significância, contrariam a afirmação de que a fração de abertura do dossel (%) estaria diretamente relacionada com as respostas de polarização co e cross polarizadas (VAN ZYL et al., 1987; ZEBKER et al., 1987), já que para cada unidade amostral foi calculada a razão entre a potência de espalhamento mínima e máxima de cada resposta polarimétrica, ou seja, o coeficiente de variação (VAN ZYL et al., 1987). Também não foi encontrada relação para o retroespalhamento em todas as polarizações. Uma provável explicação para tal fato está relacionada com sua frequência, pois comprimentos de onda maiores tendem a ser menos influenciadas pelas propriedades biofísicas do dossel (GREEN, 1998). Entretanto, era esperado que os coeficientes de retroespalhamento possuíssem relação positiva com a fração de abertura do dossel (%), pois as variações de comportamento do dossel florestal ocasionam diferentes tipos de interação da onda incidente com o mesmo.

Tabela 5.2 – Coeficiente de correlação de Spearman entre várias variáveis SAR e a fração de abertura do dossel (%) para as unidades amostrais do IF₂₀₀₇(n = 35; p < 0,10).

Atributos	Banda L
Coefficiente de variação	0,05
σ°_{HH}	-0,14
σ°_{HV}	-0,15
σ°_{VV}	0,18
Rc	0,06
Rp	-0,03

Todavia não significativa, a relação positiva da razão de polarização cruzada foi ocasionada pelo decréscimo da profundidade de penetração da onda incidente quando o dossel se torna mais denso, conforme pode ser visto em Narvaes et al. (2010), com o subsequente decréscimo nas interações com o tronco das árvores os quais são normalmente responsáveis pela maior quantidade de espalhamento na polarização HH.

Embora as correlações não tenham sido significativas, ao nível de significância de 10%, deve ser levado em conta que as frações de abertura de copa foram realizadas em diferentes tipologias florestais e que dentre elas pode haver variação na densidade de cobertura, o que pode afetar na profundidade de penetração da onda, mantendo-se ângulos de incidência semelhantes.

De acordo com van der Sanden (1997) diferenças na profundidade de penetração vertical afetam a interação das microondas com a floresta, pois o processo de transmissão, espalhamento e absorção ocorrerão em diferentes partes do volume e/ou superfícies florestais.

A Figura 5.8 mostra a complexidade de um ambiente florestal diversificado, composto de uma ampla gama de espécies em diferentes estratos de altura e de diâmetro, componentes da florestal tropical avaliada. Por sua vez, a Tabela 5.3 mostra a variação da fração de abertura do dossel, em percentagem para todos os tipos florestais analisados.

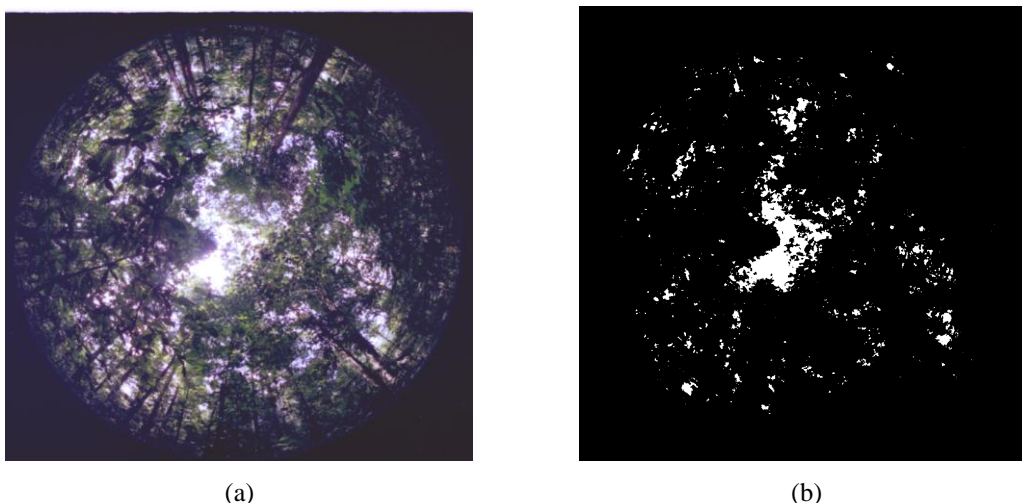
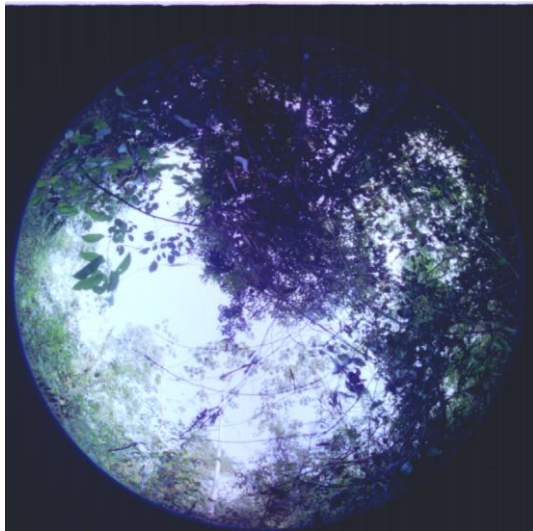
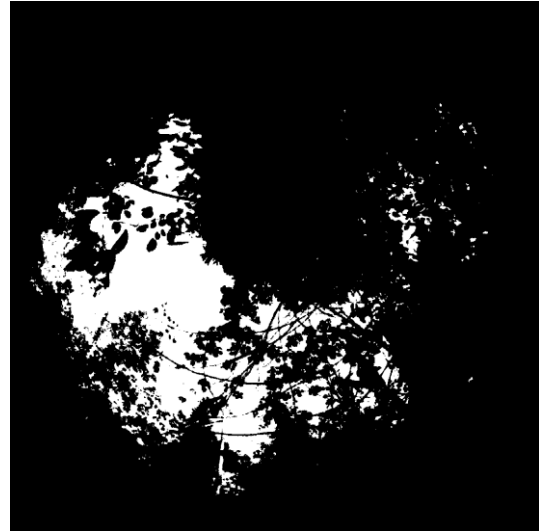


Figura 5.8 – Exemplo de fotografia tomada no interior da floresta, utilizando uma câmera ajustada com lente hemisférica (*fish-eye*). (a) imagem 8 bits de floresta primária; e (b) imagem transformada em monocromática por intermédio de um limiar de corte, com a definição dos pixels com e sem presença de vegetação; (c) imagem 8 bits de sucessão secundária inicial; e (d) imagem transformada em monocromática por intermédio de um limiar de corte, com a definição dos pixels com e sem presença de vegetação.

(continua)



(c)



(d)

Figura 5.8 – Conclusão.

Os valores médios de fração de abertura do dossel das unidades de sucessão secundária intermediária (SSInt12 = 7,8 %) e inicial (SSI32 = 9,2 %) são baseados em um menor número de observações ($n = 4$ por unidade amostral para ambos os casos) do que unidades de floresta primária e florestas com exploração madeireira ($n = 12$), além de terem sido observados a presença de dois *outliers* teóricos, que fizeram com que o desvio padrão fosse superior aos valores encontrados para as demais observações (Tabela 5.3). Essas unidades amostrais possuem grande variabilidade de intensidade luminosa ao longo do transecto analisado, ocasionados pela formação de clareiras, da arquitetura do dossel florestal e individual das espécies componentes do perfil florestal, ou seja, a combinação desses fatores são as condicionantes de um ambiente diversificado em plena recuperação.

As diferenças estruturais das tipologias analisadas podem afetar em muito o comportamento do retroespalhamento. Como melhor forma de se obter uma aproximação da geometria de imageamento do radar com os parâmetros biofísicos da floresta coletados a campo tem-se optado pelo uso da fotografia hemisférica. Essa tem sido utilizada por ecologistas na área florestal com o intuito de quantificar o total de radiação solar que penetra no dossel, a distribuição angular dos componentes da copa, bem como o seu índice de área foliar (LAI) (CHEN et al., 1991). Aliado a esse conceito, Green (1998) analisou em seu estudo a relação entre a fração de abertura do dossel e alguns atributos polarimétricos extraídos na banda C e L, com o intuito de entender os mecanismos físicos presentes na floresta e sua contribuição no retroespalhamento SAR.

Seguindo os conceitos supracitados nesta seção, foram realizadas análises com o intuito de encontrar diferenças quando a fração de abertura do dossel (%) para todas as tipologias analisadas para o entendimento do comportamento do retroespalhamento e a estrutura florestal.

Tabela 5.3 –Percentagem média estimada de abertura do dossel (%) e seus respectivos desvios-padrão e número de pontos para a formação do valor médio (n = 35 observações).

Unidade amostral	Abertura do dossel (%)	Desvio padrão	Nº de Observações (n)
FP1	3,7	2,1	12
FP2	5,6	4,7	12
FP9	5,8	3,6	12
FP13	3,8	3,2	12
FP19	2,7	1,5	12
FP20	3,4	3,1	12
FP21	2,9	1,5	12
FP29	4,6	1,3	12
FEM15	3,7	1,4	4
FEM23	4,9	2,6	12
FEM25	4,3	2,0	12
SSA18	5,2	1,3	8
SSA27	4,8	4,6	8
SSA30	4,4	1,2	8
SSA33	3,8	1,2	8
SSA34	7,4	5,4	8
SSA35	3,6	1,0	8
SSInt3	4,8	1,5	4
SSInt7	5,3	1,1	4
SSInt8	3,6	0,9	4
SSInt10	7,9	1,8	4
SSInt11	6,5	0,8	4
SSInt12	7,8	8,5	4
SSInt14	7,5	4,1	4
SSInt17	4,4	1,1	4
SSInt22	3,6	0,9	4
SSInt26	3,6	0,5	4
SSI4	6,1	1,6	4
SSI5	7,1	2,8	4
SSI6	2,3	0,8	4
SSI16	8,9	3,9	4
SSI24	3,5	0,9	4
SSI28	7,3	1,0	4
SSI31	2,7	0,4	4
SSI32	9,2	5,5	4

Conforme o diagrama de dispersão da Figura 5.9 e a Tabela 5.3, pôde-se notar que as unidades de sucessão secundária intermediária e inicial têm a tendência de possuírem o dossel mais esparso, embora a densidade de árvores seja superior a encontrada em ambientes mais desenvolvidos do ponto de vista estrutural (estágios mais avançados de sucessão e ambientes de floresta primária e com exploração madeireira).

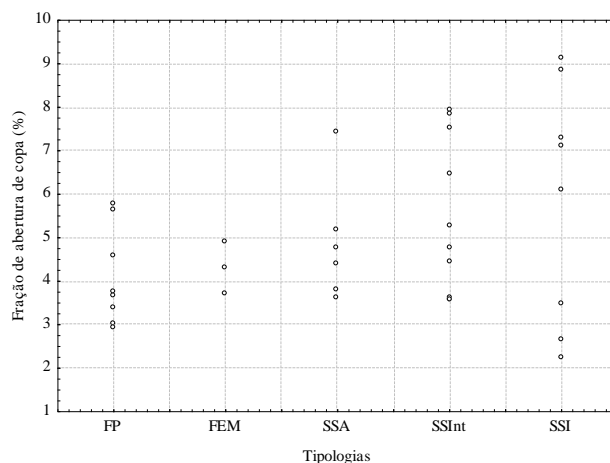


Figura 5.9 – Diagrama de dispersão da fração de abertura do dossel (%) de todas as tipologias analisadas (FP = floresta primária; FEM = floresta com exploração madeireira; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial).

A análise conjunta do histograma de distribuição dos dados e o gráfico de probabilidade normal (Figura 5.10a e b), bem como o teste formal de Shapiro – Wilk ($W = 0,92616$, $p = 0,02154$) provam que a função densidade de probabilidade não segue a distribuição normal ao nível de significância de 5%. Em outras palavras, a quantidade de intensidade luminosa que penetra pelo dossel florestal (fração de abertura do dossel (%)) não possui comportamento de uma distribuição normal e com isso, as análises estatísticas subsequentes seguem a estatística não paramétrica.

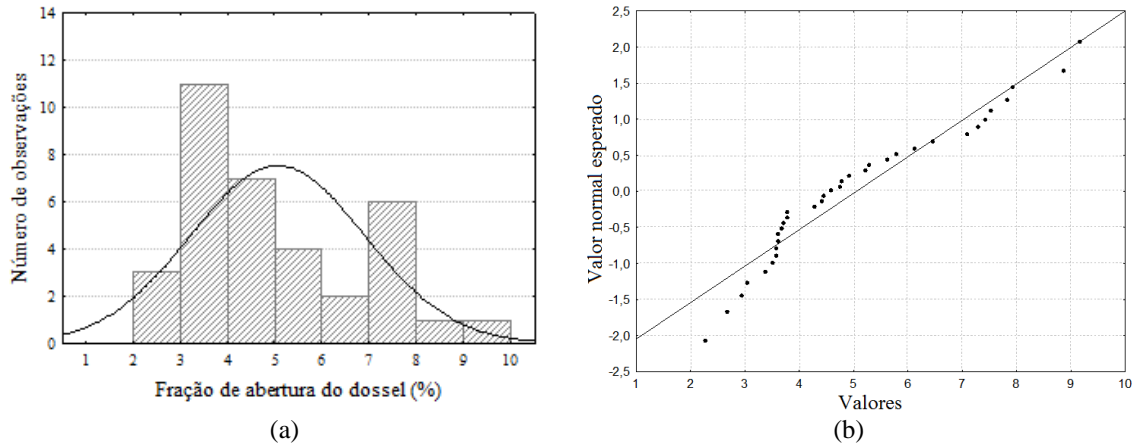


Figura 5.10 – (a) Histograma de distribuição dos dados de fração de abertura do dossel e (b) gráfico de probabilidade normal para todas as observações possíveis ($n = 35$).

Para auxiliar a interpretação da estrutura florestal – representada pelo grau de radiação solar que penetra no dossel - nas diferentes tipologias analisadas, é apresentado na Figura 5.11, as respectivas distribuições de fração de abertura do dossel (%) bem como seus valores médios. Foi registrada diferença significativa, ao nível de significância de 10% da fração de abertura do dossel (%) entre as unidades amostrais de Floresta Primária e Sucessão secundária inicial (teste de Wald-Wolfowitz z -ajustado = 1,811422; valor $p = 0,070076$). As unidades de floresta primária foram as que tiveram a menor fração de abertura do dossel, enquanto que as unidades de sucessão secundária inicial foram as que possuíram os valores mais elevados.

Apesar de uma variação considerada sutil nos padrões de luminosidade no interior das florestas primárias e com exploração madeireira é possível verificar um aumento gradual da intensidade luminosa para as unidades em estágio de sucessão secundária, ou seja, com a diminuição da complexidade estrutural e da biodiversidade da floresta. Adicionalmente, foi possível verificar que nas unidades de sucessão secundária há uma grande variação na intensidade luminosa, possivelmente decorrente da mortalidade de árvores e o subsequente processo de sucessão florestal.

Já para as unidades com exploração madeireira a maior variação de intensidade luminosa em relação as florestas primárias é ocasionada pela intensidade de desbaste, ou seja, retirada de indivíduos de interesse econômico e conseqüente formação de clareiras e trilhas de arraste de toras.

Jennings et al. (1999) citam que “o dossel florestal é o principal fator determinante do micro habitat dentro da floresta, afetando a sobrevivência e o crescimento das plantas” e, conseqüentemente determinando a ocorrência e a associação entre diferentes espécies.

Desta forma, as diferenças encontradas no dossel das tipologias nesta análise são comprovadas pela estrutura florestal e pela composição florística diferenciada entre elas.

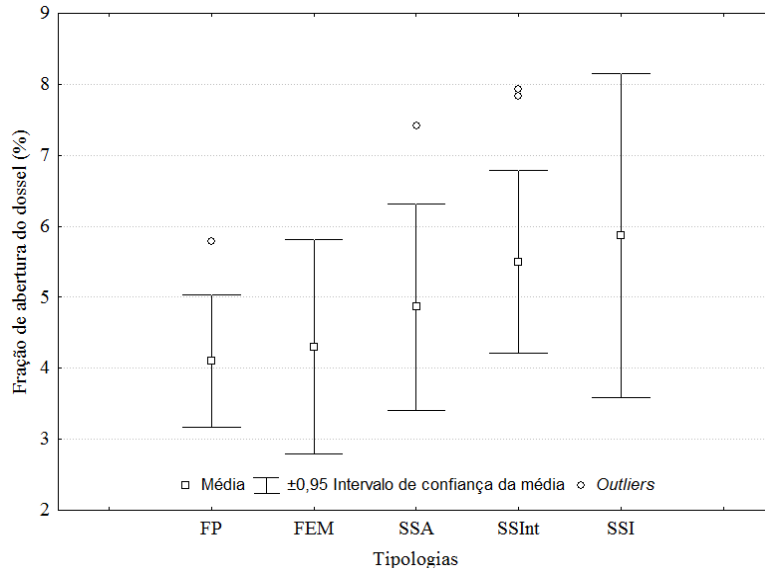
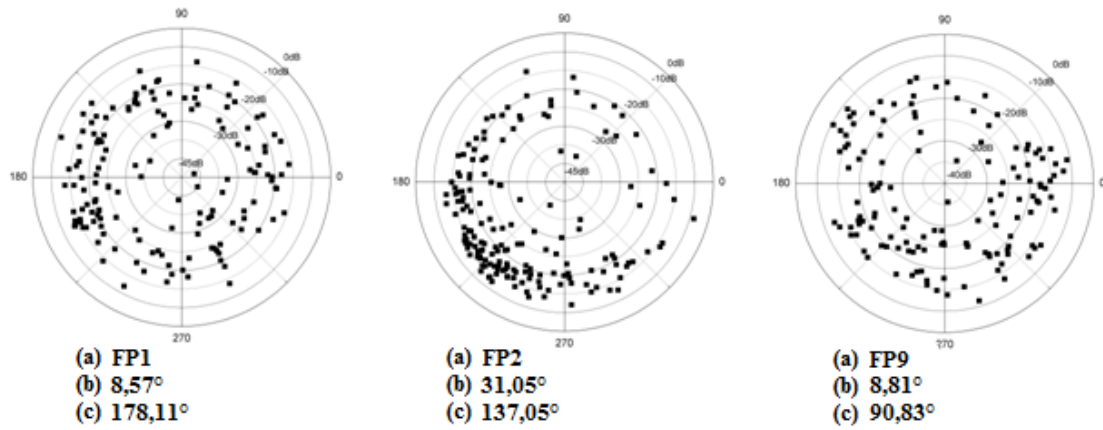


Figura 5.11 – Diagrama de dispersão da fração de abertura do dossel (%) para todas as tipologias analisadas. As barras verticais denotam intervalos de confiança para a média ao nível de 95% e os círculos representam os *outliers*.

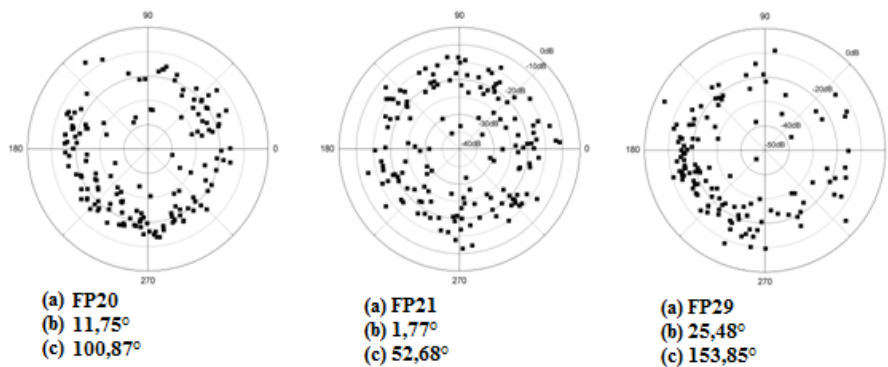
5.3.2 Determinação dos mecanismos de espalhamento das tipologias analisadas

A diferença de fase é dada como um atributo polarimétrico hipoteticamente capaz de distinguir eletricamente o espalhamento oriundo de superfícies lisas, rugosas e volumétricas (BOERNER et al., 1987). Além disso, este atributo é um importante parâmetro de avaliação do significado físico relacionado com o número de interações e pode ser também um indicador de mudanças ou efeitos de transmissão da onda incidente (WOODHOUSE, 2006). Adicionalmente, Ulaby et al. (1987) relataram que a distribuição de diferença de fase através de um alvo pode conter mais informação do que aquelas presentes na fase média estatística. Assim, na Figura 5.12 pode-se visualizar o histograma do comportamento da diferença de fase HH-VV (distribuição dos pixels) de cada unidade amostral utilizadas no treinamento (n=33), bem como o seu valor de direção média e o seu desvio padrão circular associado.

Floresta Primária



Floresta Primária



(a) Tipologias analisadas
(b) Direção média da diferença de fase HH-VV
(c) Desvio padrão circular da diferença de fase HH-VV

(a)

Floresta com exploração madeira

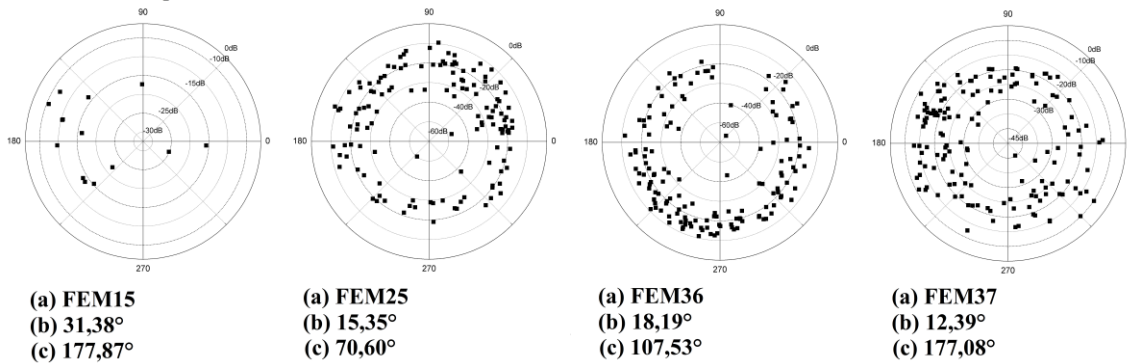
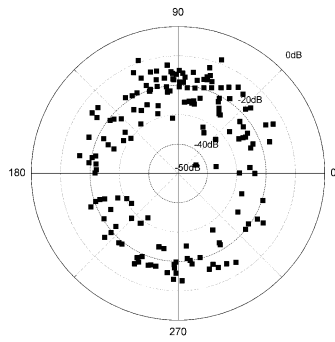
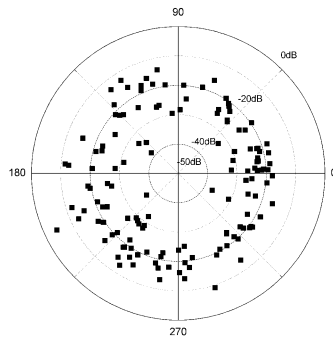


Figura 5.12 – Distribuição dos pontos da diferença de fase HH-VV. , para a (a) floresta primária, (b) floresta com exploração madeira, (c) sucessão secundária avançada, (d) sucessão secundária intermediária e (e) sucessão secundária inicial.

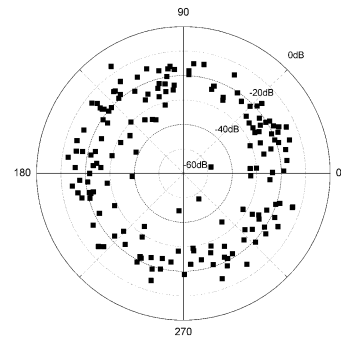
(continua)



(a) FEM38
 (b) 14,85°
 (c) 96,08°



(a) FEM40
 (b) 3,77°
 (c) 85,24°

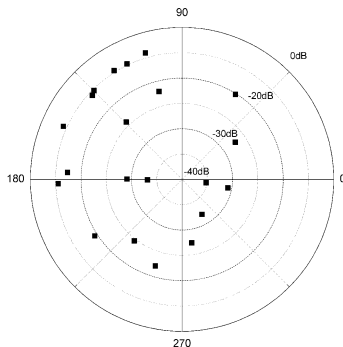


(a) FEM41
 (b) 6,33°
 (c) 92,26°

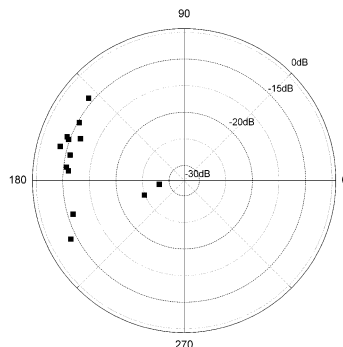
(a) Tipologias analisadas
 (b) Direção média da diferença de fase HH-VV
 (c) Desvio padrão circular da diferença de fase HH-VV

(b)

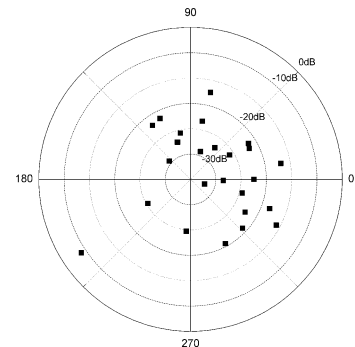
Sucessão secundária avançada



(a) SSA18
 (b) 19,25°
 (c) 153,43°

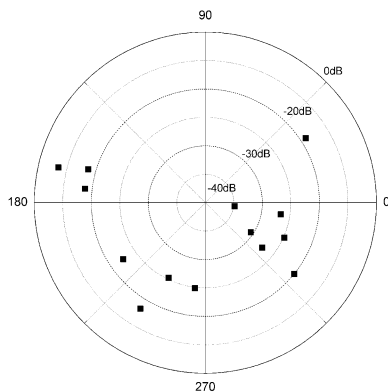


(a) SSA27
 (b) 54,24°
 (c) 172,55°

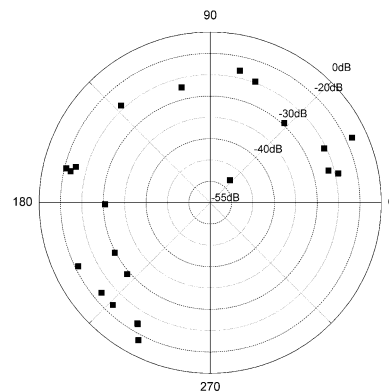


(a) SSA33
 (b) 21,99°
 (c) 25,48°

Sucessão secundária avançada



(a) SSA34
 (b) 19,68°
 (c) 74,27°



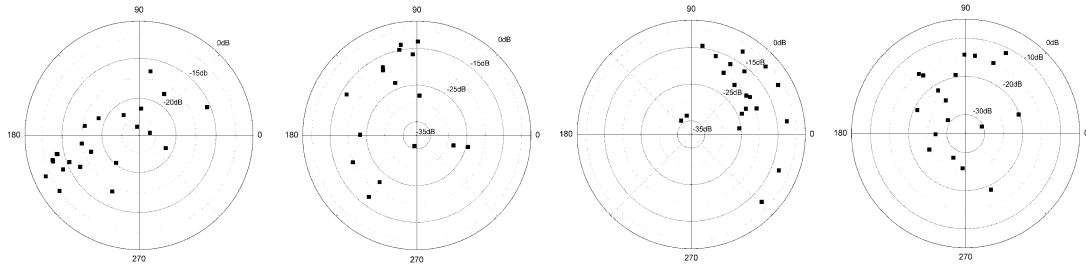
(a) SSA35
 (b) 12,83°
 (c) 160,95°

(c)

Figura 5.12 – Continuação.

(continua)

Sucessão secundária intermediária



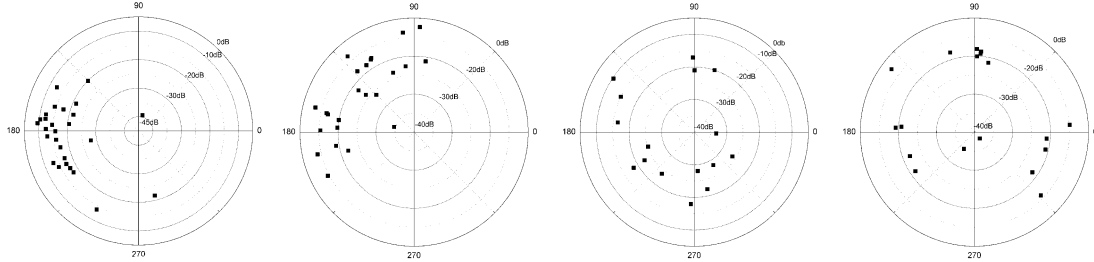
(a) SSInt3
(b) 26,07°
(c) 179,95°

(a) SSInt7
(b) 24,02°
(c) 127,17°

(a) SSInt8
(b) 46,19°
(c) 42,01°

(a) SSInt10
(b) 23,68°
(c) 117,06°

Sucessão secundária intermediária



(a) SSInt12
(b) 48,23°
(c) 177,62°

(a) SSInt17
(b) 46,72°
(c) 146,26°

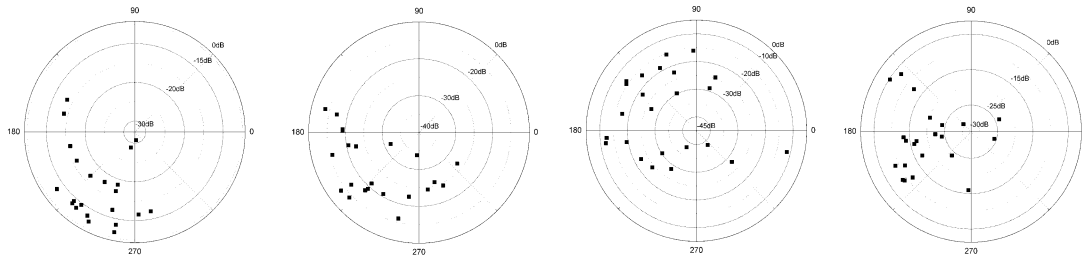
(a) SSInt22
(b) 14,12°
(c) 141,56°

(a) SSInt26
(b) 8,40°
(c) 85,71°

- (a) Tipologias analisadas
- (b) Direção média da diferença de fase HH-VV
- (c) Desvio padrão circular da diferença de fase HH-VV

(d)

Sucessão secundária inicial



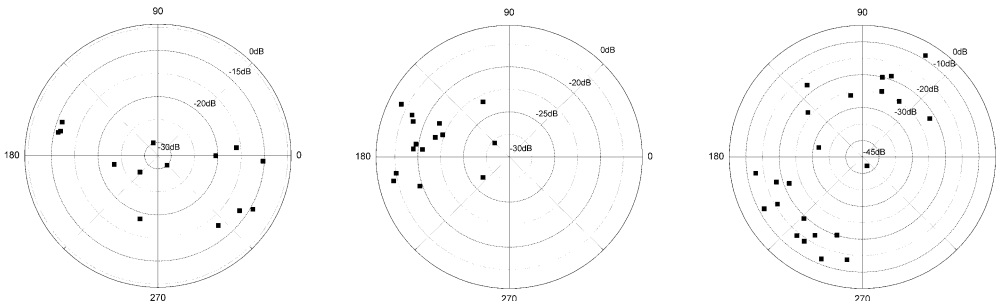
(a) SSI4
(b) 49,13°
(c) 123,46°

(a) SSI5
(b) 43,62°
(c) 137,35°

(a) SSI6
(b) 26,62°
(c) 158,01°

(a) SSI24
(b) 39,42°
(c) 170,00°

Sucessão secundária inicial



(a) SSI28
(b) 11,09°
(c) 72,30°

(a) SSI31
(b) 52,26°
(c) 168,07°

(a) SSI32
(b) 17,97°
(c) 171,99°

(e)

Figura 5.12 – Conclusão.

Os valores da direção média da diferença de fase HH-VV para as unidades de floresta primária entre aproximadamente 2 a 127° indicaram grande amplitude de variação, enquanto que as unidades com exploração madeireira obtiveram valores entre 71 a 178°, evidenciando que, além das diferentes intensidades de manejo, os diferentes estágios de desenvolvimento da regeneração natural no interior da floresta causam variação na interação das microondas com os diferentes componentes da estrutura florestal.

A diferença de fase associada a um refletor diédrico puro se aproxima a valores em torno de 180° (MCNAIRN et al., 2002). Ainda segundo os mesmos autores, é esperado que para alvos distribuídos onde mais do que uma fonte de espalhamento é freqüentemente presente, o espalhamento do tipo *double bounce* ocorra. Por conseguinte, o valor de PPD irá se aproximar a 180°, sendo que o desvio de uma PPD de 180° é um indicador fidedigno da contribuição do mecanismo de *double bounce*. Kuga e Zhao (1996) sugerem que onde as condições para o espalhamento do tipo *double bounce* são criadas, a fase média de espalhamento muda para aproximadamente 110° para alvos distribuídos². A PPD encontrada para as unidades amostrais de floresta com exploração madeireira (FEM15 = 178°; FEM37 = 177°), sucessão secundária avançada (SSA18 = 153°; SSA27 = 173°; SSA34 = 105°; SSA35 = 161°), sucessão secundária intermediária (SSInt7 = 127°; SSInt10 = 117°; SSInt17 = 146°) e sucessão secundária inicial (SSI6 = 158°; SSI31 = 168°) sugerem que o tipo de espalhamento se aproxima ao do tipo *double bounce*.

O valor encontrado para as unidades de floresta com exploração madeireira (FEM15 e FEM37) possivelmente seja decorrente da combinação da elevada densidade de indivíduos pouco desenvolvidos estruturalmente e de indivíduos emergentes, e também pela adjacência a áreas com grande interferência antrópica. Neste caso, a profundidade de penetração vertical tenha sido suficiente para a ocorrência da interação solo-tronco, pois a atenuação do sinal ocasionada pelo baixo perfil de altura desta unidade não foi suficiente para evitar esta interação com os indivíduos emergentes (Figura 5.15).

Na unidade de sucessão secundária avançada (SSA34) os valores elevados de PPD são decorrentes da baixa densidade de indivíduos (N = 430 indv/ha) e da presença de indivíduos sem copa, favorecendo particularmente nessa amostra, a formação de algumas clareiras naturais, sendo evidenciado pela maior fração de abertura do dossel

² Em uma célula de resolução há vários espalhadores atuando, cada qual contribuindo com o retroespalhamento final, estando sujeitas a variações temporais e espaciais (LEE e POTTIER, 2009). Este comportamento é típico de alvos naturais.

(%) encontrada para esta tipologia em análise (7,4%). As unidades SSA18, SSA27 e SSA35 terem apresentado valores mais elevados de PPD estas possuem maiores densidade de indivíduos (N = 720, 680 e 670 indv/ha, respectivamente). Entretanto, para a unidade SSA27 o efeito de *double bounce* encontrado é devido a ocorrência de clareiras causadas pela mortalidade de indivíduos e/ou indivíduos com copa quebrada e copa em regeneração encontrados na área de estudo, comprovado pela variação da intensidade luminosa nos pontos desta unidade analisada (desvio padrão = 4,6%).

Embora, para a unidade SSA35 a variação da abertura do dossel não tenha sido tão pronunciada (desvio padrão = 1,0), a abertura de dossel foi considerada significativa (3,6%), decorrente do processo de formação de clareiras, já que foram encontrados nesta área vários indivíduos com copa quebrada. Contrário ao encontrado para as unidades de sucessão secundária anteriores, a tendência ao espalhamento predominante do tipo *double bounce* para a SSA18, foi devido a dimensão da copa desses indivíduos, de menores dimensões. Isso propiciou com que a onda eletromagnética obtivesse maior facilidade de penetração nos estratos inferiores da floresta, acarretando em uma maior interação solo-tronco.

Neste caso, com relação a PPD encontrada para as unidades amostrais SSInt7, SSInt10 e SSInt17, o baixo perfil florestal, evidenciado pela baixa altura média das árvores (\bar{H} = 12,14; 8,99 e 10,89m, respectivamente) favoreceu a interação solo-tronco, já que nesta frequência, a profundidade de penetração vertical (δp) foi suficiente para que esse tipo de interação ocorra. Esta afirmação encontra embasamento nos estudos realizados por Imhoff et al. (1986) e Aiba et al. (1988), ambos realizados em floresta tropical e com banda L. Nestes, a δp com ângulos de incidência variando entre 35° a 55° em florestas sujeitas a alagamentos diferiram consideravelmente de acordo com a variação do ângulo de incidência e das condições topológicas. Enquanto Imhoff et al. (1986) relataram valores de 12,5m para baixos ângulos de incidência, Aiba et al. (1988) encontraram valores de aproximadamente 6m para as mesmas condições de ângulo de incidência. De acordo com van der Sanden (1997) diferenças na profundidade de penetração vertical – neste caso relacionados a altura média das árvores – afetam a interação das microondas com a floresta devido ao processo de transmissão, espalhamento e absorção que ocorre em diferentes partes do volume e/ou superfícies. Em adição, os valores elevados de fração de abertura do dossel para as unidades SSInt7 e SSInt10 (5,3; 7,9,

respectivamente) comprovam que além da baixa altura média das árvores, o processo de formação de clareiras mostrou-se importante para que esse tipo de interação ocorra.

Adicionalmente, o estudo realizado por Narvaes et al. (2010) comprovou que a profundidade de penetração, além de estar diretamente relacionada com o ângulo de incidência, a altura média dos indivíduos foi o fator de maior importância em todas as polarizações, para a banda L na mesma região de imageamento do presente estudo.

Para as unidades de sucessão secundária inicial (SSI6 e SSI31) aplicam-se as mesmas considerações feitas para as unidades de sucessão secundária intermediária anteriormente citadas. Além disso, a menor altura média total da SSI31 ($\bar{H} = 7,60$ e $7,91\text{m}$) contribuiu com mais efetividade para a interação do tipo *double bounce* que os casos anteriores.

Os testes formais para a verificação da normalidade dos dados circulares de diferença de fase HH-VV, conhecido como ϕ (medida angular) – relatada por Izbicki e Esteves (2008) como o ângulo entre o eixo x e o i-ésimo ponto observado, no sentido anti-horário de um círculo de raio $R=1$ - indicaram que os mesmos seguem uma distribuição de von Mises (também chamada de distribuição normal circular), com ângulo médio Θ e parâmetro de concentração k ($kappa$) ≥ 0 , ao nível de significância de 5% para todas as fitofisionomias em análise.

Quando analisadas em nível de tipologia florestal, o teste de von Mises bootstrap, foi utilizado para avaliar as diferenças das direções médias da diferença de fase HH-VV entre dois grupos (FISHER, 1993). As unidades amostrais de floresta primária foram consideradas estatisticamente diferentes das demais, pois possuem uma direção média, com função densidade de probabilidade de von Mises com valores superiores as demais tipologias. Enquanto que, as demais unidades foram consideradas similares, ao nível de significância de 5%, utilizando 1000 replicações, conforme pode ser visto na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores referentes a função densidade de probabilidade de von Mises da direção média da diferença de fase HH-VV, de cada fitofisionomia florestal analisada.

Tipologias	Direção média da fdp de von Mises	
	baixa	alta
FP	214,52	236,21
FEM	99,81	178,45
SSA	89,23	209,10
SSInt	127,82	159,91
SSI	190,89	213,87

Para o melhor entendimento da discriminação dos mecanismos de espalhamento ocorrentes, são mostrados na Tabela 5.5 os valores da direção média e o desvio padrão circular da média, para a diferença de fase HH-VV, de cada fitofisionomia florestal analisada.

Tabela 5.5 – Valores da diferença de fase média (direção média) entre HH-VV e o seu desvio padrão circular da média de cada tipologia florestal analisada.

Tipologias	Direção média	Desvio padrão circular da média
FP	134,71	13,07
FEM	137,64	4,03
SSA	157,16	9,18
SSInt	144,61	20,34
SSI	158,12	29,53

A análise ao nível de tipologias indicaram que embora haja o predomínio do espalhamento considerado por Evans et al. (1988) como interações múltiplas, indicado pelos valores médios da PPD, todas as unidades possuem uma tendência ao comportamento do espalhamento do tipo *double bounce*, decorrente dos fatores elucidados anteriormente. Desta forma a distribuição da diferença de fase fornece informação adicional. Como pode ser visto na Figura 5.12 e no histograma dos valores médios e dos seus respectivos desvios-padrão circular (Figura 5.13), a distribuição da PPD varia em função das condições estruturais da floresta. Além disso, as distribuições de PPD da Figura 5.12 são consideradas únicas para todas as tipologias analisadas, embora haja semelhança nas distribuições individuais na mesma tipologia analisada, e entre tipologias próximas do ponto de vista de seu desenvolvimento estrutural, como por exemplo, SSInt e SSI.

Outro componente de análise importante, e utilizado para a diferenciação de usos e coberturas é o desvio padrão circular da média associado a diferença de fase HH-VV, utilizado por van Zyl (1989) e McNairn et al. (2002). Os mesmos testes para dados circulares citados anteriormente, para a verificação da normalidade e para a verificação de diferenças significativas entre os valores médios de desvio padrão circular da média associado a diferença de fase HH-VV, indicaram que os mesmos seguem a distribuição de von Mises.

Diferença de fase HH-VV

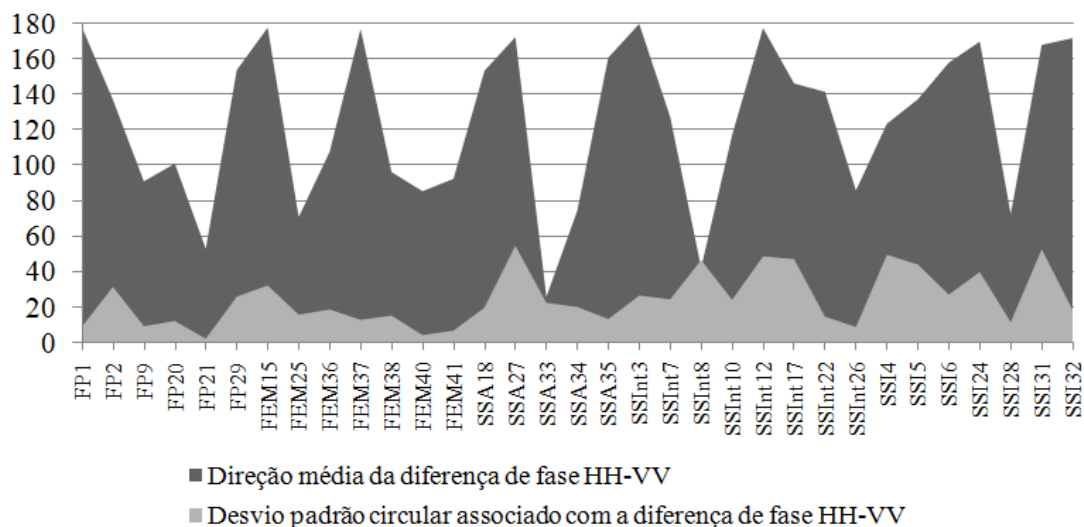


Figura 5.13 – Histograma do comportamento dos valores de direção média da Φ HH-VV e dos seus respectivos desvios-padrão circular associados.

Além disso, as unidades de SSI e SSInt foram consideradas estatisticamente diferentes das demais, pois possuem uma direção média, com função densidade de probabilidade de von Mises com valores superiores as demais tipologias. Estas apresentaram valores de desvio padrão circular superiores a 20° , o que indicou a resposta típica de múltiplas interações no interior da floresta, conforme relatada por Evans et al. (1988).

Adicionalmente, as unidades de FP possuem valores intermediários de desvio padrão circular ($13,07^\circ$), o que demonstrou que, essas possuem fase intermediária entre os espalhamentos do tipo direto e do tipo volumétrico. Todavia, as demais unidades (SSA e FEM) apresentaram espalhamento do tipo direto (*single bounce*), evidenciados pelos baixos valores de desvio padrão circular.

Dado ao que foi citado anteriormente, as tipologias apresentaram comportamento diferenciado, pois os valores de desvio padrão circular mostraram que, houve uma maior variação de ambiente no interior das unidades de sucessão secundária inicial e intermediária (condições de sítio), decorrentes principalmente da elevada taxa de crescimento e em consequência, do processo de sucessão florestal para essas tipologias.

Nas unidades de sucessão secundária inicial (SSI) os valores de direção média de PPD e do desvio padrão circular foram maiores. O dossel florestal fechado desta tipologia, juntamente com as unidades de SSInt têm uma resposta de distribuição de fase típica de múltiplas interações. O mesmo tipo de comportamento foi encontrado para as unidades de sucessão secundária avançada (SSA), embora o desvio padrão circular tenha sido

baixo. Em consequência desses valores encontrados, a distribuição de PPD sugere que embora algum espalhamento do tipo *double bounce* esteja ocorrendo, as copas dessas árvores também possuem um espalhamento volumétrico substancial.

Embora o estudo de van Zyl (1989) tenha sido associado a avaliação de alvos com caducifolia (perda de folhas durante a estação seca), utilizando a mesma frequência e ângulos de incidência mais rasantes do que o presente estudo, encontrou valores de PPD médio em torno de 110° e desvio padrão da média de 63° . Os valores encontrados foram ligeiramente inferiores aos deste estudo. Embora os indivíduos possuíssem caducifolia, os ângulos de incidência maiores fizeram com que a capacidade de penetração vertical da onda incidente possivelmente fosse menor, e, por conseguinte o espalhamento do tipo *double bounce* e volumétrico.

Outra análise exploratória importante para separar contribuições de espalhamento com diferentes naturezas, as quais podem estar associadas a mecanismos físicos de espalhamento é a resposta de polarização paralela de cada tipologia analisada, conforme descrito por van Zyl et al. (1987).

Outro fator importante para a escolha desse tipo de análise exploratória deu-se pela afirmação de Matthaeis et al. (1994), os quais descrevem que as respostas de polarização co-polarizadas contém a impressão de vários mecanismos de espalhamento (superficial, *double bounce*, e múltiplo/volumétrico), o qual combinam com o rendimento global do espalhamento co-polarizado de vários estados de polarização (linear, circular, e elíptico). Desta forma, estas respostas de polarização geradas englobam as características de espalhamento do alvo.

As amostras utilizadas para a posterior modelagem de biomassa (amostras de treinamento; $n = 33$) foram utilizadas para a geração das respostas de polarização co-polarizada, para todas as tipologias em análise. Ainda, para facilitar as comparações entre estas, os plots foram normalizados para um intervalo de intensidade de 0-1.

Uma amostra típica de cada tipologia está presente na Figura 5.14. As fontes de espalhamento foram também determinadas pelo exame da forma da resposta polarimétrica co-polarizada (polarizações com a resposta máxima e mínima), altura do pedestal e os valores estatísticos da PPD.

Floresta Primária

De acordo com Dobson e Ulaby (1998) e McNairn et al. (2002) para superfícies consideradas rugosas o espalhamento em HH e VV são aproximadamente iguais sob diferentes condições de ângulo de incidência. Na Figura 5.14a, são mostradas todas as respostas de polarização co-polarizada, correspondente a esta tipologia. Estes resultados sugerem a formação de duas classes de amostras – aquelas com respostas aproximadamente iguais em HH e VV e/ou levemente superiores em VV (FP2 e FP9) daquelas com leves picos em HH (FP1, FP20, FP21 e FP29). Estas diferenças sugerem que o espalhamento volumétrico varia entre estas unidades. As unidades FP1, FP20, FP21 e FP29 tiveram uma máxima resposta em HH, com maiores valores de σ ocorrendo em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), com orientação preferencialmente horizontal ($\psi = 0^\circ$). É possível que esta dependência seja uma consequência da ocorrência de dosséis florestais mais homogêneos, com galhos grossos orientados horizontalmente (SANTOS et al., 2009). Nessa mesma tipologia, cabe ressaltar que a resposta de polarização destas unidades foi similar à resposta apresentada por Gonçalves (2007) para o mesmo tipo florestal em unidades de manejo florestal com diferentes intensidades de exploração.

Nas unidades FP2 e FP9 o retroespalhamento foi aproximadamente igual em todas as polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$ e $\psi = \pm 0-180^\circ$), sugerindo que essas possuem copas mais rugosas. Esta resposta de polarização é bastante similar àquela observada para refletores de canto triédricos, i.e., presença de leve ponto de mínima nas polarizações lineares, com orientação aproximada de $\psi = \pm 45^\circ$. Desta forma, é possível que o espalhamento dominante nestas áreas tenha sido do tipo *double bounce*, embora os valores da direção média da PPD para a unidade FP9 tenha indicado que o espalhamento predominante seja oriundo de múltiplas interações decorrentes da estrutura aleatória do volume do dossel florestal. É importante notar que a resposta de polarização destas unidades apresentaram altura do pedestal relativamente alta.

De acordo com Zebker e van Zyl (1991), isto sugere a ocorrência de uma variação considerável das propriedades de espalhamento em elementos de resolução adjacentes, ou seja, de um indicador da presença de um componente de espalhamento não polarizado (despolarização). A altura do pedestal da unidade FP2 estaria relacionada com a densidade, já conforme Evans et al. (1988) este comportamento pode estar relacionada com a maior densidade da vegetação ($N = 404$ ind/ha).

Apesar de não avaliado neste estudo, a rugosidade do solo aparentemente foi preponderante para um pedestal relativamente alto, pois a maior fração de abertura do dossel (%) da FP9 (Tabela 5.3), possivelmente contribuiu para uma maior exposição e interação do solo com a onda incidente, pois de acordo com os estudos de Matthaeis et al. (1991) e van Zyl (1989), os maiores valores de altura do pedestal estão relacionados com o aumento da rugosidade da superfície.

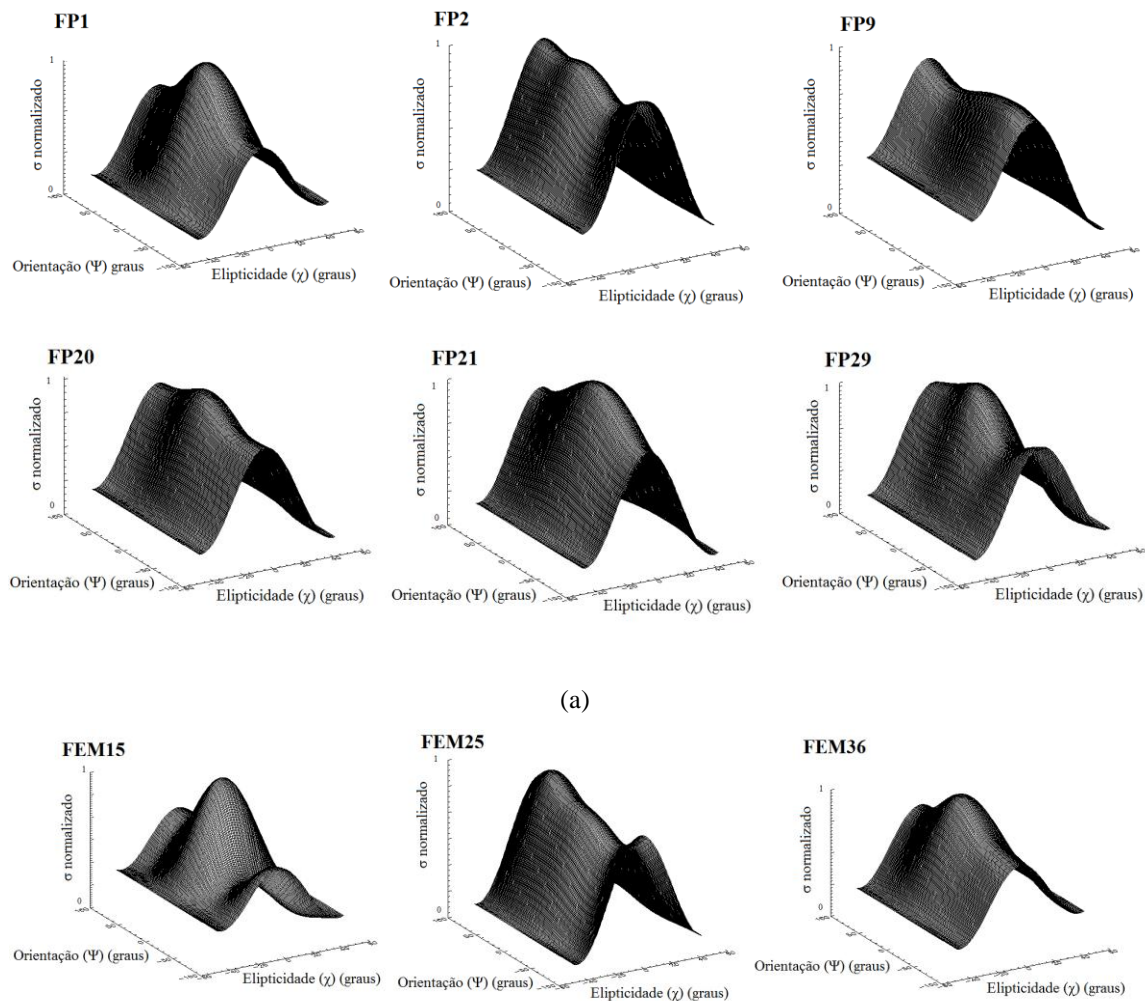


Figura 5.14 – Resposta de polarização em banda L (ALOS/PALSAR) para unidades de (a) floresta primária, (b) floresta com exploração madeireira, (c) sucessão secundária avançada, (d) sucessão secundária intermediária, (e) sucessão secundária inicial na região do Tapajós – PA, Brasil.

(continua)

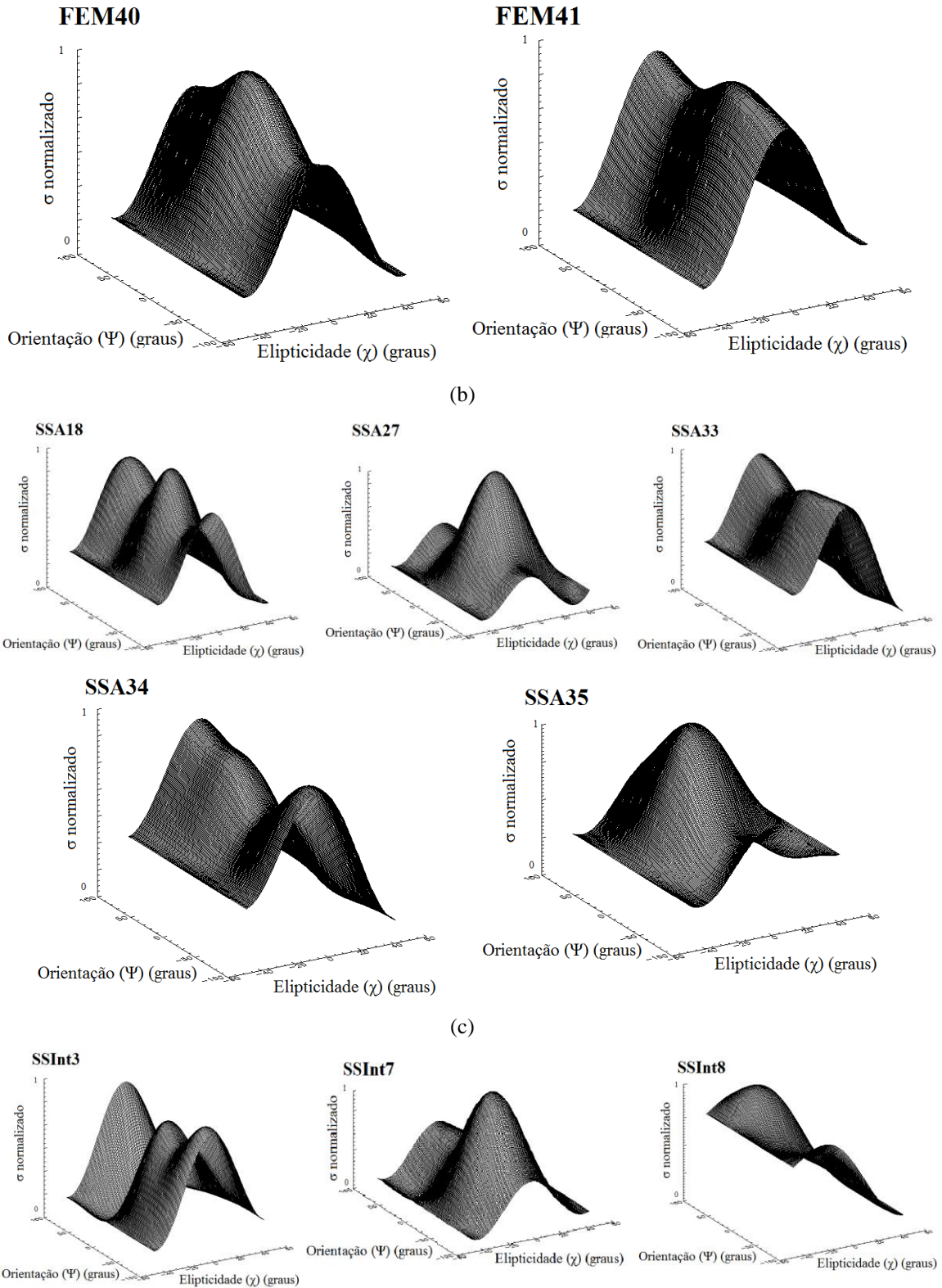


Figura 5.14 – Continuação.

(continua)

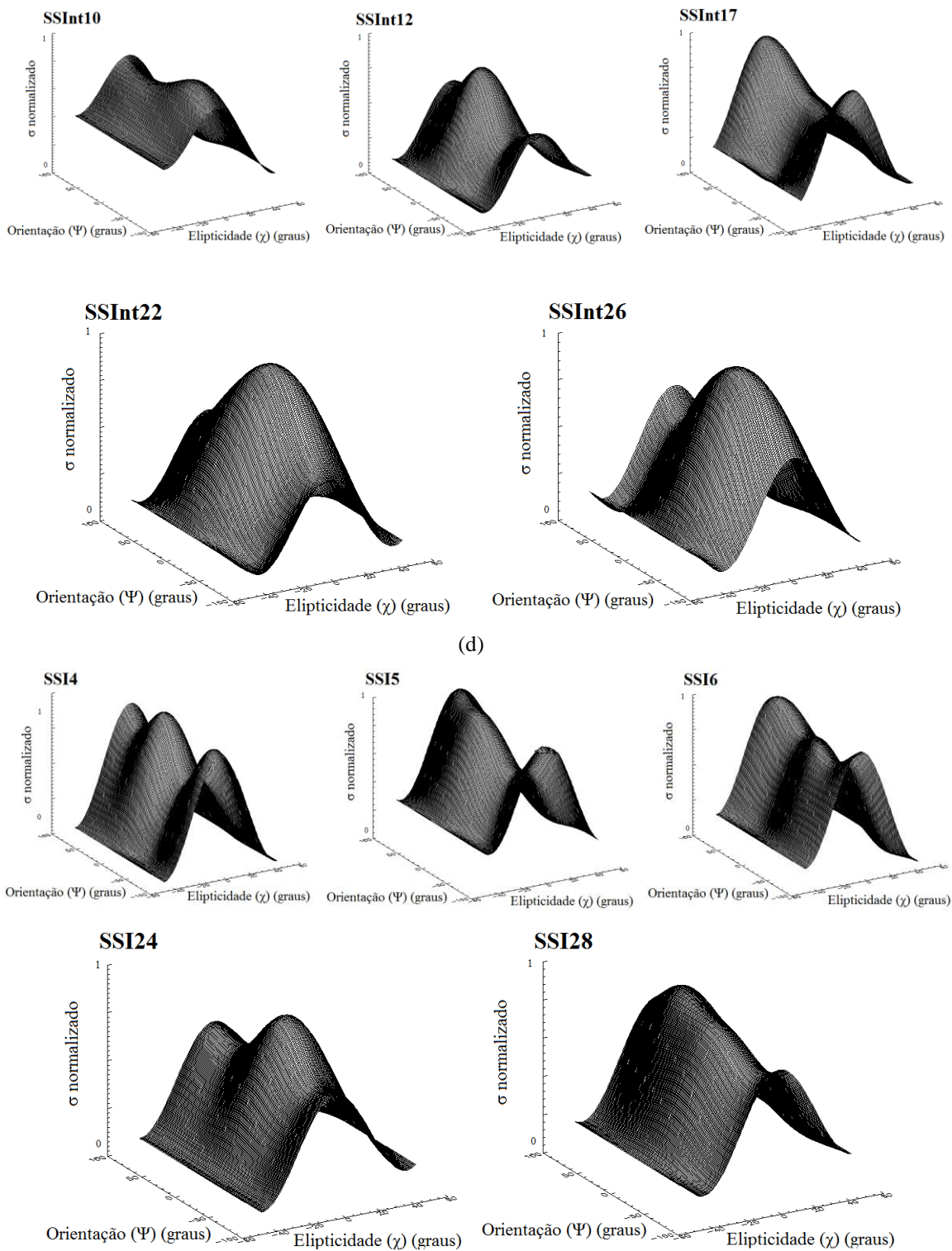
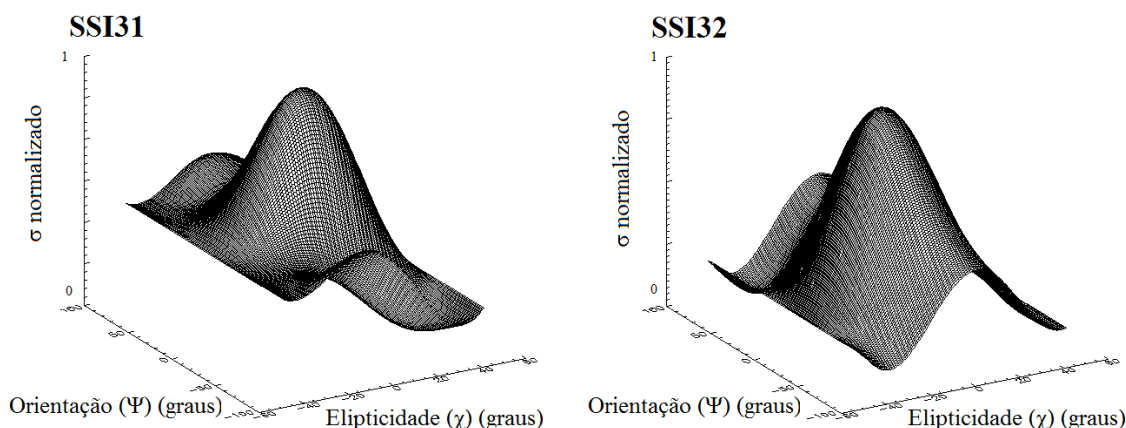


Figura 5.14 – Continuação.

(continua)



(e)

Figura 5.14 – Conclusão.

Floresta com exploração madeireira

Na Figura 5.14b foi possível observar três grupos distintos de resposta de polarização paralela. As unidades amostrais FEM15, FEM36, FEM37 e FEM40 foram as que apresentaram maior grau de similaridade. Suas respostas de polarização indicaram que os maiores valores de σ ocorreram em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), com orientação preferencialmente horizontal ($\psi = 0^\circ$). Este comportamento é semelhante ao encontrado em Santos et al. (2009) para a mesma tipologia florestal e possivelmente esteja ligado a ocorrência de dosséis mais homogêneos, com a maior parte dos galhos orientados horizontalmente. A Figura ilustra o trecho de um perfil fisionômico-estrutural dessa classe temática, destacando certa homogeneidade do dossel, intercalada por algumas poucas árvores dominantes, que pode condicionar a configuração polarimétrica acima mencionada.

Neste perfil esquemático (Figura 5.15) pode-se constatar que a homogeneidade do dossel é formada por mais de 50% do total de indivíduos (Figura 5.7b) além de árvores dominantes esparsas. Adicionalmente, por meio da altura do pedestal, relativamente alta, é possível constatar a importância do espalhamento múltiplo, já que em Evans et al. (1998) e McNairn et al. (2002) esse tipo de espalhamento é o causador do pedestal.

FEM15



Figura 5.15 – Perfil fisionômico-estrutural (transecto de 25 x 100m) de floresta com exploração madeireira (FEM15), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

Já a unidade FEM25 apresentou resposta distinta das demais, com ocorrência de maiores valores de σ em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), com orientação preferencialmente vertical ($\psi = \pm 90^\circ$). Este tipo de comportamento da resposta de polarização é semelhante ao comportamento encontrado para refletores de canto triédricos. Isto indica que na área citada, o espalhamento oriundo de galhos grossos e do tronco (orientação vertical) e a interação com as estruturais horizontais do dossel e da formação de clareiras (interação solo-tronco) apresentaram uma contribuição importante no total retroespalhado (Figura 5.16). Este tipo de comportamento encontrado nesta unidade amostral pode ser definido como oriundo de múltiplas interações, decorrentes da formação e estrutura aleatória da floresta em análise, corroborados pelos valores da direção média da diferença de fase para essa unidade.

FEM25

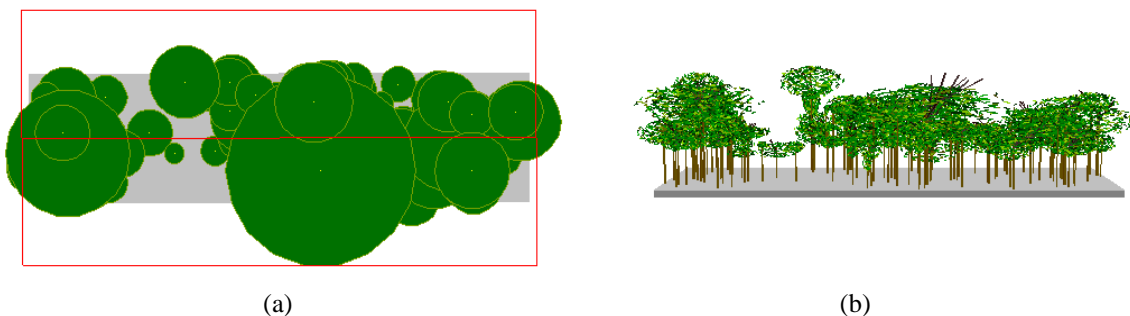


Figura 5.16 – Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 25 x 100m, de floresta com exploração madeireira (FEM25), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

As unidades FEM38 e FEM41 apresentaram alto grau de similaridade. Suas respostas de polarização indicaram que os maiores valores de σ ocorreram em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), entretanto com orientação aproximada de $\psi = \pm 45^\circ$. De acordo com Gonçalves (2007) é possível que o espalhamento dominante nestas áreas seja do tipo

double bounce. Adicionalmente, é possível constatar que na FEM41 a altura do pedestal indica que na área analisada há predominância do espalhamento múltiplo, corroborada pelos valores da direção média da PPD (Figura 5.14b).

Para áreas sob exploração madeireira, este tipo de comportamento (*double bounce*) é esperado, devido ao número de clareiras resultantes do corte de algumas árvores de valor comercial e o impacto da derrubada sobre outras árvores contíguas. Também, por que este tipo de floresta madura tem uma estrutura vertical bem definida em vários estratos com uma vegetação arbustiva menos desenvolvida (cilindros finos aleatoriamente distribuídos), que passam a ter uma maior influência na resposta SAR com a abertura das clareiras e o estabelecimento posterior de um processo regenerativo natural por meio do crescimento rápido e homogêneo das pioneiras. A(s) unidade(s) FEM15, FEM36 e FEM37 apresentaram mais espalhadores orientados horizontalmente ($\psi = 0^\circ$) e isto acarreta um maior retorno em HH do que em VV. De acordo com Santos et al. (2009) notou-se que a exploração madeireira de médio e alto impacto pode aumentar a heterogeneidade estrutural do povoamento analisado, comprovando as diferenças nas respostas polarimétricas decorrentes dessa mudança no presente estudo.

Sucessão secundária avançada

A resposta de polarização da unidade SSA27 indicou que os maiores valores de σ ocorrem em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), com orientação preferencialmente horizontal ($\psi = 0^\circ$). É possível que esta dependência seja em consequência da ocorrência de dosséis mais homogêneos, com a maior parte dos galhos orientados horizontalmente. Entretanto, esta resposta é similar as observadas para refletores de cantos triédricos, o qual possuem uma geometria de espalhamento do tipo *double bounce*, quando a entrada do refletor está alinhado com a direção da radiação eletromagnética, como mencionado em Zebker e Norikane (1987). Possivelmente, este efeito deve ter sido decorrente da formação de clareiras na unidade em questão, conforme pode ser visto na Figura 5.17.

Embora haja uma forte contribuição de que o espalhamento seja oriundo de múltiplas interações dos elementos espalhadores com orientação preferencialmente horizontal (dossel florestal homogêneo), o espalhamento do tipo *double bounce* (interação solo-tronco) oriundo das clareiras nessa unidade é, neste caso, considerado predominante. Este comportamento é corroborado pelos valores médios de PPD ($SSA27 = 173^\circ$), pois de acordo com por Kuga e Zhao (1996) onde existem condições para o espalhamento do

tipo *double bounce*, a fase média de espalhamento muda para aproximadamente 110° para alvos naturais.

SSA27

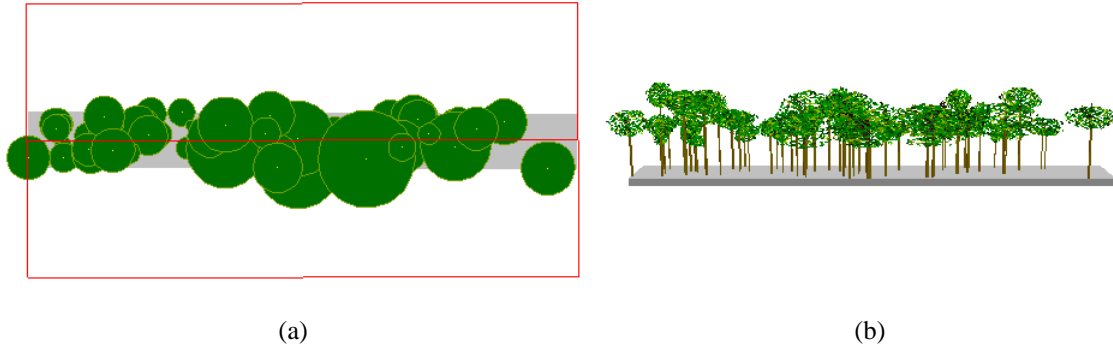


Figura 5.17 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 100m, de floresta em estágio de sucessão secundária avançada (SSA27), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

A unidade SSA35 apresentou resposta de polarização com maiores valores de σ em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), com orientação preferencialmente vertical ($\psi = 90^\circ$). Este tipo de comportamento é semelhante ao encontrado para a mesma tipologia em análise por Santos et al. (2009), onde para os autores o maior retorno em VV com relação a HH consistem do aumento da interação *double bounce* oriundos de difusores com a orientação preferencialmente vertical, comprovado pelos valores de PPD (161°) para esta unidade amostral.

Apesar da forma da resposta de polarização para a unidade SSA34 ser substancialmente diferente da anterior, a mesma possui maiores valores de σ em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$) e orientação preferencialmente vertical ($\psi = \pm 90^\circ$). Entretanto, este comportamento de resposta de polarização mostra uma forte similaridade com a resposta teórica de cilindros condutores finos e curtos (i.e. elementos espalhadores de menores dimensões do que o comprimento de onda). Isto sugere que o espalhamento por pequenos galhos é uma importante contribuição para o retroespalhamento total desta unidade.

Embora tenha uma resposta de polarização à primeira vista bastante similar a anterior, a unidade SSA33 possui maiores valores de σ em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), porém os maiores retornos são semelhantes em HH ($\psi = 0^\circ$) e VV ($\psi = \pm 90^\circ$). De acordo com McNairn et al. (2002) respostas de polarização com este comportamento são governadas pelo espalhamento múltiplo, oriundos de múltiplos espalhadores orientados aleatoriamente. Esta afirmação encontra respaldo nos valores da direção média de PPD ($\sim 25^\circ$). Os valores elevados de altura do pedestal para as unidades SSA33 e SSA34

sugerem, de acordo com Zebker e van Zyl (1991) a ocorrência de uma variação considerável das propriedades de espalhamento em elementos de resolução adjacentes. Isto confirma a sensibilidade da altura do pedestal na identificação do espalhamento múltiplo e volumétrico.

A unidade SSA18 apresentou resposta de polarização bastante similar a resposta apresentada por McNairn et al. (2002) para alguns cultivos agrícolas. A relação entre a resposta de polarização linear máxima e mínima ($HH \approx VV$) é o indicativo de alvos considerados rugosos relativos ao comprimento ao maior comprimento de onda em banda L. Somente analisando a resposta de polarização é possível verificar a presença de espalhamentos múltiplo e volumétrico, pois há grande contribuição de elementos espalhadores horizontais (galhos) e verticais (troncos). É importante notar que a resposta de polarização desta unidade apresentou pedestal relativamente alto, indicando que a polarização varia aleatoriamente dentro destes alvos, sendo indicativo do espalhamento múltiplo e volumétrico.

Entretanto, notou-se que a presença de clareiras pode ter favorecido o aumento do espalhamento do tipo *double bounce* decorrente da interação solo (polarização HH) com o tronco das árvores (polarização VV), conforme pode ser visto na Figura 5.18.

SSA18

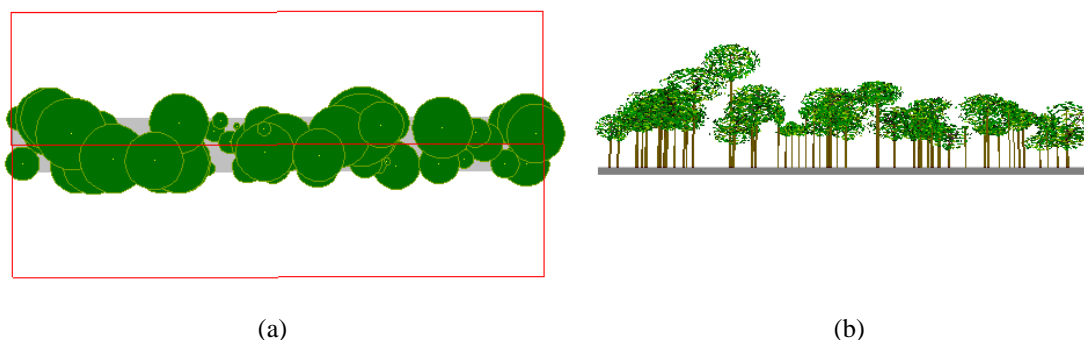


Figura 5.18 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 100m, de floresta em estágio de sucessão secundária avançada (SSA18), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

Sucessão secundária intermediária

A unidade SSInt3 apresentou resposta de polarização bastante similar àquela observada para refletores de canto diédricos (presença de dois pontos de mínima nas polarizações lineares), com orientação aproximada de $\psi = \pm 45^\circ$. Desta forma, era esperado, com base na forma desta resposta de polarização que o espalhamento dominante nesta área fosse do tipo *double bounce*, corroborado pelos valores da direção média de PPD

(180°). Porém, a altura do pedestal relativamente alta de certa forma contrapõe este resultado, já que a mesma é um atributo indicativo da tendência de comportamento de espalhamento volumétrico. Adicionalmente, é possível verificar que o aumento na complexidade estrutural em relação aos estágios florestais menos desenvolvidos, ou seja, a formação de dois estratos bem definidos, além da não remoção de indivíduos de algumas espécies denotou um caráter estruturalmente diferenciado a esta área, conforme pode ser visto na Figura 5.19.

SSInt3

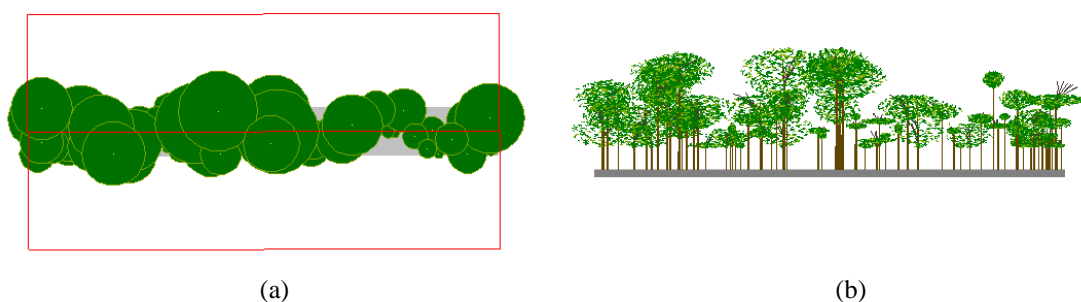
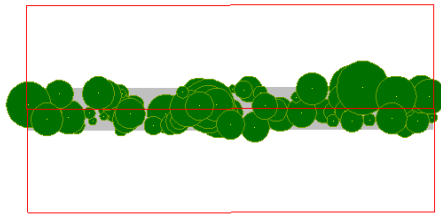


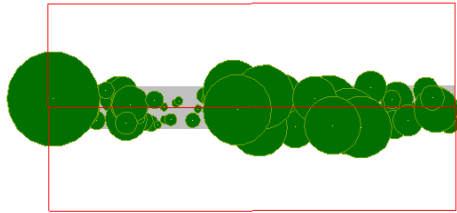
Figura 5.19 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 100m, de floresta em estágio de sucessão secundária intermediária (SSInt3), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

As unidades SSInt7, SSInt22 e SSInt 26 (Figura 5.20) apresentaram resposta similar, pois os maiores valores de σ ocorreram em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), com orientação preferencialmente horizontal ($\psi = 0^\circ$). Para as unidades SSInt22 e SSInt26 este comportamento está relacionado com a ocorrência de dosséis homogêneos, com maior parte dos galhos orientados horizontalmente. Porém, para a unidade SSInt7 o mais provável é que o maior retorno em HH em relação a VV esteja associado a uma combinação de dossel uniforme mais homogêneo, com estrato superior composto por árvores dominantes de estruturas (galhos) com orientação preferencialmente horizontal. Este tipo de resposta de polarização são similares as encontradas em Santos et al. (2009) e Narvaes et al. (2010), utilizando-se a mesma frequência de análise para ambientes de floresta tropical, em condições florístico-estruturais semelhantes a este estudo e, em consequência condizentes com a arquitetura das árvores dominantes desta área em análise.

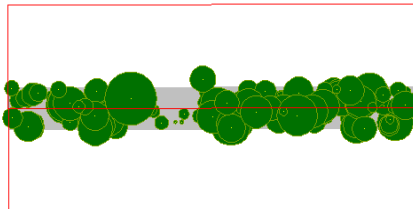
SSInt22



SSInt7



SSInt26



(a)

(b)

Figura 5.20 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 100m, de floresta em estágio de sucessão secundária intermediária (SSInt22, SSInt7 e SSInt26), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

As unidades SSInt10 e SSInt12 embora não possuam uma resposta polarimétrica de mesma forma, o seu comportamento mostrou-se similar. As respostas de polarização de ambas indicaram que os maiores valores de σ ocorreram em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), com orientação aproximada de $\psi = \pm 45^\circ$. É provável que esta dependência seja decorrente da estrutura aleatória dos elementos espalhadores da floresta dos estratos constituintes nesta área.

De acordo com Gonçalves e Santos (2008) ao analisar a estrutura desta tipologia foi possível identificar a presença de dois estratos bem definidos, sendo que o mesmo foi constatado neste estudo (Figura 5.21) e de um gradiente positivo dos parâmetros ecológicos (DAP e HT), em relação às unidades de sucessão secundária inicial.

SSInt10



Figura 5.21 - Perfil fisionômico-estrutural (transecto de 10 x 100m) de floresta em estágio de sucessão secundária intermediária (SSInt10), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

É possível que a presença de indivíduos remanescentes tenha contribuído para este tipo de comportamento das respostas polarimétricas, pois copas densas e as estruturas aleatórias dos galhos grossos orientados a 45° das espécies remanescentes do estrato superior *Goupia glabra* Aubl. (HT = 26,4 m), *Minquartia guianensis* Aubl. (HT = 23,50 m), *Myrcia paivae* O.Berg (HT = 21,56 m), *Aegiphila* sp. (HT = 22,53 m), *Jacaranda copaia* D.Don (HT = 21,56 e 24,47 m), *Guatteria ovalifolia* R.E.Fr. (HT = 22,53 m) podem ter favorecido este tipo de comportamento. Cabe ainda ressaltar, que a unidade SSInt10 se destacou pela elevada altura do pedestal (Figura 5.14d), o que comprova a importância dos dois estratos formados logo abaixo do dossel construído por árvores remanescentes, como os responsáveis pelo espalhamento múltiplo e volumétrico proporcionado pela estrutura aleatória de seus dosséis. Entretanto, os valores da direção média de PPD contrapõem esta afirmação, indicando que o espalhamento predominante é do tipo *double bounce*. (Figura 5.12d).

A unidade SSInt17 possui uma resposta polarimétrica com os maiores valores de σ em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), com orientação preferencialmente vertical ($\psi = \pm 90^\circ$). Possivelmente, este comportamento deva estar relacionado a maior densidade de indivíduos presentes na área ($N/ha = 1070$ ind/ha) com espalhamento predominante do tipo *double bounce*. Este tipo de fenômeno provavelmente deva estar associado a maior capacidade da onda incidente em penetrar no dossel florestal (maior profundidade de penetração vertical da onda), por ser uma tipologia menos desenvolvida estruturalmente, fazendo com que haja uma maior interação solo-tronco. Os valores médios de PPD para esta unidade (146°) comprovam tal assertiva a respeito.

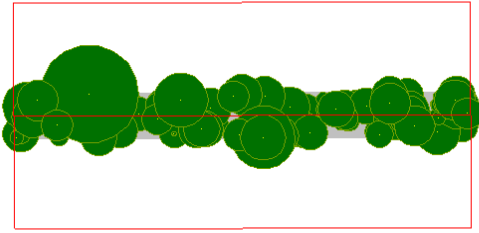
A unidade amostral SSInt8 foi a que apresentou comportamento considerado atípico, pois sua resposta de polarização foi similar com a resposta teórica de uma hélice orientada a direita, conforme pode ser visto em van der Sanden (1997), onde os valores

máximos de σ ocorreram na polarização circular RR ($\chi = -45^\circ$), com ângulo de orientação com orientação preferencialmente na vertical ($\psi = \pm 90$). Este comportamento de resposta polarimétrica foi semelhante ao encontrado por Gonçalves (2007), utilizando a mesma frequência de análise do presente estudo e em floresta sob diferentes regimes de manejo.

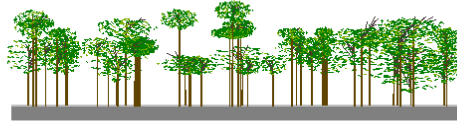
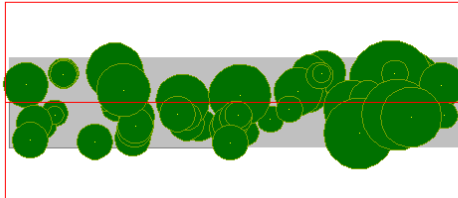
Sucessão secundária inicial

Para esta tipologia houve a formação de três grupos com respostas de polarização bem distintas. O primeiro, composto pelas unidades SSI4, SSI6 e SSI24, apresentou respostas polarimétricas semelhantes às encontradas para refletores de canto diédricos, com dois pontos de mínima nas polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$) com orientação preferencial de 45° . Desta forma, com base na forma desta resposta de polarização, o espalhamento dominante nesta área é considerado do tipo *double bounce*. Os valores da direção média de PPD corroboram esta afirmação (123° ; 158° ; 170° , respectivamente). Todavia, a componente de espalhamento volumétrico também é importante, pois somente analisando a resposta de polarização é possível verificar a presença deste tipo de espalhamento, havendo grande contribuição de elementos espalhadores horizontais (galhos) e verticais (troncos), comprovados pela contribuição equilibrada dos maiores valores de σ em $HH \approx VV$. De acordo com McNairn et al. (2002) este tipo de comportamento é típico do espalhamento de múltiplas interações e volumétrico. Esta contribuição das orientações lineares para a unidade SSI4 e SSI6 talvez seja decorrente da ocorrência de um a dois estratos inferiores mais homogêneos, com a maior parte dos galhos orientados horizontalmente. Por sua vez, a contribuição dos elementos espalhadores orientados verticalmente é consequência do espalhamento direto dos troncos contidos nos estratos superiores um pouco mais desenvolvidos estruturalmente e de árvores emergentes, conforme pode ser visto na Figura 5.22.

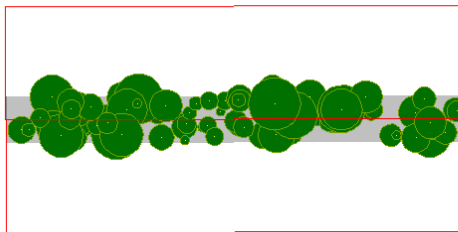
SSI4



SSI6



SSI24



(a)

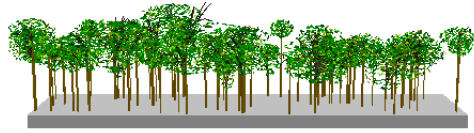
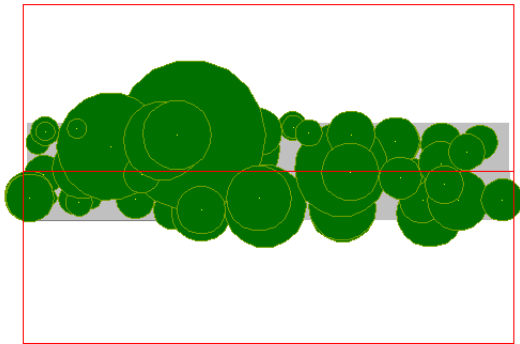
(b)

Figura 5.22 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) em transectos de 10 x 100m (SSI4 e SSI24) e de 10 x 50m (SSI6), de floresta em estágio de sucessão secundária inicial (SSI4, SSI6 e SSI24), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

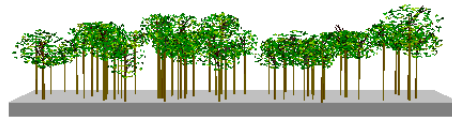
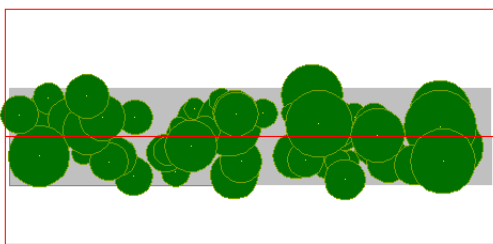
Porém, um fator determinante para que houvesse um maior retorno dos valores de σ para a polarização horizontal para a unidade SSI24, seja devido a ocorrência de dossel mais homogêneo, com a maior parte dos galhos orientados horizontalmente. Para esta área, a grande densidade de indivíduos ($N = 1110$ indivíduos/ha), aliada a grande frequência de espécies pioneiras, tais como *Vismia japurensis* Reichardt (Lacre-vermelho), *Cecropia leucoma* Miq. (Embaúba branca), *Aegiphila* sp. (Pau de muquem), dentre outras, contribuíram para ocorrência deste tipo de resposta. Adicionalmente, a formação de clareiras contribuiu para o aumento desta resposta em relação a VV, pois os troncos mais finos (DAP médio = 9,34 cm) tendem a ter menos influência no retroespalhamento final.

O grupo formado pelas unidades SSI31 e SSI32 (Figura 5.23), embora tenha tido comportamento polarimétrico bastante semelhante, as suas respostas polarimétricas foram decorrentes de diferentes fatores.

SSI31



SSI32



(a)

(b)

Figura 5.23 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 50m, de floresta em estágio de sucessão secundária inicial (SSI31 e SSI32), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

A resposta de polarização da unidade amostral SSI31 é semelhante à refletoras de canto diédricas, com presença de dois pontos de mínima nas polarizações lineares, e orientação aproximada de 45° . Este tipo de resposta é considerada como espalhamento dominante do tipo *double bounce*, pois além da forma da resposta de polarização, os valores médios de PPD comprovam a predominância deste mecanismo de espalhamento (168°). Outro fator chave observado foi que a resposta de polarização desta unidade apresentou pedestal alto. Para Zebker e van Zyl (1991) a um pedestal considerado alto sugere a ocorrência de uma variação significativa entre os elementos de resolução. Com esta afirmação, este parâmetro sugeriu que a unidade em questão apresenta características florístico-estruturais diferenciadas a cada elemento de resolução (25 m^2).

Já a unidade SSI32, apesar da resposta polarimétrica apresentar características aparentemente com mesma interpretação há algumas diferenças sutis que devem ser levadas em consideração. Sua resposta de polarização indicou que os maiores valores de σ ocorreu em polarizações lineares ($\chi = 0^\circ$), com orientação preferencialmente horizontal ($\psi = 0^\circ$). Este comportamento foi decorrente da ocorrência de dosséis mais homogêneos, com a maior parte dos galhos orientados horizontalmente. Ainda, em

relação ao encontrado para a unidade anterior, além da homogeneidade do dossel florestal, a abertura de clareiras também foi o fator preponderante para a predominância do mecanismo de espalhamento *double bounce*, corroborado pelos valores médios de PPD desta unidade (172°).

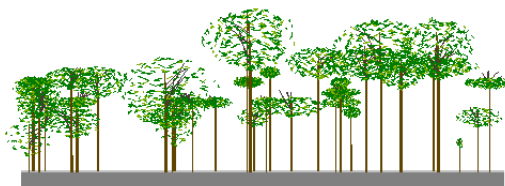
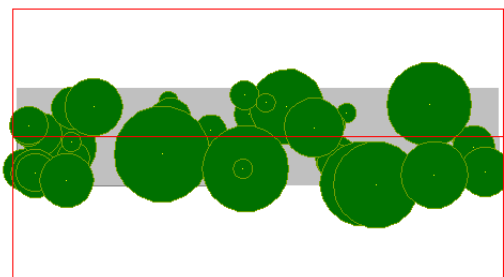
O último grupo de unidades amostrais SSI5 e SSI28 (Figura 5.24) mostrou comportamento similar. A resposta de polarização para a unidade SSI5 indicou que os maiores valores de σ ocorreu na polarização linear ($\chi = 0^\circ$), com orientação preferencialmente vertical ($\psi = \pm 90^\circ$).

Este comportamento foi similar ao encontrado para unidades em diferentes estágios de sucessão secundária no estudo de Santos et al. (2009). Para estes autores, tal resposta de polarização mostrou-se similar à resposta teórica de cilindros condutores curtos e finos, com raios de menor dimensão do que o comprimento de onda correspondente. Segundo tais autores, este tipo de espalhamento é oriundo de galhos pequenos, com orientação preferencialmente vertical, tendo papel importante na contribuição do retroespalhamento.

Embora a densidade de indivíduos tenha sido baixa, quando comparado com as demais unidades desta tipologia essa demonstrou um comportamento de espalhamento oriundo de reflexão de canto (*double bounce*), corroborado pelos valores da direção média de PPD (137°). Possivelmente o espalhamento múltiplo tenha sido ocasionado pelos elementos espalhadores de orientação preferencialmente vertical - troncos de árvores de pequeno diâmetro, simulando cilindros finos e curtos - do dossel florestal esparsa ao longo da unidade. Adicionalmente, a altura do pedestal relativamente alta indica a importância do espalhamento volumétrico oriundo de múltiplas interações, conforme pode ser visto em Mc Nair et al. (2002), Zebker e Van Zyl (1991), Evans et al. (1988), Zebker e Norikane (1987), entre outros.

Quando o comportamento da resposta de polarização apresenta valores de σ semelhantes em HH e VV (SSI28), segundo Dobson e Ulaby (1998) e McNairn et al. (2002) as superfícies são consideradas rugosas, sob diferentes condições de ângulo de incidência. Com base nestas assertivas é possível concluir que as maiores dimensões das copas do dossel superior possam ser consideradas mais rugosas por ocasião de sua interação, com relação a SSI5.

SSI5



SSI28

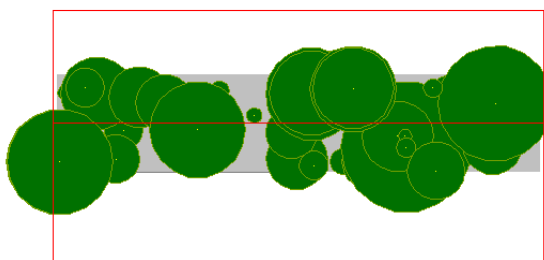


Figura 5.24 - Perspectiva vista de cima (a) e perfil fisionômico-estrutural (b) de um transecto de 10 x 50m, de floresta em estágio de sucessão secundária inicial (SSI5 e SSI28), analisado na Floresta Nacional do Tapajós-PA.

Para o melhor entendimento da interação da onda incidente com o alvo florestal, abaixo são mostradas todas as condicionantes encontradas na resposta de polarização co-polarizadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Definição das combinações de polarização, em termos do ângulo de orientação (Ψ) e de elipticidade (χ), em relação ao σ normalizado, para todas as fitofisionomias analisadas.

Unidades amostrais	Combinação de polarização	Parâmetros de polarização			
		Onda recebida		Onda transmitida	
		Ψ	χ	Ψ	χ
FP1, FP20, FP21, FEM15, FEM36, FEM37, FEM40, SSA27, SSInt7, SSInt22, SSInt26, SSI4, SSI32	HH	0°	0°	0°	0
FP29, FEM38, FEM41, SSInt10, SSInt12, SSI31	VH/HV	±45°	0°	±45°	0°
FEM25, SSA34, SSA35, SSInt17, SSI5, SSI28	VV	±90°	0°	±90°	0°
FP2, FP9, SSA18, SSA33, SSInt3, SSI4, SSI6	HH≈VV	0 ± 180°	0°	0 ± 180°	0°
SSInt8	RR	±90°	-	±90°	-

De acordo com as diferentes superfícies de resposta obtidas para a grande maioria das tipologias analisadas, foi possível constatar que o retroespalhamento das áreas em análise foi dominado por mecanismos físicos de espalhamento distintos, decorrente da variabilidade florístico-estrutural entre as diferentes tipologias investigadas. Todavia, a combinação de sua diversidade florística, distribuição diamétrica e a altura das árvores dominantes não se constituem em fatores únicos na determinação destas respostas de

polarização. Aliado a isto, é provável que o comportamento das respostas de polarização também seja influenciado pela arquitetura do dossel e distribuição espacial das árvores (que ocasionam variações na fração de abertura do dossel), densidade dos indivíduos e ao número de estratos componentes nas diferentes tipologias analisadas.

Em 1997, Cloude e Pottier propuseram um esquema de classificação não-supervisionada baseado no uso do plano em 3-D (entropia, anisotropia, ângulo alfa), este utilizado para extrair parâmetros médios de dados experimentais utilizando um algoritmo de suavização baseado em estatística de segunda ordem (matriz de coerência). Nesta técnica todos os mecanismos de espalhamento aleatório podem ser representados.

De acordo com Lee e Pottier (2009) a idéia chave é que a entropia (H) surge como uma medida natural da reversibilidade inerente dos dados de espalhamento, e que o ângulo alfa ($\bar{\alpha}$) pode ser utilizado para identificar os mecanismos de espalhamento médio subjacentes.

A escolha deste método de análise deveu-se pela sua versatilidade e aplicabilidade, além da possibilidade de comparação de resultados, pois este é amplamente aplicado para a identificação de mecanismos de espalhamento de alvos naturais.

A distribuição dos pixels de cada tipologia florestal em conjunto com os dados do IF₂₀₀₇ foram plotados no espaço de classificação bidimensional (H , $\bar{\alpha}$), conforme a Figura 5.25. Em adição, a Tabela 5.7 traz os resultados desta classificação, com os valores percentuais por zona de espalhamento. Na análise gráfica, notou-se que em todas as tipologias analisadas, a distribuição da maior parte dos *pixels* ocorreu na zona Z2 (cerca de 90%). Isto indica que para estas unidades (FP, FEM, SSA, SSInt), exceto as unidades de SSI com cerca de 70%, que na área experimental os processos de espalhamento predominante são os de alta entropia, ocasionado pelo espalhamento da vegetação com espalhadores anisotópicos aleatórios (CLOUDE e POTTIER, 1997; LEE e POTTIER, 2009).

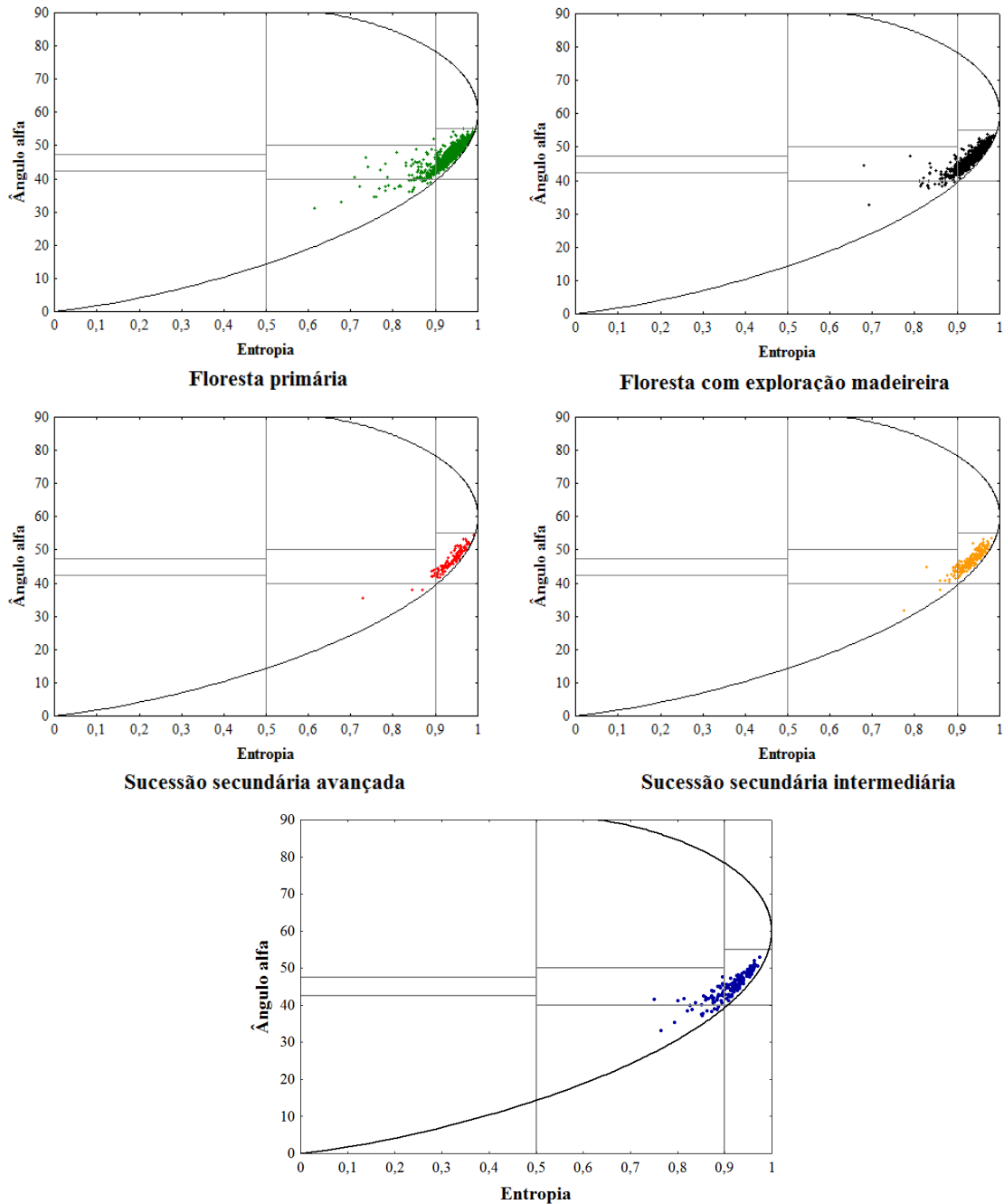


Figura 5.25 – Distribuição dos *pixels* no espaço de classificação bidimensional ($H, \bar{\alpha}$) para todas as fitofisionomias analisadas referentes ao IF₂₀₀₇.

De acordo com Lee e Pottier (2009) o espalhamento volumétrico de alta entropia ocorre quando $\bar{\alpha} = 45^\circ$ e $H > 0.9$ (zona Z2). Isto pode ocorrer devido ao espalhamento do tipo *single bounce* oriundo de uma nuvem de partículas curtas anisotrópicas ou oriundo do espalhamento múltiplo de uma nuvem de partículas de baixa perda simétrica. Segundo Cloude e Pottier (1997) e Lee e Pottier (2009) este espalhamento é ocasionado pelos dosséis florestais, assim como a dispersão de alguns tipos de superfícies vegetadas, com elementos de espalhamento anisotrópicos altamente aleatórios.

A aleatoriedade da estrutura florestal (principalmente galhos grossos), decorrentes da grande diversidade florística, provavelmente seja a responsável por este tipo de interação da onda incidente com a floresta. É importante observar que as proporções de pixels para cada zona citada foram similares, na maioria dos casos para as diferentes tipologias. Todavia, as unidades de SSI apresentaram aumento da percentagem de pixels na zona Z5 duas a quatro vezes superiores as demais tipologias. De acordo com Cloude e Pottier (1997) e Lee e Pottier (2009), a Z5 é referente ao mecanismo de espalhamento dominante do tipo dipolo. Tal zona inclui o espalhamento oriundo de superfícies vegetadas, com espalhadores anisotrópicos com correlação moderada relacionada à orientação dos espalhadores. Este comportamento indicou que as unidades de SSI os espalhamentos de média entropia, com independência da estrutura florestal e da composição florística são também importantes na definição dos processos predominantes de espalhamento.

A Tabela 5.7 mostra que todas as unidades amostrais apresentaram a maior percentagem dos pixels na zona Z2. A importância percentual das demais zonas foi observada, respectivamente, nas zonas Z5 e Z6. Além disso, para as unidades de SSI a zona Z6 também apresentou uma percentagem de *pixels* relevante, indicando que para esta unidade tipológica esta zona reflete o aumento na H devido a mudanças na rugosidade da superfície de espalhamento e devido aos efeitos de propagação da copa. Este tipo de comportamento diferenciado provavelmente deva ser devido à estratificação da floresta, geralmente composta por dois estratos bem homogêneos, com estruturas de orientação preferencialmente horizontais. O comportamento do dossel florestal para esta tipologia menos avançada do ponto de vista estrutural pode ter acarretado o aumento dos valores de entropia entre 0,6 e 0,7, já que de acordo com Lee e Pottier (2009) este comportamento é consequência de uma cobertura da superfície que compreende espalhadores elipsoidais achatados nos pólos, como por exemplo, folhas. Complementarmente, para esta zona (Z6) Cloude e Pottier (1997) salientam que este tipo de comportamento é representado pelo mecanismo de espalhamento do tipo superficial, onde neste tipo de espalhamento os valores elevados de entropia resultam da heterogeneidade observada nos dosséis florestais.

Tabela 5.7 - Valores percentuais dos *pixels* distribuídos nas zonas do espaço de classificação bidimensional ($H, \bar{\alpha}$), referentes ao IF₂₀₀₇

Zona	Unidade Amostral				
	FP	FEM	SSA	SSInt	SSI
Z1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Z2	89,5	92,1	92,3	89,4	69,7
Z3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Z4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Z5	7,9	6,4	5,1	9,7	22,4
Z6	2,2	1,5	2,6	1,0	7,9
Z7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Z8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Z9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Os testes F e teste t, empregados na detecção de diferenças entre as classificações, indicaram que houve diferença significativa entre as classificações de FP e FEM e FP e SSA. Entretanto, as demais fitofisionomias foram classificadas de forma equivalente, ao nível de significância de 5%, conforme pode ser visto na Tabela 5.8.

Embora as análises florístico-estruturais tenham demonstrado maior variação entre as unidades amostrais, inclusive referente a mesma tipologia, em relação ao critério comparativo utilizado, comprovou-se que o método de classificação foi considerado robusto na detecção de mudanças sutis entre condições fitofisionômicas mais próximas (FP, FEM e SSA). As tipologias de FP apresentaram diferenças nas classificações com relação às unidades tipológicas de FEM e SSA. Entretanto, era esperada uma maior representatividade de pixels na zona de classificação Z4 (mecanismo de espalhamento produzido por diedros), pois as demais análises exploratórias comprovaram a existência da presença do mecanismo de espalhamento do tipo *double bounce*, resultante da interação solo-tronco presente nas florestas.

Conforme pode ser observado nos diagramas de classificação bidimensional (Figura 5.25) as unidades de FP possuem uma distribuição dos pixels mais dispersa ao longo das zonas Z5 e Z6. No entanto, é importante salientar que as diferenças florístico-estruturais observadas entre unidades amostrais foram, de certa forma, consideradas relevantes.

Este método de classificação mostrou ser robusto para os dados em análise, ao contrário de Gonçalves (2007) que comprovou não haver diferenças nas classificações dos pixels, quando tratou somente com áreas de floresta com exploração madeireira de variadas condições de impacto.

Tabela 5.8 – Valor p do comparativo das classificações no espaço bidimensional ($H, \bar{\alpha}$) para todas as tipologias analisadas.

Comparação	valor p	
	β_0	β_1
FP/FEM	0,2141	0,0077*
FP/SSA	0,3657	0,0314*
FP/SSInt	0,9980	0,9 45
FP/SSI	0,3854	0,0 0
FEM/SSA	0,9038	0,7382
FEM/SSIn	0,4988	0,0958
FEM/SSI	0,3755	0,0749
SSA/SSInt	0,6194	0,2038
SSA/SSI	0,3957	0,0858
SSInt/SSI	0,34 4	0,0623

* Significativo ao nível de 5% de significância.

5.4 Modelagem da biomassa arbórea acima do solo

Para facilitar o entendimento do processo de geração do modelo de biomassa arbórea acima do solo final, a seguir são elucidados todos os passos para sua modelagem (Figura 5.26).

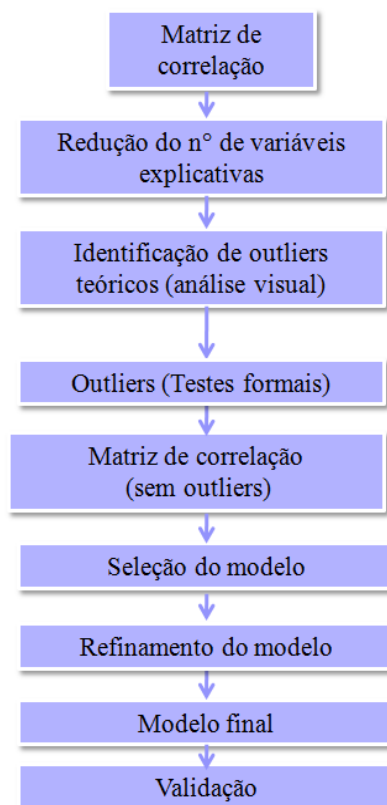


Figura 5.26 – Fluxograma da modelagem de biomassa arbórea acima do solo, por intermédio da utilização dos atributos polarimétricos.

A primeira fase para a geração do modelo final de biomassa arbórea acima do solo consiste na geração e análise da matriz de correlação e do diagrama de dispersão da variável dependente em análise com o total de atributos incoerentes (Figura 5.27) e coerentes (Figura 5.28). Conforme pode ser observado na matriz dos diagramas de dispersão da Figura 5.27, a biomassa arbórea acima do solo ($t \cdot ha^{-1}$) apresentou baixa relação linear com os atributos incoerentes em geral (com a presença de *outliers*). Todavia, ao analisar a matriz de correlação verificou-se que ao contrário do esperado, as razões de polarização paralela e cruzada, além dos índices de estrutura do dossel (*CSI*) e de espalhamento volumétrico (*VSI*) apresentaram relações inversas e, que apenas o coeficiente de retroespalhamento na polarização *VV* e a potência total (P_T) apresentaram correlações significativas, ao nível de 10% de significância.

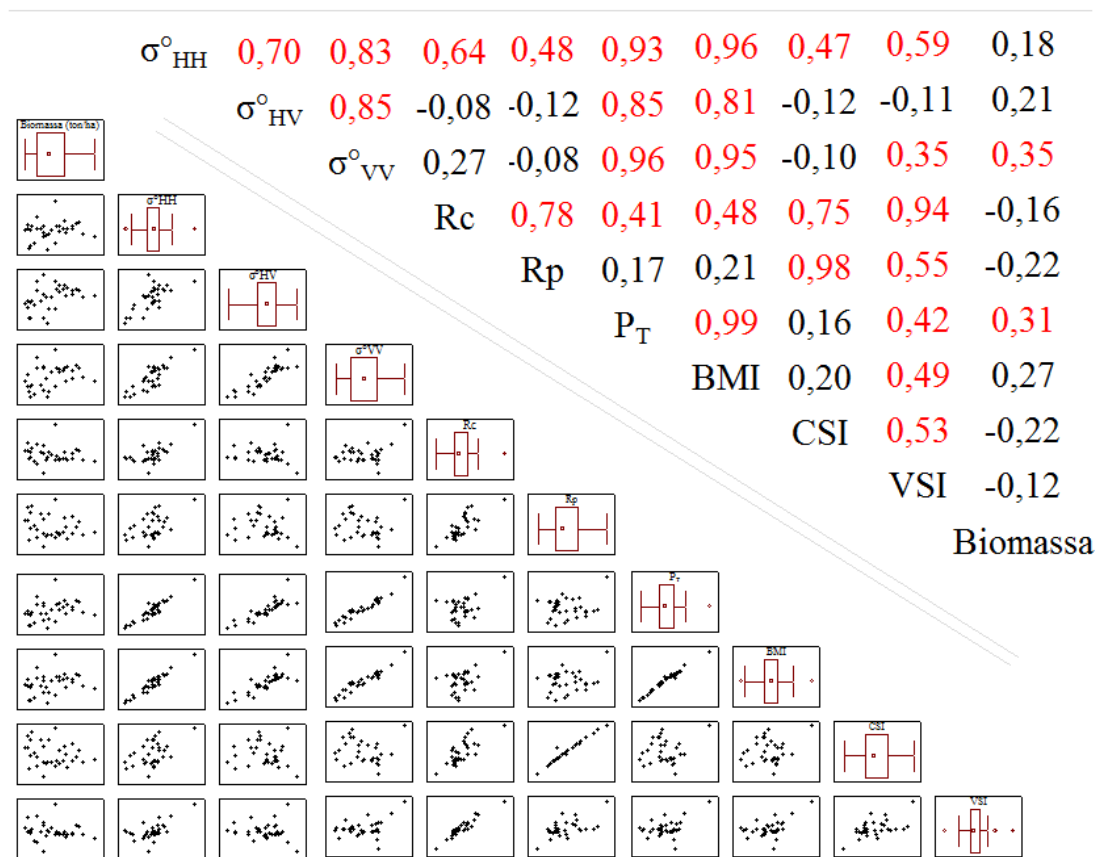


Figura 5.27 - Relação entre a biomassa e atributos incoerentes (matriz de correlação e diagramas de dispersão). Correlações significativas ao nível de 10% de significância são indicadas em vermelho.

Na análise dos diagramas de dispersão da Figura 5.28 os atributos coerentes, apresentaram, em geral, relações lineares mais fracas com a biomassa. A análise da matriz de correlação indicou que a componente volumétrica da decomposição de

Freeman-Durden (FREEMAN e DURDEN, 1998) e o atributo de fase da terceira componente de Touzi (ϕ_{s3}) (TOUZI, 2007; TOUZI et al., 2009) obtiveram relações diretas com a variável dependente. Contudo, o parâmetro denominado de ângulo de orientação médio ψ de Touzi possui relação inversa ao nível de significância de 10%.

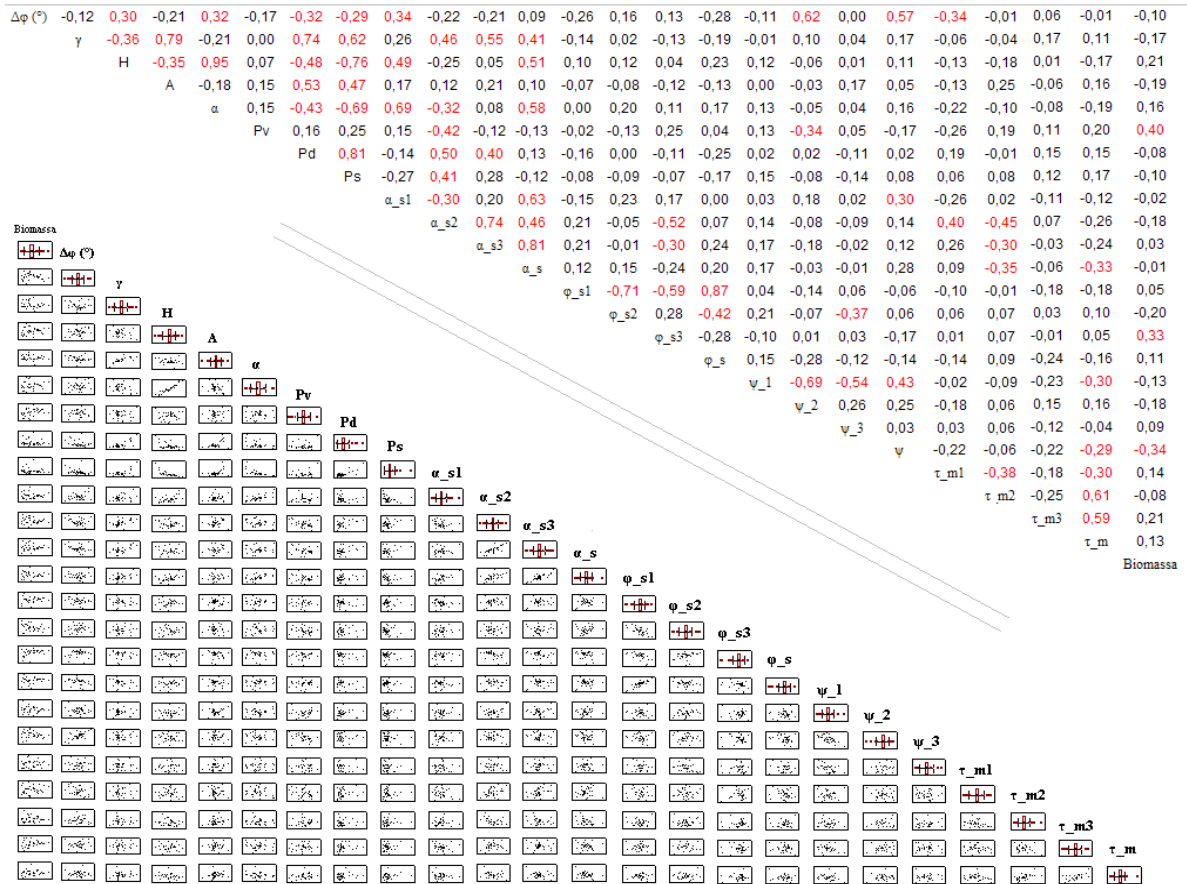


Figura 5.28 – Relação entre a biomassa e atributos coerentes (matriz de correlação e diagramas de dispersão). Correlações significativas ao nível de 10% de significância são indicadas em vermelho.

As análises conjuntas dos gráficos de dispersão e de seus valores de coeficiente de correlação mostraram que algumas variáveis explicativas possuem alta correlação entre si. As correlações lineares consideradas altas neste estudo (>0,80) em destaque foram: os coeficientes de retroespalhamento das polarizações VV e HV; a potência total e todos os coeficientes de retroespalhamento, devido ao fato da P_T englobar a informação de σ° de todas as polarizações possíveis; o índice de biomassa e as polarizações lineares e cruzadas do coeficiente de retroespalhamento e com a potência total; o índice de estrutura do dossel e a razão de polarização paralela; o índice de espalhamento volumétrico e a razão de polarização cruzada.

Com relação aos atributos incoerentes, a principal razão da alta correlação entre as variáveis explicativas supracitadas é decorrente da semelhança em suas formulações. Por exemplo, a representação de todos os mecanismos de espalhamento ocorrentes na floresta é formulada pela potência total, enquanto que o índice de biomassa é representado pelo somatório ponderado das polarizações lineares.

Os gráficos de dispersão da Figura 5.28 os atributos mais correlacionados linearmente foram a entropia e o ângulo alfa, derivados da decomposição dos autovalores e autovetores da matriz [T]; as componentes do *double bounce* e superficial de Freeman-Durden; as componentes da magnitude de Touzi α_{s3} e α médio; as componentes da fase da primeira componente Φ_{s1} e Φ médio de Touzi.

As altas correlações lineares entre as componentes *double bounce* e superficial, modeladas à partir da matriz [C] devem-se à semelhança no cálculo de suas componentes, pois somente os coeficientes α (double-bounce) e β (superficial) são introduzidos no cálculo das mesmas (FREEMAN e DURDEN, 1998).

Os parâmetros de magnitude possuem relações lineares fortes, pois α_{s1} refere-se a decomposição da matriz [T]_i do primeiro autovalor, o qual carrega a maior parte da informação contida, enquanto que o valor médio da magnitude (α_s) possui a informação de todos os autovalores da matriz [T]_i, além da fase da primeira componente (Φ_{s1}) e a fase média (Φ_s), ambas utilizadas para simular o tipo de espalhamento complexo em alvos incoerentes.

Nesta análise, notou-se que as maiores correlações entre as variáveis explicativas ocorreram entre os atributos incoerentes, principalmente devido à formulação específica dos atributos polarimétricos.

Na análise dos coeficientes de correlação lineares (também conhecidos como coeficientes de correlação de Pearson), por exemplo, quando duas variáveis são correlacionadas e sua correlação é alta, pode ser contemplada a possibilidade de descartar uma das duas variáveis, desde que uma variável explicativa altamente correlacionada carregue informação redundante. Portanto, para a utilização de dados PolSAR na modelagem da biomassa, a sua seleção deve ser realizada com cuidado.

Com base nesta informação, foram removidas para a construção do modelo as variáveis explicativas α_{s3} e Φ_{s1} , já que ambas fornecem informação específica a respeito de seus respectivos valores médios α_s e Φ_s , pois tais parâmetros fornecem a totalidade

da informação a respeito da magnitude - magnitude do tipo de simetria referente ao tipo de espalhamento do alvo - e da fase - fornece informação para uma completa caracterização do tipo de espalhamento do alvo - (TOUZI, 2007; TOUZI et al., 2009).

Além disso, optou-se por remover a componente superficial P_s de Freeman-Durden, pois neste caso, a remoção da P_s ao invés da P_d , para alvos florestais, é esperado uma maior resposta da componente volumétrica decorrente das estruturas florestais e do espalhamento de canto (*double bounce*) proporcionado pela interação solo florestal-tronco (FREEMAN, 2007), do que o espalhamento superficial, especialmente para a banda L (FREEMAN e DURDEN, 1998).

Todos os atributos incoerentes removidos das análises posteriores possuíam alta correlação entre si ($>0,80$). Também se optou pela retirada do coeficiente de retroespalhamento na polarização HV, pois o mesmo possui informação redundante em relação a potência total, além do σ_{HV}^o não possuir correlação significativa com a biomassa arbórea acima do solo (Figura 5.27). As razões de polarização cruzada e paralela foram preteridas com relação ao VSI e CSI, pois estes índices preconizados por Pope et al. (1994) possuem mais informação do que as razões de polarização. Além disso, em razão da sua formulação o VSI também foi mantido pelo fato deste possuir informação a respeito do BMI, este último excluído pela sua alta correlação com o σ_{HH}^o . Outro fator relacionado a exclusão do atributo BMI está relacionado com sua limitação, pois de acordo com Pope (1994) um aumento na biomassa florestal pode ocasionar tanto uma redução quanto uma elevação nos valores deste índice, dependendo da distribuição da biomassa e do comprimento de onda.

Devido à alta correlação entre as variáveis entropia e ângulo alfa médio ($r = 0,95$) estes atributos podem ser considerados complementares. Como consequência o ângulo alfa médio foi removido das análises subseqüentes, ao invés da entropia.

A remoção do coeficiente de retroespalhamento na polarização HV, ao invés da componente de espalhamento volumétrico de Freeman (P_v), deu-se pelo seu desenvolvimento matemático, o qual indica que este atributo nada mais é do que oito vezes o valor da polarização cruzada na matriz de espalhamento, conforme pode ser visto detalhadamente em Freeman (1998).

Para uma melhor compreensão dos dados de correlação analisados nas Figura 5.27 e Figura 5.28 a formulação do teste de correlação é dada como:

$H_0: \rho = 0, H_1: \rho \neq 0$, para teste bilateral.

A Tabela 5.9 mostra como exemplo os valores de p para o teste de correlação de Pearson entre a biomassa arbórea acima do solo e o conjunto de variáveis explicativas.

Tabela 5.9– Valores de correlação linear de Pearson dos atributos incoerentes e os seus respectivos valores p .

Atributo incoerente	Correlação com a biomassa
σ_{HH}	0,1797 p=0,31
σ_{VV}	0,3474* p=0,048
Rc	-0,1584 p=,379
Rp	-0,2154 p=0,229
P _T	0,3125* p=0,077
BMI	0,2742 p=0,123
CSI	-0,2169 p=0,225
VSI	-0,1183 p=0,512

(*) Valor significativo ao nível de 10% de significância.

A primeira fase para a identificação dos *outliers* consiste na análise gráfica dos diagramas de dispersão entre a biomassa e o conjunto total de variáveis explicativas. Nesta análise leva-se em conta apenas a sua presença, entretanto uma eventual remoção somente será executada numa fase posterior por intermédio da aplicação de testes formais para a detecção da presença dos mesmos. Essa análise gráfica foi realizada por intermédio da mediana, já que comparada com a média, a mediana possui a vantagem de ser muito insensível a *outliers* e casos extremos (SÁ, 2007).

Para uma melhor identificação dos *outliers*, foram analisados todos os considerados potenciais, por intermédio da utilização do diagrama *box plot*, como ilustrado em um exemplo de um atributo na Figura 5.29. Segundo Sá (2007) o *box plot* utiliza uma caixa retangular para cada grupo, onde cada caixa corresponde a 50% dos casos centrais, também chamado de *range* inter-quartil (RIQ), sendo que os valores excedentes a esse range são considerados *outliers*.

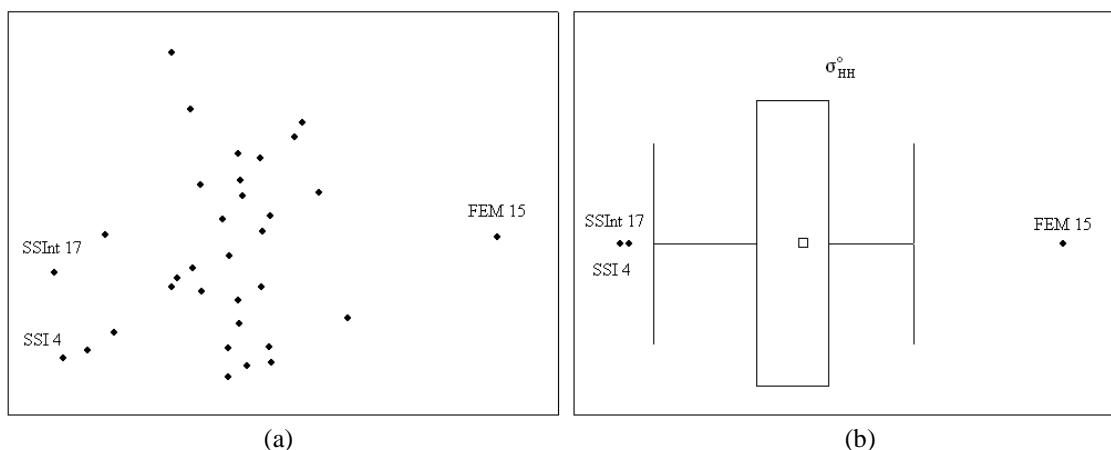


Figura 5.29 – Diagrama de dispersão (a) e do tipo Box-whisker (b) com a presença de outliers. O ponto central refere-se ao valor da mediana do conjunto de dados para a variável explicativa em questão (σ_{HH}°).

Por intermédio da análise dos diagramas de dispersão entre a variável dependente e o total de variáveis explicativas, foi possível constatar a ocorrência de 18 *outliers* no conjunto de observações (Tabela 5.10). Para facilitar a interpretação os *outliers* serão analisados por ordem tipológica, seguindo o desenvolvimento sucessional da floresta para cada unidade amostral.

Estas observações, consideradas como possíveis *outliers* podem ser visualizadas na Figura 3.5 (seção 3.2.3), na imagem em formato intensidade do ALOS/PALSAR, dentre as demais observações constituintes dos IF₂₀₀₅ e IF₂₀₀₇ (n = 35 observações). O primeiro *outlier* observado no diagrama de dispersão da componente *double bounce* de Freeman corresponde a única unidade de floresta primária encontrada (FP 29), considerada como possível *outlier*. A presença de clareiras e da estrutura mais desenvolvida pode ter ocasionado um maior retorno da reflexão de canto entre o solo florestal e o tronco de indivíduos de maior diâmetro, sobretudo pelo maior conteúdo de umidade presente no solo, já que esta unidade está localizada na região de floresta de vertente³. De acordo com Hopkins (2005) esta é caracterizada por ocorrer na inclinação dos platôs, com solos mais arenosos nas porções mais baixas, com teor de umidade moderado, podendo evoluir para úmido em períodos mais chuvosos.

Neste contexto, a capacidade de penetração da radiação torna-se cada vez menor à medida que o conteúdo de umidade aumenta, conforme pode ser visto em van der Sanden (1997). Entretanto, é importante ressaltar que além do conteúdo de umidade da

³ De acordo com Scudeller et al (2009) é considerada como uma subdivisão de habitats dentro da floresta de terra firme, considerada de transição entre a floresta de platô e de baixio, sendo que a estrutura e florística dessas formações são definidas principalmente pelo tipo de solo e relevo. Em adição, de acordo com Hopkins (2005) estes habitats também são acrescidos da floresta de campinarana arbórea.

estrutura volumétrica da floresta, o solo também exerce papel fundamental no retroespalhamento e na atenuação da radiação (WOODHOUSE, 2006). Com isso, espera-se que florestas de maior conteúdo de umidade (maiores constantes dielétricas) produzam maior retroespalhamento. Isto pode ser verificado no estudo de Freeman (2007), onde o aumento da constante dielétrica produziu maior retroespalhamento do tipo *double bounce*.

Tabela 5.10 – *Outliers* presentes na análise dos diagramas de dispersão referentes as amostras de treinamento (análise gráfica).

U.A.	Casos	Atributos incoerentes e coerentes com presença de outliers (análise visual)																				
		σ_{HH}	R _c	P _T	BMI	VSI	γ	A	α	Pd	Ps	α_{s1}	α_{s3}	α_s	Φ_{s1}	Φ_{s2}	Φ_{s3}	Φ_s	ψ_1	τ_{m2}	τ_{m3}	τ_m
FP29	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Pd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FEM15	9	σ_{HH}	R _c	P _T	BMI	VSI	γ	-	-	Pd	Ps	-	α_{s3}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSA18	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	α_{s3}	-	Φ_{s1}	-	-	Φ_s	-	-	τ_{m3}	-
SSA27	4	-	-	-	-	-	-	-	α	-	-	α_{s1}	α_{s3}	α_s	-	-	-	-	-	-	-	-
SSA34	1	-	-	-	-	-	-	-	α	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSA35	1	-	-	-	-	-	-	-	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSInt3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	Pd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSInt8	4	-	-	-	-	VSI	-	A	α	-	-	α_{s1}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSInt10	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Φ_{s3}	-	-	τ_{m2}	-	-	
SSInt12	2	-	-	-	-	-	-	-	-	Ps	-	α_{s3}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSInt17	2	σ_{HH}	-	-	BMI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSInt22	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	τ_{m3}	-
SSI4	4	-	-	-	-	VSI	-	-	-	Pd	Ps	-	α_{s3}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSI5	6	σ_{HH}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	α_{s3}	-	-	-	Φ_{s3}	-	ψ_1	τ_{m2}	-	τ_m
SSI6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	α_{s3}	-	-	-	-	Φ_s	-	-	-	-
SSI24	3	-	-	-	-	VSI	-	-	-	Pd	Ps	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSI31	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Φ_{s3}	-	-	τ_{m2}	τ_{m3}	-
SSI32	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Φ_{s2}	-	-	-	-	-	-	-

O segundo *outlier* considerado é referente a uma unidade amostral que tem como característica peculiar um grande número de atributos a serem considerados como *outliers* potenciais (FEM15). Esta observação localiza-se em um ambiente considerado de platô, como a maioria das observações. Com isso, é possível visualizar na Figura 3.5 que esta unidade é influenciada por um fragmento florestal que sofre fortes influências antrópicas, limítrofe a vila de São Jorge. A sua localização pode explicar os altos valores do coeficiente de retroespalhamento na polarização HH, pois há um decréscimo acentuado na estrutura horizontal e vertical da floresta (maior penetração da onda incidente) nesta unidade (FEM 15) e, por conseguinte maior interação com a estrutura de galhos horizontalmente orientados, confirmados pela maior contribuição do retroespalhamento da polarização HH para a razão de polarização cruzada (R_c), a

potência total (P_T), o índice de biomassa (BMI) e índice de espalhamento volumétrico (VSI). A retirada de indivíduos emergentes tornou o ambiente mais homogêneo do ponto de vista estrutural. Isto justifica o alto valor de coerência polarimétrica, pois tal atributo determina o grau de correlação da informação de fase (maior em ambientes com estrutura florestal mais homogênea).

Todos os *outliers* observados em unidades de sucessão secundária avançada (SSA 18, SSA 27, SSA 34 e SSA 35), constituintes da floresta de platô, estão localizados em áreas antropizadas a mais de duas décadas, próximas a BR-163.

O terceiro e quarto *outliers* mencionados referem-se às unidades de sucessão secundária avançada SSA18 e SSA27, constituintes da floresta de platô, em áreas antropizadas a mais de duas décadas. O parâmetro magnitude é considerado por Touzi (2007) complementar ao ângulo alfa médio de Cloude e Pottier (1997), porém invariante a mudança de base de polarização. Os valores da magnitude apresentados nestas observações indicam que o espalhamento predominante é o volumétrico. Ainda, no terceiro *outlier* é possível identificar o valor da heliciticidade baixa (τ_{m3}) indica que o alvo é assimétrico, típico de alvos florestais estando relacionada com a estrutura e distribuição espacial das árvores (TOUZI, 2007). Os valores da fase dominante (Φ_{s1}) e da média da fase (Φ_s) indicam que neste caso ocorrem mais espalhamentos múltiplos, decorrentes da aleatoriedade dos elementos espalhadores da estrutura florestal.

O valor da anisotropia para o quinto *outlier* (SSA 35), apresentado para esta observação, indicou que embora a mesma tenha sido considerada ruidosa ($H < 0,7$), não apresenta contribuição adicional para caracterizar o alvo. Todavia, o alto valor de entropia associado indica igual contribuição dos mecanismos de espalhamento, conforme citado em ESA (2005b).

Era esperado que o valor do ângulo de orientação dominante (ψ_1) para a unidade SSI 5 fosse baixo, sendo que este fornece uma medida intrínseca do ângulo de inclinação (declividade) do alvo (TOUZI, 2007; TOUZI et al, 2009) e destacado como um atributo alternativo ao modelo α - β de Cloude Pottier, já que tal atributo não sofre mudança na interação da onda com alvos assimétricos. Entretanto esse *outlier* apresentou um ângulo de inclinação próximo a 45° , próprio para áreas de quebra de relevo acentuada (FP 13 e FP 29) (Figura 3.5).

Tais assertivas constituem explicações para os valores discutidos de todos os atributos polarimétricos mencionados na Tabela 5.10. Quanto às demais unidades, não foram observadas razões aparentes que justifiquem o comportamento apresentado. Estes são casos que podem exibir um forte desvio da curva de regressão a ser ajustada, o qual pode ter uma influência prejudicial no processo do ajuste do modelo de dados. A identificação, e a sua eventual remoção do conjunto de dados, é normalmente realizada utilizando os resíduos padrões.

Nesta segunda fase investigativa são aplicados testes formais para a detecção e eventual remoção dos mesmos. Para isso, foi avaliado o resíduo padrão do modelo das variáveis explicativas mantidas após a remoção de algumas anteriormente citadas (n = 25), conforme a Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Avaliação da presença de *outliers*, por intermédio da análise dos resíduos padrões e da Distância de Cook, com todas as amostras de treinamento do modelo.

Tipologia	Biomassa (t.ha ⁻¹)				
	Resíduo	Resíduo Padrão	Resíduo Deletado	Distância de Cook	Leverage
FP1	22,2346	0,35909	44,275	0,005737	0,497808
FP2	76,6817	1,34905	146,456	0,060083	0,476419
FP9	-30,6836	-0,46562	-53,287	0,007082	0,424181
FP20	92,0216	1,96308	209,999	0,145666	0,561799
FP21	-24,3963	-0,41273	-52,999	0,008913	0,539684
FP29	81,6459	1,60063	178,610	0,101826	0,542882
FEM15	-7,8522	-0,30415	-90,407	0,043883	0,913147
FEM25*	-36,1978	-0,95877	-174,531	0,141952	0,792599
FEM36*	26,9070	0,50896	72,182	0,019215	0,627235
FEM37	79,7361	1,56053	176,173	0,099891	0,547400
FEM38	36,5151	0,57546	67,328	0,012197	0,457653
FEM40	-31,0404	-1,18080	-291,238	0,445547	0,893419
FEM41	-45,9826	-0,81609	-102,831	0,034370	0,552832
SSA18	-6,2055	-0,17627	-38,759	0,007418	0,839892
SSA27	-9,7420	-0,39823	-123,766	0,082974	0,921287
SSA33	-21,8490	-0,71841	-171,052	0,150055	0,872267
SSA34	-57,3569	-1,47728	-225,524	0,222986	0,745673
SSA35	9,1109	0,21234	38,231	0,006546	0,761688
SSInt3	-48,7876	-1,53894	-282,019	0,386729	0,827006
SSInt7	6,9637	0,14989	25,004	0,002652	0,721497
SSInt8	2,6549	0,10667	33,271	0,005989	0,920203
SSInt10*	39,8801	2,82372	726,731	2,934800	0,945124
SSInt12	38,8412	1,09078	203,570	0,197163	0,809199
SSInt17	-0,5718	-0,01659	-3,743	0,000070	0,847238
SSInt22*	-26,0875	-0,96213	-243,673	0,311732	0,892941
SSInt26*	-26,1055	-2,37432	-930,026	4,942750	0,971930

(continua)

Tabela 5.11 – Conclusão.

SSI4*	-42,2483	-1,64470	-359,067	0,668850	0,882339
SSI5	-28,4377	-1,20707	-329,734	0,584116	0,913756
SSI6	26,0732	0,80459	176,707	0,156502	0,852450
SSI24	6,5593	0,20287	48,499	0,011959	0,864755
SSI28*	-23,9944	-1,04221	-304,693	0,502859	0,921251
SSI31	-20,7245	-0,51719	-96,660	0,043155	0,785592
SSI32*	-57,5618	-2,61611	-467,435	1,126456	0,876856

OBS: * possíveis *outliers*

Analisando o resíduo padrão dos dados as unidades amostrais SSInt10, SSInt26 e SSI32 são considerados possíveis *outliers* candidatos a remoção (Tabela 5.11). A análise conjunta da diferença entre os resíduos deletados com relação aos resíduos originais demonstrou que além das anteriormente citadas as unidades amostrais SSI4, SSI5, SSI28, SSInt22, SSInt12, SSInt3, SSA27, SSA33, SSA34, FEM40, FEM25 e FP20 são também possivelmente *outliers*. Entretanto, na análise de algum caso influente sobre os demais no ajuste do modelo por intermédio da utilização da distância de Cook, no qual é descrita por Sá (2007) “a medida de distância entre o valor beta com e sem o respectivo caso provável de *outlier*” os mesmos foram identificados. Ainda segundo o mesmo autor, caso descartado a presença de *outliers* no modelo, estas distâncias possuem aproximadamente a mesma amplitude.

Note que a distância de Cook para as unidades anteriormente selecionadas os valores de amplitude são muito diferentes da maioria das observações, com isso as unidades SSInt26, SSInt10, SSI32 (casos extremos), SSI4, SSI5, SSI28 e FEM40 (*outliers*), foram teoricamente influentes para a geração do modelo.

Com o intuito de estabelecer relações consideradas mais confiáveis entre a biomassa arbórea acima do solo e o conjunto total de variáveis explicativas, os *outliers* teoricamente influentes na construção do modelo foram removidos e as correlações recalculadas (Tabela 5.12).

Pode-se verificar que, com a remoção dos casos considerados extremos, a correlação de todos os atributos incoerentes foram inferiores ao esperado, exceto para o índice de estrutura do dossel embora continue tendo correlação negativa. Para os atributos coerentes houve um pequeno aumento das correlações, e os mesmos constatados anteriormente mantiveram-se significativos.

A opção da condução das análises posteriores com a formação de um modelo único, constituído a partir das 33 observações iniciais, deu-se pelas constatações apresentadas

anteriormente. Este procedimento justifica-se pelo fato de englobar toda a variabilidade encontrada na área experimental (florestas primárias, florestas com exploração madeireira, e estádios de sucessão secundária avançada, intermediária e inicial em áreas de platô e de vertente). Com isso, nenhum *outlier* considerado teóricamente influente no modelo foi removido das análises posteriores.

Tabela 5.12 – Valores de correlação linear de Pearson dos atributos incoerentes e coerentes.

Atributo Incoerente	Correlação com a Biomassa	Atributo Coerente	Correlação com a Biomassa
σ°_{HH}	0,15	$\Delta\phi(^{\circ})$	-0,12
σ°_{VV}	0,29	γ	-0,18
CSI	-0,17	H	0,24
VSI	-0,18	A	-0,19
P_T	0,31*	P_V	0,38*
–	–	P_d	-0,14
–	–	α_{s1}	0,04
–	–	α_{s2}	-0,16
–	–	α_s	0,05
–	–	ϕ_{s2}	-0,09
–	–	ϕ_{s3}	0,42*
–	–	ϕ_s	0,12
–	–	ψ_1	-0,15
–	–	ψ_2	-0,21
–	–	ψ_3	0,05
–	–	ψ	-0,48*
–	–	τ_{m1}	0,20
–	–	τ_{m2}	-0,11
–	–	τ_{m3}	0,17
–	–	τ_m	0,08

(*) Valor significativo ao nível de 10% de significância.

De acordo com Neter et al. (1996), para o ajuste do modelo de regressão são necessárias de 6 a 10 observações para cada variável explicativa empregada. Com base nesta afirmação, em função do número total de observações empregadas neste estudo ($n = 33$), optou-se pela seleção do modelo com no máximo 6 parâmetros. Desse modo são apresentados na Figura 5.30 os valores dos coeficientes de determinação e de quadrado médio dos resíduos dos subconjuntos de variáveis que apresentaram os melhores desempenhos no processo de seleção.

Conforme a figura abaixo, a introdução de novas variáveis explicativas no modelo de regressão não foram preponderantes na estabilização da curva do coeficiente de

determinação. Porém, à partir da inclusão da sétima variável foi possível verificar uma tendência a redução do aumento exponencial de R^2 . Ainda, o quadrado médio dos resíduos, o qual via de regra não sofre redução com a introdução de variáveis explicativas, apresentou um decréscimo constante com a inclusão de novas variáveis, alcançando uma estabilidade considerável a partir da sexta variável ($p = 6$), modelo este considerado ideal para a predição da biomassa arbórea acima do solo.

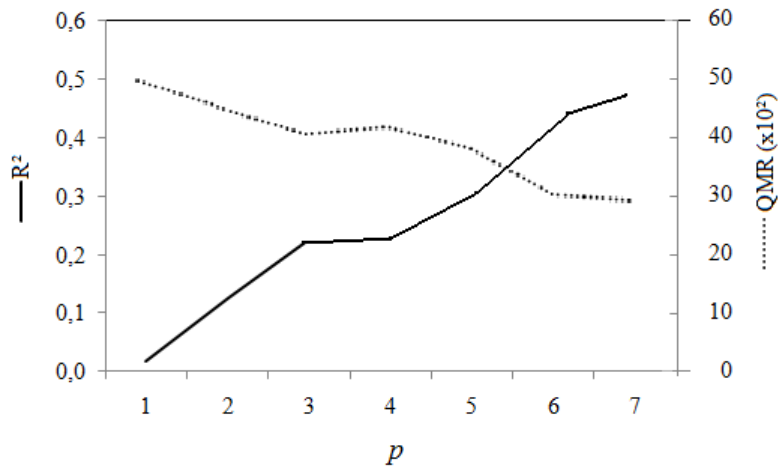


Figura 5.30 – Processo de seleção do modelo. A linha contínua e tracejada indica os valores de R^2 e QMR dos subconjuntos de variáveis explicativas que apresentaram os melhores desempenhos.

Para a escolha do modelo de melhor ajuste com a variável dependente foram realizados três critérios de avaliação (R^2 , R^2 ajustado e C_p Mallow), pois tais critérios têm como principal vantagem com relação ao *Forward* e *Backward Stepwise* a possibilidade de escolha de mais um modelo de saída.

A principal característica envolvida neste procedimento de redução de variáveis é que o coeficiente de determinação é influenciado pela inclusão de variáveis explicativas no provável modelo de regressão. E desta forma, é um indicador da existência de p parâmetros ($p-1$ variáveis), na função de regressão no qual o R^2 é baseado (NETER et al., 1996), e definido como:

$$R^2 = \frac{SSR}{SSTO} = 1 - \frac{SSE}{SSTO} \quad 5.1$$

O critério do coeficiente de determinação ajustado é sugerido por Neter et al. (1996) como um critério alternativo ao R^2 , pois neste caso aumentando-se o número de variáveis o erro médio quadrático pode aumentar e o R^2 ajustado pode diminuir. Ou

seja, esse critério não é influenciado pelo número de parâmetros inseridos ao modelo de regressão, como segue:

$$R^2_{ajustado} = \left(\frac{n-1}{n-p}\right) \frac{SSE}{SSTO} = 1 - \frac{MSE}{\frac{SSTO}{n-1}} \implies MSE = \frac{SSE}{n-p} \quad 5.2$$

Outro critério muito utilizado é o Cp Mallow, o qual é definido como um índice que leva em consideração a economia (menor número possível de variáveis selecionadas) do modelo tão bem como o seu ajuste aos dados. De acordo com Neter et al. (1996) baixos escores indicam um bom e acurado ajuste. O Cp Mallow é definido pela seguinte fórmula:

$$Cp = \frac{SSE_p}{S_e^2} - (n - 2p) \quad 5.3$$

onde: n é o tamanho da amostra, p é o número de variáveis independentes incluindo o intercepto y , S_e^2 é o quadrado médio do resíduo para o modelo completo que contém todo o conjunto de variáveis independentes relevantes, e SSE_p é a soma dos quadrados do termo de erro do modelo que contém p variáveis independentes.

O principal fator na escolha do critério do Cp Mallow com relação ao R^2 para modelos de regressão múltipla - considera todos os resultados de saída para a predição do modelo como variáveis independentes - é que enquanto o R^2 aumenta com o acréscimo de variáveis independentes o Cp Mallow não é influenciado pelo número de variáveis explicativas, e sim pelo erro médio quadrático total de n valores para cada valor ajustado. Assim, de acordo com Nakamura (2004), por meio da utilização do Cp Mallow é possível fazer comparações entre modelos de diferentes números de variáveis independentes sem afetar os resultados da predição do modelo.

A Tabela 5.13 exemplifica os critérios utilizados na escolha das variáveis independentes para o modelo de regressão, utilizando o R^2 , $R^2_{ajustado}$ e o Cp Mallow.

Tabela 5.13 - Critérios de avaliação para a construção do modelo, utilizando o Best subsets.

R^2	$R^2_{ajustado}$	Cp Mallow
$b_0; \sigma_{HH}^o; P_V; \alpha_{s2}; \Phi_{s2}; \Phi_{s3}; \tau_m$	$b_0; \sigma_{HH}^o; P_V; \alpha_{s2}; \Phi_{s2}; \Phi_{s3}; \tau_m$	$P_V; \tau_{m1}$

Embora apresentem características distintas, os critérios R^2 e $R^2_{ajustado}$ apresentaram os mesmos resultados na indicação dos melhores subconjuntos de variáveis explicativas, contudo o critério Mallow Cp foi muito restritivo a respeito da escolha do melhor subconjunto de variáveis, tendo sido descartado como critério de seleção.

Com base nos critérios de seleção definidos para o modelo final, além do coeficiente de intercepto, as variáveis explicativas selecionadas foram o coeficiente de retroespalhamento na polarização HH, a componente de espalhamento volumétrico de Freeman, a magnitude de espalhamento médio, a fase de espalhamento médio e baixo, além da helicidade total de Touzi, com $R^2 = 0,46$ e $QMR = 3245,60$. Apesar do coeficiente de retroespalhamento na polarização VV e o ângulo de orientação médio de Touzi terem apresentado maiores coeficientes de correlação linear individual com a biomassa arbórea acima do solo, estas não foram integradas no subconjunto de variáveis explicativas. Outro aspecto importante evidenciado para a composição do modelo final é que a grande maioria dos atributos selecionados foram os coerentes, comprovando a importância da informação de fase na modelagem de biomassa das diferentes tipologias analisadas.

Para a predição da biomassa, a estatística t, os respectivos coeficientes de regressão padronizados estimados (β_k) e erros padrões (S_k) são apresentados na Tabela 5.14. Conforme esta Tabela, o valor da estatística t foi significativo para todas as variáveis em questão, havendo relação de regressão entre cada variável explicativa e a variável dependente (biomassa arbórea acima do solo). Adicionalmente, foi possível constatar que as variáveis σ_{HH}^o e P_v apresentarem as maiores contribuições para a predição de biomassa, enquanto que as componentes de Touzi apresentaram valores similares entre elas, de acordo com os valores de β_k . Isto comprova que o coeficiente de retroespalhamento na polarização HH e a componente de espalhamento volumétrico de Freeman apresentaram maiores contribuições. Embora, os atributos de Touzi tenham apresentado menores valores de β_k os mesmos são considerados como variáveis inovadoras na predição de biomassa arbórea acima do solo.

Tabela 5.14 – Parâmetros resultantes da regressão gerada para o modelo selecionado.

Modelo selecionado			
Variável	β_k	S_k	t
σ_{HH}^o	-0,80	0,30	-2,62*
P_v	1,04	0,32	3,25*
α_{S2}	0,45	0,21	2,15*
Φ_{S2}	-0,30	0,16	-1,91*
Φ_{S3}	0,48	0,18	2,66*
τ_m	0,29	0,16	1,74*

(*) Valor significativo ao nível de 10% de significância.

Para a análise da conveniência do modelo, foi realizada a plotagem dos resíduos do modelo de regressão ajustados em relação aos termos de interação bivariados, conforme apresentado na Figura 5.31 e, realizado a análise visual dos padrões de dispersão resultantes. Com base nesta análise, foi possível constatar que não houve a necessidade de inclusão de novos termos de interação no modelo de regressão selecionado. Este comportamento, de acordo com Neter et al. (1996) indica que os pontos plotados não sugerem nenhum desvio sistemático do plano de resposta, nem que os termos da variância do erro estejam variando com o nível de interações. Nenhum termo de interação bivariado exibiu algum padrão sistemático, por isso não há efeitos de interação refletidos nesses termos bivariados do modelo.

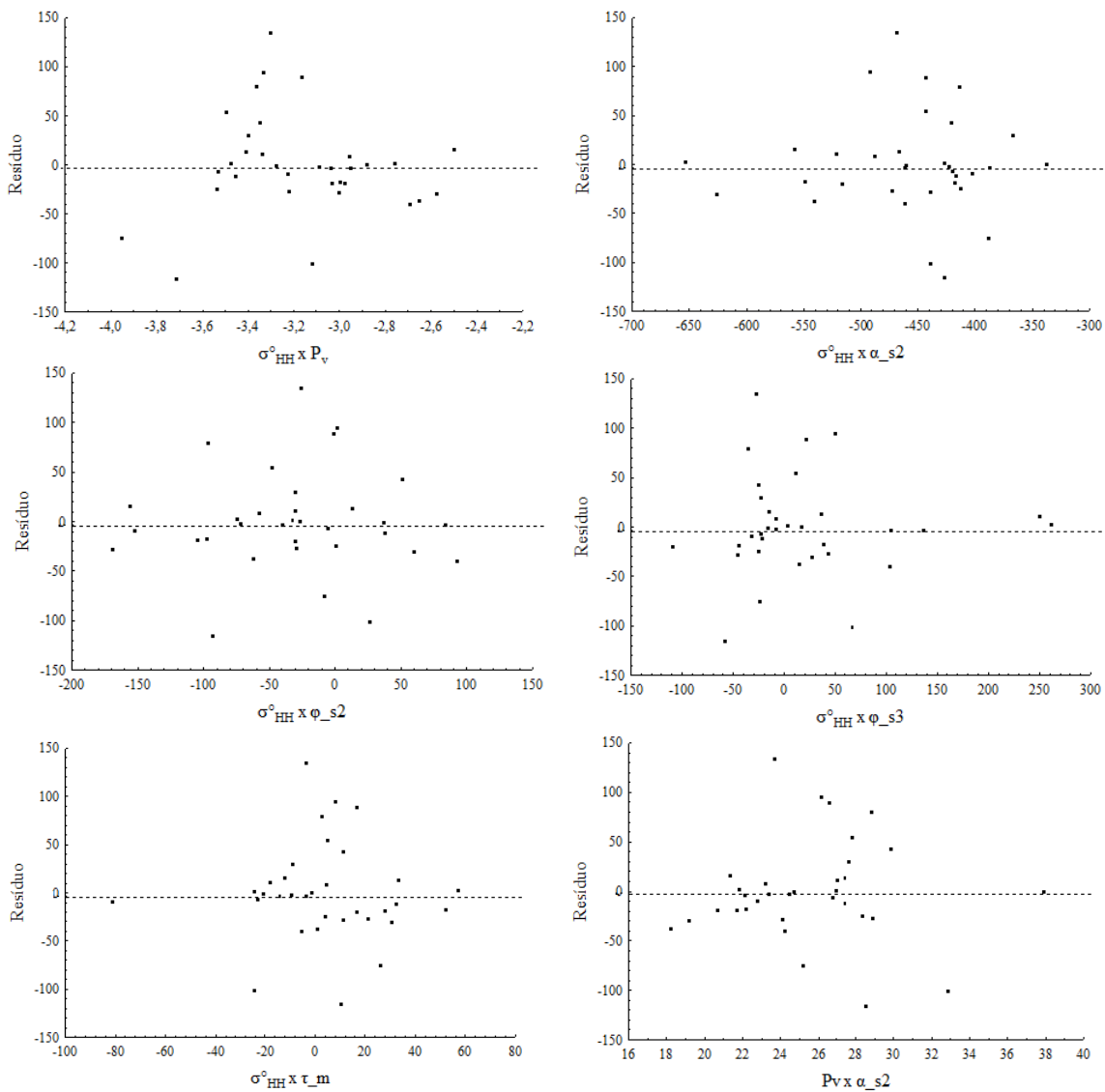


Figura 5.31 – Dispersão dos dados entre os resíduos do modelo selecionado e a combinação de cada termo de interação bivariado.

(continua)

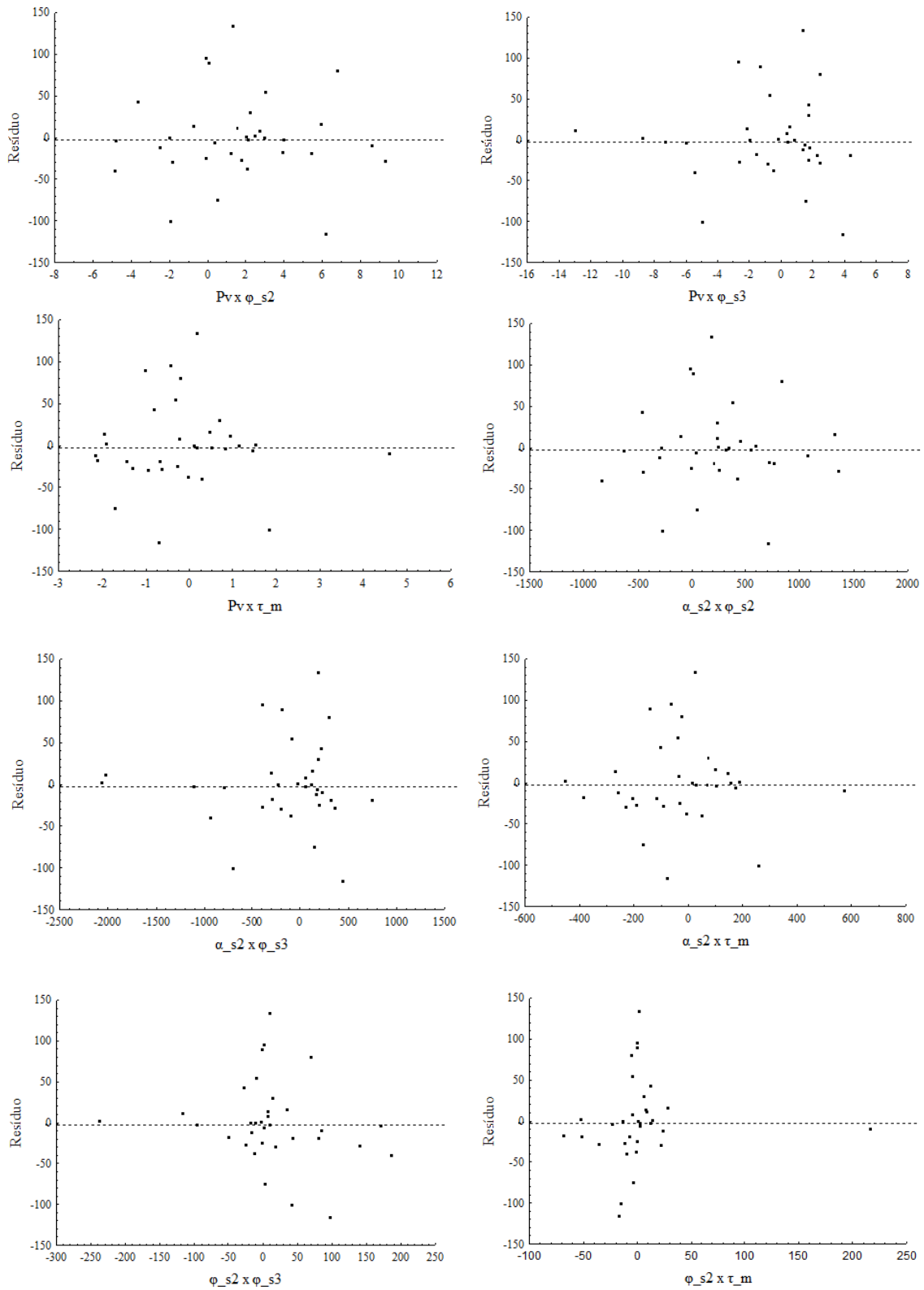


Figura 5.31 – Continuação.

(continua)

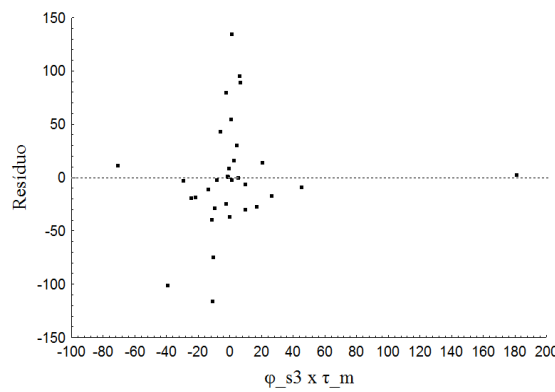


Figura 5.31 – Conclusão.

O cálculo dos fatores de inflação da variância de cada variável, empregados para verificar problemas com a multicolinearidade no modelo selecionado pode ser visto na Tabela 5.15. Foi possível constatar que os valores de VIF calculados foram inferiores ao estabelecido na literatura ($VIF > 10$ indicam sérios problemas de multicolinearidade). No caso do presente estudo, os valores indicaram a ausência de problemas de multicolinearidade, ou seja, houve baixa correlação entre as variáveis explicativas no modelo de regressão. Na análise dos valores de β_k foi possível constatar que as variáveis σ_{HH} e P_v apesar de contribuírem com maior peso na predição do modelo, indicam que as diferenças entre estes valores apresentados e os verdadeiros coeficientes de regressão padronizados estão respectivamente cerca de 4 a 5 vezes maiores que aquelas que seriam encontradas se as variáveis não tivessem nenhum tipo de correlação. Em outras palavras, o erro padrão para estes atributos acima mencionados são 4 a 5 vezes maiores do que teria sido com as variáveis sem colinearidade.

Tabela 5.15 – Fatores de inflação da variância (VIF) do modelo selecionado.

Modelo	
Variável	VIF
σ_{HH}	4,43
P_v	4,91
α_{S2}	2,07
Φ_{S2}	1,16
Φ_{S3}	1,57
τ_m	1,29

Apesar de existirem procedimentos formais para verificar a necessidade de transformação da variável dependente para o modelo selecionado, o mesmo não foi realizado, pois tal procedimento contraria a premissa de que a biomassa tem relação direta com os atributos polarimétricos extraídos da imagem.

Por intermédio dos testes formais para identificar outliers no conjunto de dados para o modelo selecionado apontaram a presença de 5 observações consideradas *outliers* em X,

enquanto que em Y nenhum foi detectado, com respeito aos padrões dos valores de X e Y. Na análise do modelo gerado, todas as observações apresentaram valores inferiores de resíduo excluído padronizado, ao passo que na análise dos valores de *Leverage* foram encontrados cinco valores superiores aos valores críticos calculados. Devido ao rigor do teste de *Bonferroni* em classificar uma observação como *outlier*, optou-se pela manutenção da avaliação da influência das observações no ajuste das funções de regressão.

A distância de Cook, o qual serve para determinar observações influentes no ajuste do modelo de regressão (*outliers*) é apresentada na Figura 5.32. Nesta Figura constatou-se que a unidade amostral SSI4 obteve destaque pelo seu valor de distância de Cook ($D = 0,26$), seguido de SSInt8 ($D=0,17$) e SSA34 ($D =0,16$), já as demais unidades amostrais apresentaram valores semelhantes. No caso do presente estudo, o resultado da distribuição F do modelo selecionado indicou que não houve nenhuma observação com valor de D_i maior ou igual ao calculado, ou seja, não houve nenhum caso substancialmente influente (*outlier*) para a geração do modelo final. Dessa forma, nenhuma tipologia em análise alterou significativamente os coeficientes de intercepto e de inclinação no ajuste da função de regressão do modelo final.

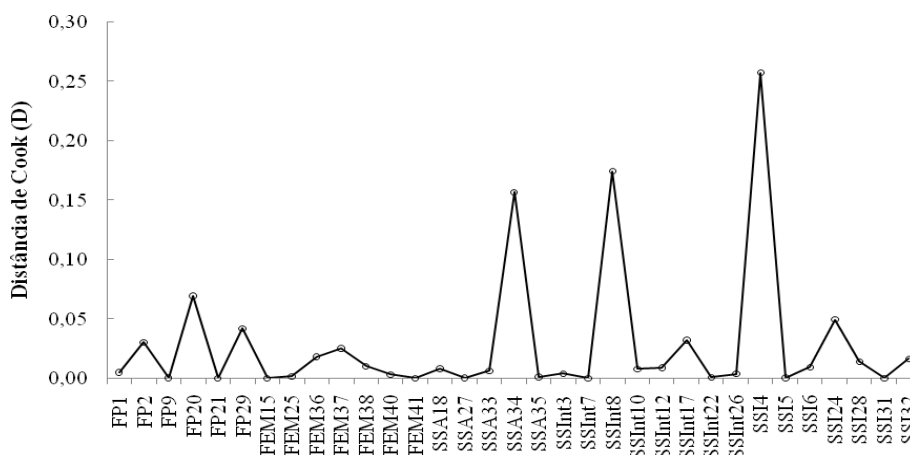


Figura 5.32 – Valores de distância de Cook referentes a cada observação do modelo selecionado.

Como diagnóstico adicional, foi gerado um diagrama de dispersão dos resíduos em relação aos valores de biomassa ajustados, bem como o gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Na análise dos diagramas de dispersão (Figura 5.33) não foi constatada nenhuma tendência sistemática na distribuição dos resíduos, ou seja, a função de regressão linear foi considerada adequada. Em adição, foi possível constatar na análise deste diagrama que a variância dos resíduos não sofreu alterações significativas, ou seja,

os valores de β_0 e β_1 não sofreram alterações consideráveis com a variação da biomassa predita, não alterando o ajuste do modelo estimado.

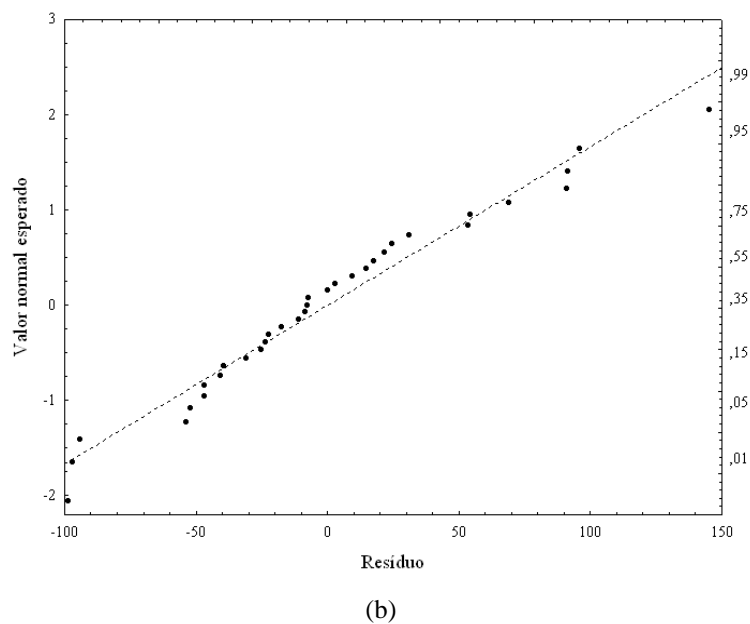
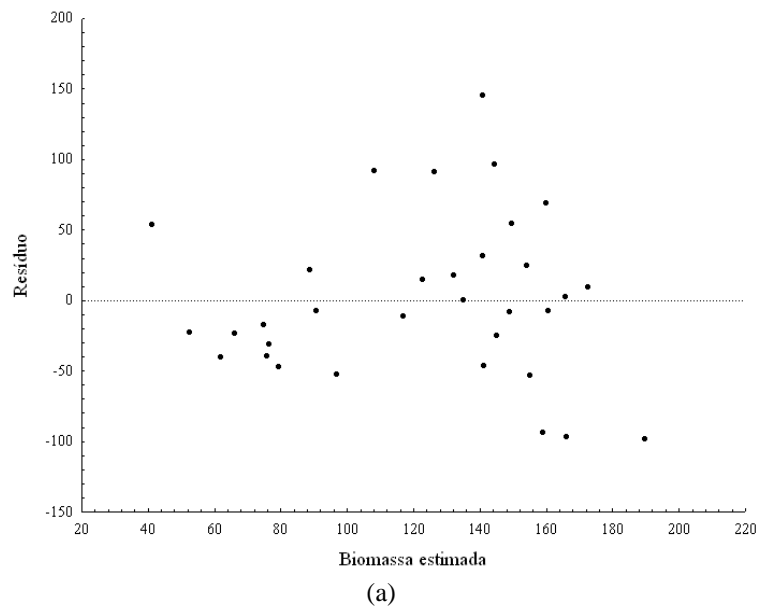


Figura 5.33 – Diagnóstico adicional mostrando o diagrama de dispersão entre os resíduos e os valores de biomassa ajustados (a) e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos (b) para o modelo selecionado.

Como pode ser visto no diagrama de probabilidade normal dos resíduos o padrão é considerado moderadamente linear, onde o coeficiente de correlação entre os resíduos e seus valores esperados sob normalidade é 0,979. Isso indica que os termos do erro são normalmente distribuídos, pois o valor crítico para o coeficiente de correlação tabelado foi inferior (0,947) ao calculado. Com o objetivo de se comparar a variância residual dos dois grupos de dados, o teste de *Levene* modificado confirmou a constância da

variância residual do modelo (homocedasticidade dos resíduos), ao nível de significância de 10%, conforme a regra de decisão abaixo:

$$|t_L^*| \leq t_{1-\alpha/2; n-2} \quad 5.4$$

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk – indicado para o número de observações inferiores a 50 – e utilizado para avaliar o melhor ajuste para a distribuição normal dos resíduos mostrou que o modelo selecionado apresentou resultados não significativos ($p = 0,0606$). Dessa forma, a função de regressão para o modelo selecionado é considerada normal, ao nível de significância de 5%.

Como análise complementar, foi realizada a análise da medida de autocorrelação espacial a partir do produto dos desvios dos resíduos em relação à média (RAMOS, 2002), que indica o grau de associação espacial presente no conjunto de dados. A verificação da dependência espacial dos resíduos (observações), por intermédio da utilização do diagrama de espalhamento de Moran, é apresentada na Figura 5.34 para o modelo selecionado. Como verificado nesta figura, não há a presença de autocorrelação espacial para os resíduos padronizados uma vez que o índice de Moran teve valor de 0,0534, com significância de 0,488. De acordo com Ramos (2002) o valor de índice de Moran próximo a zero, juntamente com a significância acima da estabelecida ($\alpha = 0,05$) indica que os resíduos não apresentam autocorrelação espacial, e possuem uma tendência aleatória. Dado ao exposto, apesar da tendência aleatória, os resíduos de uma observação não possuem nenhum grau de associação espacial com os referidos resíduos em relação às demais observações adjacentes.

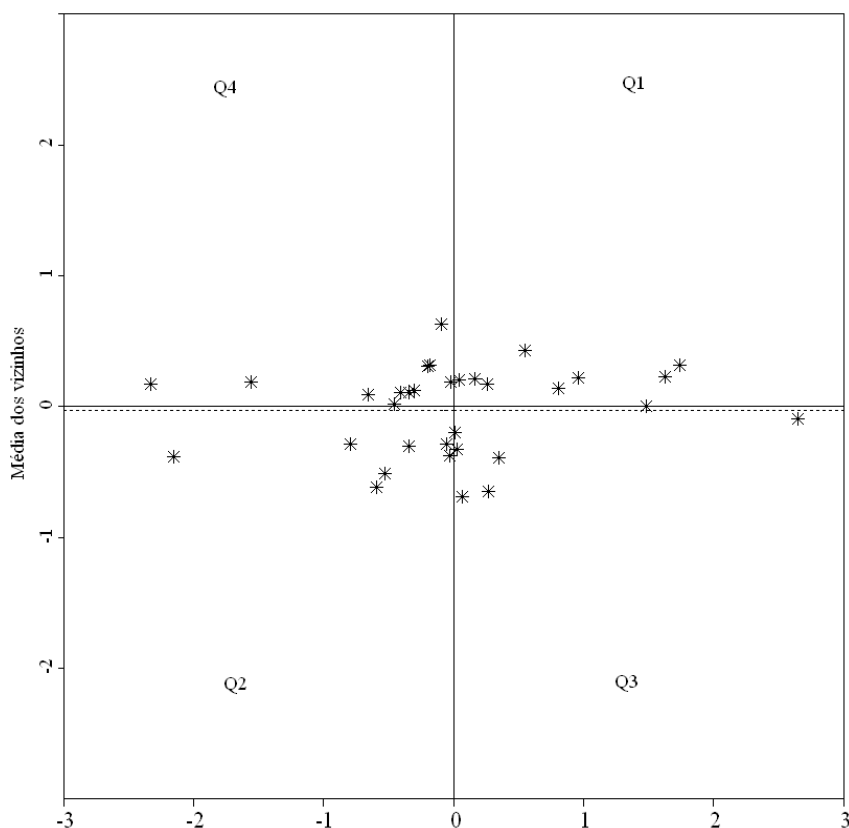


Figura 5.34 – Mapa de espalhamento de Moran dos resíduos do modelo selecionado. As zonas indicam quatro regimes espaciais: Q1 e Q2 indicam áreas com associação espacial positiva, valor positivo e médias locais positivas e valor positivo e média local negativa, respectivamente. As zonas classificadas como Q3 e Q4 são consideradas áreas com associação espacial negativa, não seguem o mesmo processo de dependência espacial, indicando pontos de transição entre diferentes padrões espaciais.

Em suma, não há nenhum problema considerado potencial na avaliação dos resíduos do modelo selecionado, ou seja, os diagnósticos utilizados para a regressão linear múltipla de biomassa gerada (Equação 5.5) não identificaram problemas em seus valores residuais. Além disso, para o modelo selecionado há um relação de regressão considerada significativa entre a biomassa arbórea acima do solo e as variáveis explicativas selecionadas no modelo final ($p = 0,009424$), utilizando-se o teste F.

$$\begin{aligned}
 \text{Biomassa} = & -1221,37 - 70,31 (\sigma_{HH}^0) + 1064,65 (P_V) + 6,28(\alpha_{S2}) - 2,42(\Phi_{S2}) \\
 & + 3,44(\Phi_{S3}) + 6,05(\tau_m)
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Para a validação dos dados do modelo selecionado, foram extraídos os valores médios dos atributos em cada unidade amostral inventariada (Tabela 5.16). Segundo Neter et al. (1996) pelo menos 20% do total de amostras devem ser utilizadas para a validação do modelo selecionado, neste caso o total de 8 unidades amostrais (24% do total) de um conjunto de 41 foram utilizadas na validação. Conforme esta Tabela, os valores de biomassa arbórea acima do solo variam entre 35 e 230 t.ha⁻¹. Na análise dos

atributos polarimétricos, a componente volumétrica de Freeman, seguido do coeficiente de retroespalhamento na polarização HH, foram os que apresentaram menor variabilidade entre as unidades na validação, ao passo que os de Touzi foram os que apresentaram maior variabilidade entre as unidades amostrais. Não obstante, para efeito comparativo dos resultados, no ajuste do modelo selecionado, verificou-se que a amplitude de variação do conjunto de validação contemplou os valores de biomassa do conjunto de treinamento.

Tabela 5.16 – Valores dos dados de validação relativo as oito unidades amostrais inventariadas.

Unidade Amostrai	Biomassa	σ_{HH}°	P_v	α_{s2}	Φ_{s2}	Φ_{s3}	τ_m
FP13	136	-6,04	0,54	57,32	3,45	3,25	1,68
FP19	230,9	-7,02	0,47	62,48	0,33	8,37	-0,51
FEM23	143,8	-7,17	0,52	58,21	-0,01	3,59	-2,83
FEM39	200,5	-7,71	0,44	63,38	2,05	-2,02	3,02
SSA30	134,2	-7,42	0,45	54,54	0,76	2,15	-4,47
SSInt11	105,2	-7,72	,46	44,69	-3,81	2,28	1,16
SSInt14	35,6	-7,92	0,39	62,49	8,83	-9,48	-5,62
SSI16	37,2	-7,82	0,30	69,96	6,65	-6,15	-1,69

O valor PRESS, utilizado para a validação do modelo, segundo Rencher e Schaalje (2007) pode ser uma melhor medida do que o SQR de como será o modelo por meio da predição de futuras observações. Ainda segundo os mesmos autores, a utilização do valor PRESS para comparar modelos alternativos quando o objetivo é a sua predição e, deve ser dada a preferência para modelos com menores valores de PRESS.

Com base nestas premissas, o modelo selecionado obteve um valor PRESS de 190.351,8, o qual diferiu 44,33% da SQR do modelo selecionado (84.385,63). Baseando-se nas afirmações de Neter et al. (1996) e Rencher e Schaalje (2007), esta diferença está próxima do considerado ideal para validar a eficácia do modelo selecionado, ou seja, é razoável afirmar que o modelo é um indicador válido como tendo a habilidade de predição por meio do modelo de regressão ajustado. Adicionalmente, quando o valor PRESS não é tão distante em relação ao SQR, o QMR é um melhor indicador da predição por meio do modelo de regressão ajustado (NETER et al., 1996).

O resultado do ajuste do modelo de regressão dos dados combinados - amostras de treinamento + validação - quando comparado com o modelo selecionado – amostras de treinamento - (Tabela 5.17), mostra que os coeficientes da regressão estimados e seus respectivos desvios-padrão possuem valores que podem ser considerados de grandeza

próxima e o mesmo sinal, indicando que são ligeiramente equivalentes, comprovando sua eficácia preditiva.

Tabela 5.17 – Ajuste do modelo de regressão combinado (amostras de treinamento+validação), totalizando 41 unidades amostrais.

Variável	Modelo selecionado Amostras de treinamento		Modelo combinado Amostras de treinamento+validação	
	β_k	S_k	β_k	S_k
σ_{HH}^o	-0,80	0,30	-0,50	0,26
P_v	1,04	0,32	0,82	0,29
α_{S2}	0,45	0,21	0,25	0,18
Φ_{S2}	-0,30	0,16	-0,17	0,15
Φ_{S3}	0,48	0,18	0,30	0,16
τ_m	0,29	0,16	0,14	0,14

Com o intuito de avaliar a capacidade preditiva do modelo de biomassa final, na Tabela 5.18 são apresentados os valores de biomassa arbórea acima do solo, com seus respectivos valores observados, preditos, erro padrão e intervalo de confiança, para as unidades de validação do modelo final.

Tabela 5.18 – Valores de biomassa arbórea acima do solo das unidades utilizadas para a validação do modelo.

Unidades amostrais	Biomassa (t.ha ⁻¹)				
	Observada	Estimada	Erro padrão (estimada)	-90%CI	+90%CI
FP13	135,98	130,86	80,25	58,45	202,04
FP19	230,86	189,93	69,21	154,58	223,27
FEM23	143,83	199,07	58,43	118,65	282,98
FEM39	200,49	192,28	79,99	142,45	242,86
SSA30	134,23	100,43	72,96	77,51	126,78
SSInt11	105,20	115,87	79,70	86,52	145,39
SSInt14	35,62	55,16	77,99	10,49	97,36
SSI16	37,15	39,74	80,37	13,74	65,80

Ainda em relação à análise da capacidade preditiva do modelo selecionado, na Figura 5.35 são apresentados os valores de biomassa arbórea acima do solo observados e preditos, referentes às 8 unidades amostrais inventariadas dos dados de validação. Embora o coeficiente de determinação não tenha apresentado um valor considerado alto ($R^2 = 0,46$), apenas as unidades amostrais FP19 e SSA30 apresentaram erro superior a 15%. Além disso, o erro médio de estimativa apresentado foi considerado baixo (apenas 7,45%), considerando o conjunto de observações na validação.

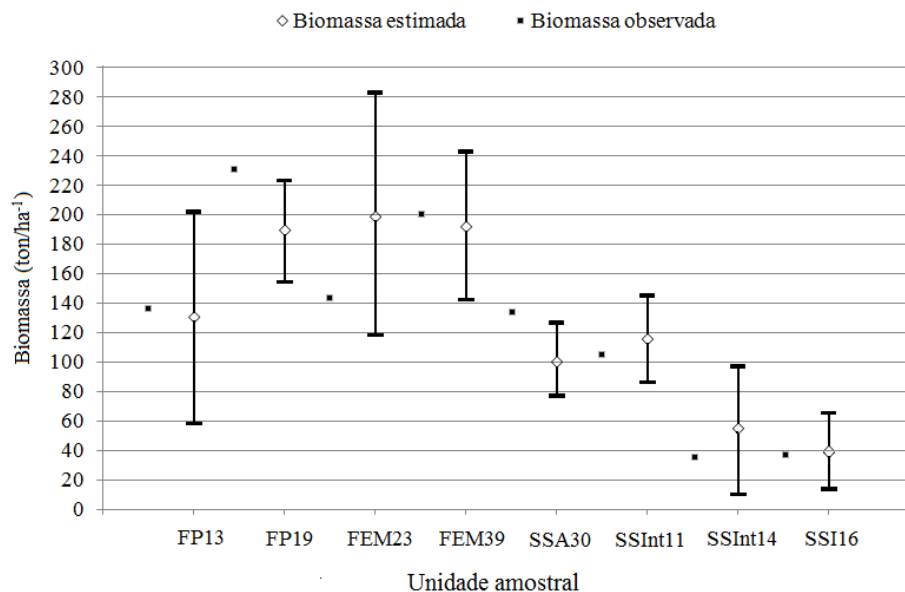


Figura 5.35 – Biomassa observada e estimada nas oito unidades amostrais inventariadas para a validação, representados pelo intervalo de confiança para a média predita, ao nível de 90%.

A unidade amostral FP19 foi a observação o qual não apresentou bom ajuste em relação ao intervalo de predição da biomassa arbórea acima do solo do modelo selecionado, embora não tenha sido a de maior desvio encontrado (17,7%) em relação ao seu respectivo valor observado. Este tipo de comportamento encontrado está relacionado a sua localização geográfica (Figura 3.5), pois a mesma localiza-se em uma área de transição entre a floresta de platô e de baixo (floresta de vertente). Dado que o modelo selecionado foi ajustado utilizando-se uma ampla variação topológica em áreas tanto de platô como de vertente (o que explica uma maior variação no intervalo de predição) essa unidade amostral deve ser interpretada com cautela. A unidade SSA30 também não indicou um bom ajuste de predição, indicando um desvio de 25,17% em relação ao valor observado. Dessa forma, esta unidade apresentou os intervalos de predição com amplitudes relativamente menores do que as demais, devido a sua menor variação florística estrutural. Na análise da eficácia do modelo gerado, o qual é estimado pelo seu respectivo erro padrão da estimativa (i.e, $S_{yx} = \sqrt{QMR}$), a incerteza da estimativa produzida pelo modelo demonstrou uma eficácia considerada razoável ($S_{yx} = 56,9 \text{ t.ha}^{-1}$). De certo modo, esta resposta pode representar um indicativo de erro devido a presença de *outliers* associado ao emprego do modelo, já que para a predição da maioria das unidades em áreas de baixo o modelo demonstrou boa capacidade preditiva.

Na análise da figura acima, é possível observar que apesar do intervalo de predição das unidades FP19 e SSA30 não conterem o verdadeiro valor de biomassa, para as unidades

amostrais empregadas no ajuste do modelo selecionado a complexidade das observações (tipologias) foi considerada o fator preponderante na ocorrência das grandes amplitudes nos intervalos de predição, haja vista a grande variabilidade florístico-estrutural das fitofisionomias analisadas. Este comportamento já era esperado, visto que as observações empregadas no ajuste do modelo final levaram em conta toda a variação de condições de crescimento e de sítio, ou seja, toda a variabilidade florístico-estrutural em análise.

Ainda, é possível observar que grande parte dos intervalos de predição do modelo gerado sobrepôs os valores de biomassa arbórea acima do solo inventariados.

Embora os estudos pioneiros em florestas com a utilização de dados multipolarizados tenham comprovado que o dado é sensível a saturação do sinal, pode-se chegar a algumas considerações importantes.

O retroespalhamento é correlacionado com a biomassa total e vários componentes da biomassa (i.e. ramos, ramos finos, troncos), ou outras características físicas (i.e. altura das árvores, área basal). (KASISCHKE et al, 1995), sendo considerado como um parâmetro de produtividade florestal onde valores mais elevados fornecem indício de que a floresta é mais desenvolvida do ponto de vista estrutural.

O estudo recente de Saatchi et al. (2007) suporta estas hipóteses, entretanto a utilização de atributos polarimétricos coerentes e incoerentes para a estimativa de biomassa vêm sendo paulatinamente utilizados, já que nestes os valores de biomassa parecem não sofrer tanto a saturação do sinal em relação ao comprimento de onda.

Com base nas afirmações anteriores, a Figura 5.36 mostra a distribuição da biomassa arbórea acima do solo para a área de estudo, por intermédio dos atributos polarimétricos selecionados no modelo de biomassa final.

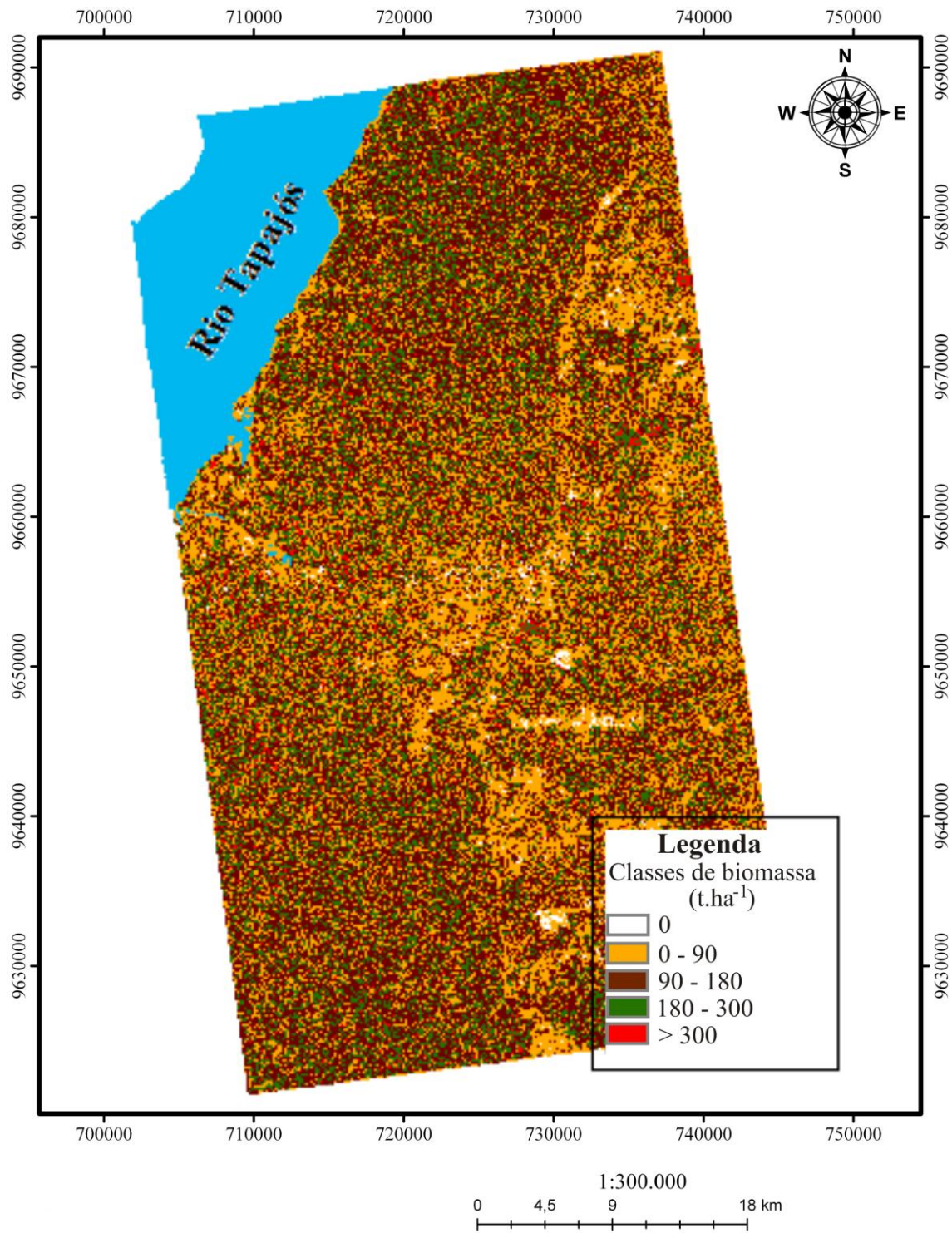


Figura 5.36 – Mapa de biomassa arbórea acima do solo obtido por intermédio dos atributos seleccionados pelo modelo.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme aspectos pré-estabelecidos na abordagem metodológica e ao longo da tese, a avaliação da sensibilidade dos atributos polarimétricos na modelagem da biomassa arbórea acima do solo de florestas tropicais nas diferentes fitofisionomias analisadas é possível concluir que:

- (a) No desenvolvimento do modelo final, as variáveis explicativas σ_{HH}° e P_v foram as mais importantes, tendo apresentado contribuições equilibradas para a predição da biomassa arbórea acima do solo, porém os demais atributos selecionados a contribuição foi inferior as anteriores, embora equilibrados entre si. Embora tenham menos influência na predição, os atributos de Touzi selecionados (α_{S2} , Φ_{S2} , Φ_{S3} , τ_m) constituem-se em variáveis inovadoras no cálculo da biomassa arbórea acima do solo. Adicionalmente, a totalidade de diagnósticos aplicados ao modelo de regressão não identificaram problemas relacionados às condicionantes pré-estabelecidas da análise de regressão. Para a determinação de biomassa arbórea acima do solo, os atributos polarimétricos mais importantes, em ordem decrescente, são o coeficiente de retroespalhamento na polarização HH, a componente de espalhamento volumétrico da decomposição de Freeman, a magnitude da segunda componente, a fase da segunda e terceira componentes e o ângulo de heliticidade médio de Touzi, por meio da utilização do modelo de regressão linear múltipla;
- (b) Na validação, o desempenho do modelo com um conjunto de dados independentes comprovou a boa capacidade preditiva. Embora o modelo não tenha apresentado um coeficiente de determinação considerado elevado, foi constatado nesta etapa, que os modelos mais precisos para a predição de biomassa não são necessariamente regidos pelos maiores valores de R^2 ;
- (c) Os erros médios das observações independentes para a estimativa da biomassa arbórea acima do solo apresentado pelo modelo gerado (7,45%) satisfazem o critério usualmente estabelecido para o inventário de florestas tropicais – erro inferior a 20%. Com isso, é possível estabelecer que os valores de biomassa gerados para a área de estudo podem ser utilizados na quantificação de biomassa na floresta amazônica, por intermédio da utilização dos atributos PolSAR (banda L), em condições fisionomico-estruturais semelhantes às encontradas na região

do presente estudo, com acurácia similar às obtidas em inventários florestais convencionais a nível regional; podendo ainda ser complementadas em áreas com condições florístico-estruturais muito distintas, para o ajuste e validação do modelo proposto. Dessa forma, para que a modelagem de biomassa possa ser efetivamente aplicada, é necessário ter um conhecimento prévio da florística, da estrutura e da associação e distribuição espacial dos indivíduos de características arbóreas, por intermédio da realização de um inventário preliminar expedito que contemple toda a variação fitofisionómica em análise;

Outro aspecto importante neste estudo está ligada a análise do comportamento dos atributos polarimétricos relativos à variação florístico-estrutural de áreas sob diferentes condições de desenvolvimento. Para isto, as análises exploratórias *in loco* baseadas nas informações registradas pela fotografia hemisférica – fração de abertura do dossel (%), na diferença de fase HH-VV, na resposta de polarização paralela, além da técnica de classificação por decomposição de alvos de Cloude-Pottier, em conjunto com a caracterização florístico-estrutural das unidades amostrais, permitem concluir que:

- (d) No povoamento analisado, o maior número de estratos e a maior diversidade florística presentes, sobretudo nas florestas primárias, foram preponderantes para a diminuição da intensidade luminosa no interior da tipologia, o que possivelmente determina a profundidade de penetração da onda e os mecanismos que regem a interação do sinal com o alvo florestal;
- (e) A diferença de fase HH-VV comprovou que o espalhamento médio predominante é do tipo volumétrico e/ou causado por múltiplas interações, embora todas as tipologias em análise tenham indicado uma tendência crescente de espalhamento do tipo *double bounce* com a diminuição do estágio de crescimento da floresta, principalmente devido a menor diversidade florística e ao conseqüente processo de sucessão florestal, acarretando a abertura de clareiras, encontradas nas áreas de sucessão florestal;
- (f) As diferenças ocorrentes nas respostas de polarização paralela geradas indicaram que o retroespalhamento das diferentes fitofisionomias foi regido por diferentes mecanismos físicos, decorrentes da variação florístico-estrutural da floresta. Todavia, as características individuais de distribuição de indivíduos, bem como características físicas individuais das espécies no interior de cada unidade

amostral, até mesmo na mesma tipologia produzem respostas de polarização características para cada alvo analisado, comprovando que o comportamento do retroespalhamento em relação às formas das respostas de polarização paralela não é somente decorrente da altura das árvores e de sua respectiva distribuição diamétrica, apesar da variação em termos de diversidade florística;

- (g) Os processos de espalhamento de alta entropia foram predominantes em todas as fitofisionomias analisadas, acarretado pelo espalhamento da vegetação com espalhadores anisotrópicos aleatórios. É possível que a aleatoriedade da estrutura florestal (principalmente galhos grossos), decorrentes da grande diversidade florística, seja responsável por este tipo de interação da onda incidente com a tipologia florestal. Todavia, nas unidades de SSI o aumento substancial dos processos de espalhamento do tipo dipolo, os espalhamentos de média entropia, comportamento esse considerado independente da estrutura florestal e da composição florística, são conjuntamente importantes na definição dos processos predominantes de espalhamento;
- (h) O método de classificação por decomposição de alvos de Cloude-Pottier, baseado nas zonas de classificação bidimensional entre os valores de entropia e ângulo alfa médio, de acordo com os dados em análise, é capaz de detectar a variabilidade florístico-estrutural existente entre as unidades amostrais de FP com relação às unidades tipológicas de FEM e SSA. Porém, era esperado que esse método apresentasse uma maior representatividade de mecanismos de espalhamento produzidos por diedros, pois nas demais análises exploratórias há uma tendência de aumento do mecanismo de espalhamento do tipo *double bounce*, resultante da interação solo-tronco;

O desenvolvimento deste trabalho demonstrou indicativos inequívocos de que a modelagem de biomassa arbórea acima do solo com dados PolSAR sofre influências significativas das variações fisionômico-estruturais e das características intrínsecas peculiares de cada unidade amostral no processo de sucessão florestal. Em consequência disso, há a necessidade de investigação mais aprofundada desta questão, antes da aplicação direta da equação de biomassa ora gerada, para que seja aplicada simplesmente em estimativas de outras regiões da floresta amazônica, com distintos aspectos estruturais. De outra forma, de acordo com o caráter evolutivo da linha de pesquisa, sugere-se investigar a informação interferométrica SAR, bem como as

técnicas PolInSAR, no detalhamento da estrutura vertical, contribuindo sobremaneira, também, na modelagem de biomassa de ambientes tropicais.

Para o melhor entendimento do comportamento do retroespalhamento dos dados PolSAR relativo a variação florístico-estrutural, sugere-se estudos mais avançados à respeito da arquitetura das espécies arbóreas individuais,, com o intuito de verificar diferentes comportamentos polarimétricos relativos às variações ocorridas na arquitetura de uma determinada espécie, bem como do seu posicionamento na unidade amostral em análise. Para isso, torna-se necessário que o posicionamento relativo da espécie dentro de cada unidade amostral seja obtido com maior precisão, por meio da utilização de GPS diferencial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIBA, H.; MURATA, K; IWASHITA, H. Experimental results of L-band microwave penetration properties of tropical and subtropical trees. In: JAPAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING. 8., 1988, Tóquio. **Proceedings...** Tóquio, 1988. p. 51-54.

ALMEIDA, S. S.; LISBOA, P. L. B.; SILVA, A. S. L. Diversidade forística de uma comunidade arbórea na estação científica “Ferreira Penna”, em Caxiuanã (Pará). **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Botânica**, v.9, n.1, p. 93-128. 1993.

ANSELIN, L. The Moran scatterplot as ESDA tool to assess local instability in spatial association. In: FISHER, M.; SCHOLTEN, H. J.; UNWIN, D.(eds.). **Spatial analytical perspectives on GIS**. London: Taylor & Francis, 1996. p. 111-126.

ANGIOSPERM PHYLOGENY GROUP (APG II). An ordinal classification for the families of flowering plants. **Annals of Missouri Botanical Garden**, v.58, n.4, p.531-553, 1998.

BERG, C. C. **Moreae, Artocarpeae, and Orstenia (Moraceae) with introductions to the family and Ficus and with additions and corrections to Flora Neotropica Monograph 7**. New York: New York. Botanical Garden Press, 2001. 347 p. (Flora Neotropica Monograph, 83).

BOERNER, W. M.; FOO, B. Y.; EOM, H. J. Interpretation of the polarimetric co-polarization phase term in radar images obtained with the JPL airborne L-Band SAR system. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-25, n.1, p. 77– 81, 1987.

BOERNER, W. M., MOTT, H., LU NEBURG, E., LIVINGSTONE, C., BRISCO, B., BROWN, R. J.; PATERSON, J. S. Polarimetry in radar remote sensing: basic and applied concepts. In: HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. (Eds.), **Principles and applications of imaging radar, manual of remote sensing**, (3 ed). New York: Wiley. v. 2, n. sn, p. 271 – 357, 1998.

BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. **Forest Science**, v.35, n.4, p.881-902, 1989.

BROWN, S.; IVERSON, L. R.; LUGO, A. E. Land use and biomass changes of forests in Peninsular Malaysia during 1972-1982: a GIS approach. In: Dale, V. **Effects of land use change on atmospheric CO2 concentrations: Southeast Asia as a case study**. New York: Springer-Verlag, 1993. Cap. 4, p. 117-143.

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (CCRS) Radar polarimetry: advanced radar polarimetry tutorial. In: **Fundamentals of remote sensing**. 2001. 97p Disponível em: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/polarim/pdf/polarim_e.pdf>. Acesso em: 13 de julho de 2007.

CARVALHO, J. O. P. **Análise estrutural da regeneração natural em floresta tropical densa na região do Tapajós no estado do Pará**. 1982. 128p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1982.

CARVALHO, F. A.; NASCIMENTO, M. T. Estrutura diamétrica da comunidade e das principais populações arbóreas de um remanescente de floresta atlântica submontana (Silva Jardim-RJ, Brasil). **Revista Árvore**, v.33, n.2, p.327-337, 2009.

CARVALHO, J. O. P. de. **Structure and dynamics of logged over Brazilian Amazonian rain forest**. 1992. 215p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - University of Oxford, Oxford, 1992.

CHEN, J. M.; BLACK, T. A.; ADAMS, R. S. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 56, n. 1-2, p. 129-143, 1991.

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 2, p. 498-518, Mar 1996.

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. An entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 1, p. 68-78, 1997.

COLLINS, J. N.; HUTLEY, L. B.; WILLIAMS, R. J.; BOGGS, G.; BELL, D.; BARTOLO, R. Estimating landscape-scale vegetation carbon stocks using airborne multi-frequency polarimetric synthetic aperture radar (SAR) in the savannahs of north Australia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 5, p. 1141 – 1159, 2009.

COSTA, D. H. M. **Dinâmica da composição florística e crescimento de uma área de floresta de terra firme na Flona do Tapajós após a colheita de madeira**. 2000. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará, 2000.

COSTA, D. H. M.; CARVALHO, J. O. P.; VAN DER BERG, E. Crescimento diamétrico de maçaranduba (*Manilkara huberi* Chevalier) após a colheita da madeira. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 3, n. 5, p. 65-76, jul./dez. 2007.

CURTIS, J. T.; MCINTOSH, R. P. An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. **Ecology**, v. 32, n. 3, p. 476-496, 1951.

DE MATTHAEIS, P.; FERRAZZOLI, P.; GUERRIERO, L.; SCHIAVON, G.; SOLIMINI, D.; TOGNOLATTI, P. Radar response to vegetation parameters: comparison between theory and MAESTRO-1 results. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS '91), 1991, Espoo, Finland. **Proceedings...** [S.l: s.n], 1991. v. 1, p. 685-688.

DOBSON, M. C. *et al.* Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X – SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 4, p. 877 – 895, 1995.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T. Mapping soil moisture distribution with imaging radar. In: HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. (Eds.), **Principles and applications of imaging radar, manual of remote sensing**, 3.ed. New York: Wiley, 1998. v. 2 , p. 407-433.

- ENVI SARscape 4.1.001. **Sarmap**: your information gateway. Switzerland, 2008.
- EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA. **Single vs multi polarization SAR data**. 2005a. 28p. <<http://earth.esa.int/polsarpro/tutorial.html>>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA. **Polarimetric decompositions**. 2005b. 28p.. Disponível em: <<http://earth.esa.int/polsarpro/tutorial.html>>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MACHADO, E. L. M. Análise da composição florística e fitossociológica da Floresta Nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. **Acta Amazônica**, v.35, n.2, p.167-185, 2005.
- EVANS, D. L.; FARR, T. G.; VAN ZYL, J. J.; ZEBKER, H. A. Radar polarimetry: analysis tools and applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 6 p. 774 – 789, 1988.
- FISHER, N. I. **Statistical analysis of circular data**. 1.ed. New York: Cambridge University Press, 1993. 277p.
- FREEMAN, A. Fitting a two-component scattering model to polarimetric SAR Data From Forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 2, p. 2583-2592, 2007.
- 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.
- FREESE, F. **Linear regression methods in forest research**. 1.ed. Washigton, D.C: U.S. Forest Service Research Paper FPL - 17, 1964. 136p.
- GALO, M; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC), 1., 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1994., Tomo II, p. 41 – 48.
- GAP LIGHT ANALYZER (GLA). **Software**. Version 2.0.Simon Fraser University (SFU), British Columbia, Canada and Institute of Ecosystem Studies (IES), New York, USA. 1999.
- GONÇALVES, F. G. **Avaliação de dados polarimétricos para estimativa volumétrica de florestas tropicais**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.
- GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R. Composição florística e estrutura de uma unidade de manejo florestal sustentável na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 2, p. 229-244, 2008.
- GREEN, R. M. Relationships between polarimetric SAR backscatter and forest canopy and sub-canopy biophysical properties. **International Journal of Remote Sensing**, v.

19, n. 12, p. 2395-2412, 1998.

GUIMARÃES, E. G. T.; PYLE, E. H. **Levantamento florestal de 20 ha na Floresta Nacional do Tapajós**. Santarém, Pará: LBA, 1999. 30p.

HAJNSEK, I.; POTTIER, E.; CLOUDE, S. R. Inversion of surface parameters from polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 4, p. 727-739, 2003.

HAWKINS, R. K. Determination of antenna elevation pattern for airborne SAR using the rough target approach. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 5, p. 896 - 905, 1990.

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. 866 p.

HILL, M. O. **TWINSPAN: a FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes**. Ithaca, NY: Cornell University, 1979. 60p.

HOEKMAN, D. H.; QUIÑONES, M. J. Land cover type and biomass classification using AirSAR data for evaluation of monitoring scenarios in the Colombian Amazon. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 2, p. 685 -696, 2000.

HOEKMAN, D. H.; QUIÑONES, M. J. Biophysical forest type characterization in the Colombian amazon by airborne polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40, n. 6, p. 1288 – 1300, 2002.

HOPKINS, M. J. G. Flora da Reserva Ducke, Amazonas, Brasil. **Rodriguésia**, v. 56, n. 86, p. 9-25, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Recursos naturais e meio ambiente: uma visão do Brasil**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1996. 208 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Projeto PRODES e DETER: Monitoramento da floresta amazônica por satélite e detecção do desmatamento em tempo real**. São José dos Campos, 2010. Disponíveis em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>; <http://www.obt.inpe.br/deter/>. Acesso em: 20 jul. 2010.

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.

IZBICKI, R.; ESTEVES, L. G. **Análise de dados circulares: Projeto de iniciação científica**. São Paulo: IME-USP, 2008. 29p.

JARDIM, F. C. S.; HOSOKAWA, R. T. Estrutura da floresta equatorial úmida da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. **Acta Amazônica**,

v.16/17(único), p.411-508, 1986.

JARDIM, F. C. S.; SERRÃO, D. R.; NEMER, T. C. Efeito de diferentes tamanhos de clareiras, sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas, em Moju-PA. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 1, p. 37-48, 2007.

JENNINGS, S. B.; BROWN, N. D.; SHEIL, D. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. **Forestry**, v. 72, n. 1, p. 59-73, 1999.

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

KENT, M.; COKER, P. **Vegetation description and analysis**. London: Behaven Press, 1992. 363p.

KUGA, Y.; ZHAO, H. Experimental studies on the phase distribution of two co-polarized signal scattered from two-dimensional rough surfaces. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 2, p. 601- 603, 1996.

KUNZ, S. H.; IVANAUSKAS, N. M.; MARTINS, S. V.; SILVA, E.; STEFANELLO, D. Aspectos florísticos e fitossociológicos de um trecho de Floresta Estacional Perenifólia na Fazenda Trairão, Bacia do rio das Pacas, Querência-MT. **Acta Amazônica**, v.38, n.2, p.245-254, 2008.

LAMPRECHT, H. Ensayo sobre la estructura florística de la parte sub-oriental del Bosque Universitario “Él Caimital” – Estado Barinas. **Rev. For. Venez**, Merida, v. 7, n. 10/11, p. 77-119, 1964.

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

LEE, J. S.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**. Boca Raton: Boca Raton: Taylor & Francis Group CRC Press, 2009. 398 p.

LILLIEFORS, H. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. **Journal of the American Statistical Association**, v.62, p. 399-402, 1967.

LI-WEN, Z; XIAO-GUANG, Z; YONG-MEI, J.; GANG-YAO, K. Iterative classification of polarimetric SAR image based on the Freeman decomposition and scattering entropy. In: SYNTHETIC APERTURE RADAR (APSAR 2007), 1. 2007, 5-9 Nov., Conferência Asiática e do Pacífico. Huangshan, China. **Electronic Proceedings...**, 2007. p. 473-476 . Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4418653>. Acesso em: 5 de dezembro. 2009.

LONGHI, S. J. **A estrutura de uma floresta natural de Araucaria angustifolia (Bert.) Ktze, no sul do Brasil**. 1980, 198p. Dissertação (Mestrado em Ciências

Florestais) - Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 1980.

MAGURRAN, A. **Ecological diversity and its measurement**. Princeton: Princeton University Press, 1988. 179 p.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 3. ed. Chichester, England: John Wiley and Sons, 2005. 324p.

MAUÉS, M. M.; OLIVEIRA, P. E. A. M.; KANASHIRO, M. Polinização anemófila em *Bagassa Guianensis* Aubl. Moraceae (Tatajuba) In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 8., 2007, Caxambu, MG. **Anais...** Caxambu – MG: São Paulo Editora, 2007.

MCNAIRN, H.; DUGUAY, C.; BRISCO, B.; PULTZ, T. Z. The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response. **Remote Sensing of Environment**, v.80, n.2, p.308-320, 2002.

McCUNE, B.; MEFFORD, M. J. **PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data version 2.0**. Oregon, USA: 1995. 126p.

McCUNE, B.; MEFFORD, M. J. **PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data version 3.0**. Oregon, USA: 1997. 40p.

MCNAIRN, H.; DUGUAY, C.; BRISCO, B.; PULTZ, T. Z. The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 2, p. 308-320, 2002.

MEIER E.; FREI U.; NUESCH, D. Precise Terrain Corrected Geocoded Images, SAR Geocoding. **Data and System**, Wichmann Verlag, 1993.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. **Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping**, n. 1, p. 222 - 231, 1982.

MERINO, A.; REAL, C.; ALVAREZ-GONZALEZ, J. G.; RODRIGUEZ-GUITIAN, M. A. Forest structure and C stocks in natural *Fagus sylvatica* forest in southern Europe: The effects of past management. **Forest Ecology and Management**, v. 250, s. n., p. 206 – 214, 2007.

MONTEIRO, M. H. D. A.; ANDREATA, R. H. P.; NEVES, L. J. Estruturas secretoras em Sapotaceae. *Pesquisas, Botânica*, n.58, p.253-262, 2007.

MOORE, R. K.; HEMMAT, M. Determination of the vertical pattern of the SIR-B antenna. **International Journal of Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 839 - 847, 1988.

MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, G. H. **Aims and methods of vegetation ecology**. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1974. 547 p.

NAKAMURA, K. The alternative explanation to the alternative-outcome effect and the detection of the focal outcome effect. **Japanese Psychological Research**, v. 46, n. 1, p. 44-55, 2004.

NARVAES, I. S.; SANTOS, J. R.; SILVA, A. Q. Analysis of structural parameters of

forest typologies using L-band SAR data. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 16, n. 3, p. 475-489, 2010.

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

NSDI (National Spatial Data Infrastructure). ASPRS LIDAR GUIDELINES: Horizontal accuracy reporting. **Federal Geographic Data Committee, USA**. 1998. 62 p.

OLIVEIRA, L.C. **Efeito da exploração da madeira e de diferentes intensidades de desbastes sobre a dinâmica da vegetação de uma área de 136ha na Floresta Nacional do Tapajós**. 2005. 183f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2005.

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

QUEGAN, S. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data-theory and observation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 1, p. 89 - 99, 1994.

RADAMBRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Folha AS.21-Santarém**: Geologia, geomorfologia pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, 1976. 510p. (Levantamento dos Recursos Naturais, 10).

RAMOS, F. R. **Análise espacial de estruturas intra-urbanas: o caso de São Paulo**. 2002. 142p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.

RAY, T. W.; FARR, T. G.; VAN ZYL, J. J. Polarization signatures for abandoned agricultural fields in the Manix Basin area of the Mojave Desert: can polarimetric SAR detect desertification? In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS '92), 1992, Houston. **Proceedings...** Houston: IEEE, 1992. v. 2, p. 947 – 949.

ROSENQVIST, A.; MILNE, A.; LUCAS, R.; IMHOFF, M.; DOBSON, C. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environment Science and Policy**, v. 6, p. 441 – 455, 2003.

RENCHER, A. C.; SCHAALJE, G. B. **Linear models in statistics**. 2 ed. New Jersey, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2007. 672p.

SÁ, J. P. M. **Applied statistics using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R**. 2 ed. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. 505p.

SAATCHI, S.; HALLIGAN, K.; DESPAIN, D. G.; CRABTREE, R. L. Estimation of forest fuel load from radar remote sensing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 6, p. 1726 – 1740, 2007.

SANTOS, J. R.; LACRUZ, M. S. P.; ARAUJO, L.S.; KEIL, M. Savanna and tropical

rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. **International Journal of Remote Sensing** (Print), Scotland, U.K., 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, p. 482-493, 2003.

SANTOS, J. R.; GONÇALVES, F. G. Configuration of L-band polarimetric signatures and scattering mechanisms of forest targets in the Brazilian Amazon. In: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Symposium - ISPRS08, 2008, Beijing. **Proceedings of the XXI International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress**. Beijing : ISPRS, 2008. v. XXXVII. p. 1075-1080.

SANTOS, J. R.; NARVAES, I. S.; GRAÇA, P. M. L. A.; GONÇALVES, F. G. Polarimetric responses and scattering mechanisms of tropical forests in the Brazilian Amazon.. In: JEDLOVEC, G. (NASA/MSFC-USA). (Org.). **Advances on geoscience and remote sensing**. 1 ed. Vukovar, Croatia: In-Tech, 2009. v. 8, p. 183-206.

SCUDELLER, V. V.; RAMOS, R. A.; CRUZ, M. E. G. Flora fanerogâmica da floresta de terra firme na RDS Tupé. In: SANTOS-SILVA, E. N.; SCUDELLER, V. V.(eds.) **Biotupé: Meio Físico, Diversidade Biológica e Sociocultural do Baixo Rio Negro, Amazônia Central**. UEA Edições, 2009. v. 2, p. 109 – 120.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B.; CHEN, H. J. A comparative study of various tests for normality. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1343-1372, 1968.

SHIMADA, M.; FREEMAN, A. A technique for measurement of spaceborne SAR antenna patterns using distributed targets. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 1, p. 100 - 114, 1995.

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

SHIMADA, M.; TADONO, T.; WATANABE, M. Determination of Polarimetric calibration parameters of L band SAR using uniform forest data. **Proceedings IGARSS**, Anchorage, AK, p. 699 - 702, 2004.

SHIMADA, M.; TANAKA, H.; TADONO, T.; WATANABE, M. Calibration and Validation of PALSAR (II): Use of polarimetric active radar calibrator and the amazon rainforest data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, p. 1849-1851, 2003.

SHIMADA, M.; WATANABE, M.; ROSENKVIST, A.; TADONO, T. PALSAR Calibration and validation - 2005 update. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, p. 3365-3368, 2005.

SILVA, K, E.; MATOS, F. D. A.; FERREIRA, M. M. Composição florística e fitossociológica de espécies arbóreas do Parque Fenológico da Embrapa Amazônia Ocidental. **Acta Amazônica**, v.38, n.2, p.213-222, 2008.

SIQUEIRA, L. P.; MESQUITA, C. A. B. **Meu pé de Mata Atlântica: Experiências de recomposição florestal em propriedades particulares no Corredor Central.** Rio de Janeiro: Instituto BioAtlântica, 2007. 188p.

SOUZA, D. R.; SOUZA, A. L.; LEITE, H. G.; YARED, J. A. G. Análise estrutural em floresta ombrófila densa de terra firme não explorada, Amazônia Oriental. **Revista Árvore**, v.30, n.1, p. 75-87, 2006.

TOUTIN, T. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893 - 1924, 2004.

TOUZI, R. Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 1, p. 73-84, 2007.

TOUZI, R.; BOERNER, W. M.; LEE, J. S.; LUENEBURG, E. A review of polarimetric in the context of synthetic aperture radar: concepts and information extraction. **Canadian Journal of Remote Sensing**. v. 30, n. 3, p. 380-407, 2004.

TOUZI, R.; DESCHAMPS, A.; ROTHER, G. Phase of target scattering for wetland characterization using polarimetric C-band SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 9, p. 3241-3261, 2009.

UHL, C., BUSCHBACHER, R.; SERRÃO, E. A. S. Abandoned pastures in eastern Amazonia, I: patterns of plant succession. **Journal of Ecology**, v.76, n.3, p.663-681, 1988.

ULABY, F. T.; ELACHI, C. **Radar polarimetry for geoscience applications.** Norwood: Artech House, Inc., 1990. 388 p.

ULABY, F. T.; HELD, D.; DOBSON, M. C.; MCDONALD, K. C.; SENIOR, T. B. A. Relating polarization phase difference of SAR signals to scene properties. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-25, n.1, p. 83-92, 1987.

VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management.** 1997. 330p. Doctoral Thesis – Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 1997.

VAN ZYL, J. J. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data”. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n. 1, p. 36 - 45, 1989.

VAN ZYL, J. J., ZEBKER H. A., ELACHI C. Imaging radar polarimetric signatures: theory and observation. **Radio Science**, v. 22, n. 4, p. 529-543, 1987.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing.** Boca Raton: Taylor & Francis Group CRC Press, 2006. 370 p.

ZEBKER, H. A.; NORIKANE, L. Radar polarimeter measures orientation of calibration corner reflectors. **Proceedings of the IEEE**, v. 75, n. 12, p. 1686-1688, 1987.

ZEBKER, H. A.; VAN ZYL, J. J. Imaging radar polarimetry: a review. **Proceedings of**

the IEEE, v. 79, n. 11, p. 1583-1606, 1991.

ZEBKER, H. A.; VAN ZYL, J. J.; HELD, D. N. Imaging radar polarimetry from wave synthesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. B1, p. 683-701, 1987.

ZHANG, L.; ZHANG, J.; ZOU, B.; ZHANG, Y. Comparison of methods for target detection and applications using polarimetric SAR image. **PIERS Online**, v. 4, n. 1, p. 140-145, 2008.

ZWILLINGER, D.; KOKOSKA, S. **Standard probability and statistics tables and formulae**. Boca Raton, London, New York Washington: CRC Press – Taylor & Francis Group, 1999. 554p.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Parâmetros fitossociológicos das espécies inventariadas em 35 unidades amostrais, com dimensões de 0,05 ha (SSI), 0,1 ha (SSInt e SSA) e 0,125 ha (FEM) e 1,0 ha (FEM e FP), com seus respectivos atributos quantitativos: N = números de indivíduos; DA = densidade absoluta; DR = densidade relativa; DoA = dominância absoluta; DoR = dominância relativa; FA = frequência absoluta; FR = frequência relativa; IVC = índice de valor de cobertura; IVI (%) = índice de valor de importância relativa, por ordem alfabética de famílias e em ordem decrescente de IVI%.

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVC	IVI (%)
Anacardiaceae									
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	48	3,7	0,7	0,122	0,56	6,9	0,46	1,26	0,58
<i>Astronium gracile</i> Engl.	12	0,9	0,18	0,205	0,95	4,2	0,28	1,12	0,47
<i>Thyrsodium guianense</i> Sagot. ex Marchand	5	0,4	0,07	0,003	0,01	1,5	0,1	0,09	0,06
<i>Anacardium</i> sp.	2	0,2	0,03	0,015	0,07	0,8	0,05	0,1	0,05
Annonaceae									
<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	240	18,3	3,52	0,382	1,76	30,4	2,02	5,28	2,43
<i>Duguetia echinophora</i> R.E.Fr.	103	7,9	1,51	0,146	0,67	24,6	1,64	2,18	1,27
<i>Guatteria ovalifolia</i> R.E.Fr.	22	1,7	0,32	0,058	0,27	5,4	0,36	0,59	0,32
<i>Xylopia benthamii</i> R.E.Fr.	11	0,8	0,16	0,012	0,06	3,1	0,2	0,22	0,14
<i>Annona montana</i> Macfad. .	1	0,1	0,01	0	0	0,4	0,03	0,02	0,01
Apocynaceae									
<i>Geissospermum sericeum</i> Benth. & Hook.f. ex Miers	42	3,2	0,62	0,374	1,72	14,2	0,95	2,34	1,1
<i>Aspidosperma rigidum</i> Rusby	9	0,7	0,13	0,177	0,82	3,5	0,23	0,95	0,39
<i>Himatanthus sucuuba</i> (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson	11	0,8	0,16	0,022	0,1	3,1	0,2	0,26	0,16
<i>Lacmellea aculeata</i> (Ducke) Monach.	8	0,6	0,12	0,015	0,07	3,1	0,2	0,19	0,13
<i>Aspidosperma duckei</i> Huber	6	0,5	0,09	0,013	0,06	1,5	0,1	0,15	0,08
<i>Ambelania</i> sp.	5	0,4	0,07	0,005	0,03	1,9	0,13	0,1	0,08
<i>Aspidosperma desmanthum</i> Benth. ex Müll. Arg.	5	0,4	0,07	0,01	0,05	1,5	0,1	0,12	0,07
<i>Malouetia</i> sp.	1	0,1	0,01	0,005	0,02	0,4	0,03	0,04	0,02
Araliaceae									
<i>Schefflera morototoni</i> (Aubl.) Maguire, Steyerm. & Frodin	9	0,7	0,13	0,04	0,18	3,1	0,2	0,32	0,17

(Continua)

Tabela A.1 - (Continuação)

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVC	IVI (%)
Bignoniaceae									
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D.Don	171	13,1	2,51	0,423	1,95	25	1,66	4,46	2,04
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	4	0,3	0,06	0,033	0,15	1,2	0,08	0,21	0,1
<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. O. Grose	1	0,1	0,01	0,032	0,15	0,4	0,03	0,16	0,06
Bixaceae									
<i>Bixa arborea</i> Huber	37	2,8	0,54	0,117	0,54	7,7	0,51	1,08	0,53
Boraginaceae									
<i>Cordia bicolor</i> A.DC.	160	12,2	2,35	0,233	1,08	16,9	1,13	3,42	1,52
<i>Cordia alliodora</i> (Ruíz & Pav.) Oken	119	9,1	1,74	0,148	0,68	28,1	1,87	2,43	1,43
Burseraceae									
<i>Protium apiculatum</i> Swart	245	18,7	3,59	0,519	2,39	51,9	3,46	5,98	3,15
<i>Tratinnickia rhoifolia</i> Willd.	33	2,5	0,48	0,045	0,21	9,6	0,64	0,69	0,44
<i>Protium subserratum</i> (Engl.) Engl.	12	0,9	0,18	0,05	0,23	3,5	0,23	0,41	0,21
<i>Protium robustum</i> (Swart) D. M. Porter	2	0,2	0,03	0,024	0,11	0,8	0,05	0,14	0,06
Caricaceae									
<i>Jacaratia spinosa</i> var. <i>digitata</i> (Poepp. & Endl.) A.DC.	19	1,5	0,28	0,046	0,21	3,8	0,26	0,49	0,25
Caryocaraceae									
<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	5	0,4	0,07	0,238	1,1	1,9	0,13	1,17	0,43
<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	4	0,3	0,06	0,191	0,88	1,5	0,1	0,94	0,35
Celastraceae									
<i>Maytenus pruinosa</i> Reissek	8	0,6	0,12	0,018	0,08	2,7	0,18	0,2	0,13
Chrysobalanaceae									
<i>Licania</i> sp.	93	7,1	1,36	0,796	3,67	20,8	1,38	5,03	2,14
<i>Licania heteromorpha</i> Benth.	28	2,1	0,41	0,201	0,93	9,2	0,61	1,34	0,65
<i>Couepia bracteosa</i> Benth.	5	0,4	0,07	0,023	0,11	1,9	0,13	0,18	0,1

(Continua)

Tabela A.1 - (Continuação)

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVC	IVI (%)
Clusiaceae									
<i>Rheedia acuminata</i> (Ruiz & Pav.) Planch. & Triana	5	0,4	0,07	0,011	0,05	1,9	0,13	0,13	0,08
<i>Symphonia globulifera</i> L.f.	1	0,1	0,01	0,002	0,01	0,4	0,03	0,02	0,02
Combretaceae									
<i>Terminalia amazonia</i> (J. F. Gmel.) Exell	11	0,8	0,16	0,1	0,46	3,8	0,26	0,62	0,29
Ebenaceae									
<i>Diospyros</i> sp.	9	0,7	0,13	0,028	0,13	3,5	0,23	0,26	0,16
Elaeocarpaceae									
<i>Sloanea froesii</i> Earle Sm.	144	11	2,11	0,155	0,71	18,5	1,23	2,83	1,35
Euphorbiaceae									
<i>Sapium</i> sp.	35	2,7	0,51	0,098	0,45	9,2	0,61	0,97	0,53
<i>Sagotia racemosa</i> Baill.	36	2,7	0,53	0,061	0,28	11,2	0,74	0,81	0,52
<i>Hevea</i> sp.	19	1,5	0,28	0,114	0,52	6,5	0,44	0,8	0,41
<i>Joannesia heveoides</i> Ducke	31	2,4	0,45	0,058	0,27	3,5	0,23	0,72	0,32
<i>Mabea</i> sp.	11	0,8	0,16	0,016	0,07	4,2	0,28	0,23	0,17
<i>Glycydendron amazonicum</i> Ducke	11	0,8	0,16	0,016	0,08	3,1	0,2	0,24	0,15
<i>Pausandra densiflora</i> Lanj.	11	0,8	0,16	0,019	0,09	2,7	0,18	0,25	0,14
<i>Drypetes variabilis</i> Uittien	1	0,1	0,01	0,002	0,01	0,4	0,03	0,02	0,02
Fabaceae									
<i>Swartzia corrugata</i> Benth.	104	7,9	1,52	0,45	2,08	19,2	1,28	3,6	1,63
<i>Sclerobium chrysophyllum</i> Poepp.	42	3,2	0,62	0,41	1,89	13,8	0,92	2,51	1,14
<i>Tachigali myrmecophila</i> (Ducke) Ducke	40	3,1	0,59	0,217	1	13,5	0,9	1,59	0,83
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	7	0,5	0,1	0,261	1,21	2,7	0,18	1,31	0,5
<i>Swartzia brachyrachis</i> Harms	22	1,7	0,32	0,07	0,32	7,3	0,49	0,65	0,38
<i>Tachigali</i> sp.	27	2,1	0,4	0,039	0,18	7,7	0,51	0,58	0,36

(Continua)

Tabela A.1 - (Continuação)

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVC	IVI (%)
<i>Hymenaea parvifolia</i> Huber	6	0,5	0,09	0,179	0,83	1,9	0,13	0,91	0,35
<i>Sclerolobium guianense</i> Benth.	13	1	0,19	0,107	0,49	5	0,33	0,68	0,34
<i>Copaifera multijuga</i> Hayne	13	1	0,19	0,098	0,45	4,6	0,31	0,64	0,32
<i>Swartzia stipulifera</i> Harms	22	1,7	0,32	0,028	0,13	6,9	0,46	0,45	0,3
<i>Dialium guianense</i> (Aubl.) Sandwith	13	1	0,19	0,079	0,37	4,6	0,31	0,56	0,29
<i>Swartzia acuminata</i> Willd. ex Vogel	7	0,5	0,1	0,093	0,43	2,3	0,15	0,53	0,23
<i>Sclerolobium melinonii</i> Harms	1	0,1	0,01	0,001	0	0,4	0,03	0,02	0,01
<i>Alexa grandiflora</i> Ducke	32	2,4	0,47	0,634	2,92	7,3	0,49	3,39	1,29
<i>Cassia pentandra</i> Raddi	70	5,3	1,03	0,19	0,87	6,2	0,41	1,9	0,77
<i>Ormosia</i> sp.	31	2,4	0,45	0,064	0,3	10,4	0,69	0,75	0,48
<i>Pterocarpus amazonicus</i> Huber	11	0,8	0,16	0,027	0,12	3,5	0,23	0,28	0,17
<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	8	0,6	0,12	0,026	0,12	2,7	0,18	0,24	0,14
<i>Diploptropis purpurea</i> (Rich.) Amshoff	4	0,3	0,06	0,024	0,11	1,2	0,08	0,17	0,08
<i>Bowdichia nitida</i> Spruce ex Benth.	2	0,2	0,03	0,026	0,12	0,8	0,05	0,15	0,07
<i>Dimorphandra gardneriana</i> Tul.	31	2,4	0,45	0,114	0,53	7,3	0,49	0,98	0,49
<i>Eperua bijuga</i> Mart. ex Benth.	34	2,6	0,5	0,024	0,11	9,6	0,64	0,61	0,42
<i>Enterolobium schomburgkii</i> (Benth.) Benth.	10	0,8	0,15	0,075	0,35	3,5	0,23	0,49	0,24
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	10	0,8	0,15	0,059	0,27	3,8	0,26	0,42	0,22
<i>Eperua schomburgkiana</i> Benth.	10	0,8	0,15	0,068	0,31	3,1	0,2	0,46	0,22
<i>Parkia multijuga</i> Benth.	7	0,5	0,1	0,042	0,19	2,7	0,18	0,3	0,16
<i>Stryphnodendron barbatimam</i> Mart.	7	0,5	0,1	0,028	0,13	2,3	0,15	0,23	0,13
<i>Ormosia discolor</i> Spruce ex Benth.	4	0,3	0,06	0,033	0,15	1,5	0,1	0,21	0,1
<i>Platymiscium filipes</i> Benth.	4	0,3	0,06	0,025	0,11	1,5	0,1	0,17	0,09
<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke	10	0,8	0,15	0,009	0,04	0,8	0,05	0,19	0,08
<i>Martiodendron parvifolium</i> (Benth.) Gleason	1	0,1	0,01	0,001	0	0,4	0,03	0,02	0,01
<i>Parkia pendula</i> (Willd.) Benth. ex Walp.	3	0,2	0,04	0,009	0,04	1,2	0,08	0,08	0,05

(Continua)

Tabela A.1 - (Continuação)

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVC	IVI (%)
<i>Vataireopsis</i> spp.	4	0,3	0,06	0,007	0,03	1,5	0,1	0,09	0,06
<i>Inga</i> sp.	248	18,9	3,64	0,397	1,83	51,2	3,4	5,47	2,96
<i>Inga paraensis</i> Ducke	45	3,4	0,66	0,151	0,7	10,8	0,72	1,36	0,69
<i>Inga alba</i> (Sw.) Willd.	36	2,7	0,53	0,06	0,28	7,3	0,49	0,8	0,43
<i>Pithecellobium racemosum</i> Ducke	26	2	0,38	0,06	0,28	9,2	0,61	0,66	0,42
<i>Piptadenia suaveolens</i> Miq.	18	1,4	0,26	0,114	0,52	6,5	0,44	0,79	0,41
<i>Parkia</i> sp.	23	1,8	0,34	0,064	0,29	8,8	0,59	0,63	0,41
<i>Enterolobium maximum</i> Ducke	10	0,8	0,15	0,064	0,29	3,5	0,23	0,44	0,22
<i>Abarema</i> sp.	2	0,2	0,03	0,031	0,14	0,8	0,05	0,17	0,07
<i>Abarema mataybifolia</i> (Sandwith) Barneby & J.W.Grimes	5	0,4	0,07	0,004	0,02	1,9	0,13	0,09	0,07
Goupiaceae									
<i>Goupia glabra</i> Aubl.	23	1,8	0,34	0,143	0,66	6,2	0,41	1	0,47
Humiriaceae									
<i>Sacoglottis</i> sp.	3	0,2	0,04	0,016	0,08	1,2	0,08	0,12	0,07
<i>Sacoglottis amazonica</i> Mart.	2	0,2	0,03	0,012	0,06	0,8	0,05	0,09	0,05
Hypericaceae									
<i>Vismia cayennensis</i> (Jacq.) Pers.	50	3,8	0,73	0,109	0,51	9,6	0,64	1,24	0,63
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Pers.	197	15	2,89	0,087	0,4	8,5	0,56	3,29	1,28
<i>Vismia japurensis</i> Reichardt	61	4,7	0,89	0,032	0,15	8,1	0,54	1,04	0,53
Lauraceae									
<i>Ocotea</i> sp.	118	9	1,73	0,48	2,22	29,6	1,97	3,95	1,97
<i>Licaria cannella</i> (Meisn.) Kosterm.	71	5,4	1,04	0,15	0,69	19,6	1,31	1,73	1,01
<i>Mezilaurus</i> sp.	7	0,5	0,1	0,016	0,08	2,7	0,18	0,18	0,12
<i>Mezilaurus lindaviana</i> Schwacke & Mez	6	0,5	0,09	0,013	0,06	2,3	0,15	0,15	0,1
<i>Ocotea rubra</i> Mez	2	0,2	0,03	0,008	0,04	0,8	0,05	0,07	0,04

(Continua)

Tabela A.1 - (Continuação)

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVC	IVI (%)
<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisr.) Taub. ex Mez	2	0,2	0,03	0,007	0,03	0,8	0,05	0,06	0,04
<i>Aniba canelilla</i> (Kunth) Mez	3	0,2	0,04	0,003	0,01	0,8	0,05	0,06	0,04
<i>Aniba duckei</i> Kosterm.	1	0,1	0,01	0,002	0,01	0,4	0,03	0,02	0,02
Lecythidaceae									
<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & R.Knuth	103	7,9	1,51	0,482	2,22	28,1	1,87	3,73	1,87
<i>Eschweilera blanchetiana</i> (O. Berg) Miers.	119	9,1	1,74	0,378	1,74	29,2	1,95	3,49	1,81
<i>Eschweilera amazonica</i> R.Knuth	73	5,6	1,07	0,262	1,21	18,1	1,2	2,28	1,16
<i>Eschweilera amara</i> (Aubl.) Nied.	64	4,9	0,94	0,211	0,97	19,2	1,28	1,91	1,06
<i>Holopyxidium jarana</i> Huber ex Ducke	38	2,9	0,56	0,314	1,45	13,5	0,9	2,01	0,97
<i>Eschweilera odora</i> (Poep. ex O. Berg) Miers	28	2,1	0,41	0,129	0,59	9,6	0,64	1,01	0,55
<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	32	2,4	0,47	0,036	0,17	5,8	0,38	0,64	0,34
<i>Lecythis usitata</i> Miers	5	0,4	0,07	0,074	0,34	1,9	0,13	0,41	0,18
<i>Cariniana micrantha</i> Ducke	1	0,1	0,01	0,001	0,01	0,4	0,03	0,02	0,02
Malpighiaceae									
<i>Byrsonima crispera</i> A. Juss.	27	2,1	0,4	0,093	0,43	8,5	0,56	0,83	0,46
Malvaceae									
<i>Theobroma speciosum</i> Willd. ex Spreng.	37	2,8	0,54	0,035	0,16	12,3	0,82	0,7	0,51
<i>Sterculia pilosa</i> Ducke	28	2,1	0,41	0,075	0,35	9,2	0,61	0,76	0,46
<i>Theobroma subincanum</i> Mart.	11	0,8	0,16	0,019	0,09	3,5	0,23	0,25	0,16
<i>Apeiba albiflora</i> Ducke	73	5,6	1,07	0,174	0,8	19,2	1,28	1,87	1,05
<i>Luehea speciosa</i> Willd.	5	0,4	0,07	0,029	0,13	1,5	0,1	0,21	0,1
<i>Quararibea guianensis</i> Aubl.	19	1,5	0,28	0,047	0,22	6,5	0,44	0,49	0,31
<i>Bombax paraense</i> Ducke	9	0,7	0,13	0,006	0,03	2,7	0,18	0,16	0,11
<i>Bombax</i> sp.	1	0,1	0,01	0,001	0	0,4	0,03	0,02	0,02
Melastomataceae									

(Continua)

Tabela A.1 - (Continuação)

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVC	IVI (%)
<i>Bellucia</i> sp.	29	2,2	0,43	0,063	0,29	7,3	0,49	0,71	0,4
<i>Miconia</i> sp.	27	2,1	0,4	0,043	0,2	8,1	0,54	0,59	0,38
<i>Mouriri plasschaertii</i> Pulle	8	0,6	0,12	0,017	0,08	3,1	0,2	0,2	0,13
Meliaceae									
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	55	4,2	0,81	0,454	2,09	19,6	1,31	2,9	1,4
<i>Guarea kunthiana</i> A.Juss.	59	4,5	0,86	0,176	0,81	16,5	1,1	1,68	0,93
<i>Trichilia</i> sp. 2	47	3,6	0,69	0,073	0,34	6,9	0,46	1,03	0,5
<i>Trichilia lecointei</i> Ducke	7	0,5	0,1	0,05	0,23	2,3	0,15	0,33	0,16
<i>Guarea</i> sp.	5	0,4	0,07	0,005	0,02	1,9	0,13	0,1	0,08
<i>Cedrela odorata</i> L.	1	0,1	0,01	0,003	0,01	0,4	0,03	0,03	0,02
Monimiaceae									
<i>Siparuna</i> sp.	19	1,5	0,28	0,051	0,24	5,8	0,38	0,52	0,3
Moraceae									
<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	142	10,8	2,08	0,326	1,5	11,5	0,77	3,59	1,45
<i>Perebea guianensis</i> Aubl.	56	4,3	0,82	0,117	0,54	17,3	1,15	1,36	0,84
<i>Sahagunia racemifera</i> Huber	32	2,4	0,47	0,085	0,39	11,5	0,77	0,86	0,54
<i>Brosimum guianense</i> (Aubl.) Huber	15	1,1	0,22	0,079	0,36	5	0,33	0,58	0,31
<i>Helicostylis pedunculata</i> Benoist	16	1,2	0,23	0,055	0,25	5	0,33	0,49	0,27
<i>Perebea mollis</i> (Poepp. & Endl.) J.E.Huber	14	1,1	0,21	0,03	0,14	5,4	0,36	0,35	0,23
<i>Brosimum discolor</i> Schott	13	1	0,19	0,021	0,1	4,6	0,31	0,29	0,2
<i>Brosimum parinarioides</i> Ducke	8	0,6	0,12	0,058	0,27	2,7	0,18	0,38	0,19
<i>Maquira sclerophylla</i> (Ducke) C.C.Berg	9	0,7	0,13	0,019	0,09	3,5	0,23	0,22	0,15
<i>Ficus</i> sp.	4	0,3	0,06	0,033	0,15	1,5	0,1	0,21	0,1
<i>Brosimum lactescens</i> (S.Moore) C.C.Berg	2	0,2	0,03	0,018	0,08	0,8	0,05	0,11	0,05
<i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav.	2	0,2	0,03	0,006	0,03	0,8	0,05	0,06	0,04

(Continua)

Tabela A.1 - (Continuação)

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVC	IVI (%)
<i>Duroia sprucei</i> Rusby	10	0,8	0,15	0,019	0,09	3,1	0,2	0,23	0,15
<i>Chimarrhis turbinata</i> DC.	8	0,6	0,12	0,018	0,08	2,7	0,18	0,2	0,13
<i>Amaioua</i> sp.	7	0,5	0,1	0,003	0,01	2,3	0,15	0,12	0,09
<i>Duroia macrophylla</i> Huber	3	0,2	0,04	0,002	0,01	1,2	0,08	0,05	0,04
Rutaceae									
<i>Euxylophora</i> sp.	1	0,1	0,01	0,006	0,03	0,4	0,03	0,04	0,02
Salicaceae									
<i>Casearia decandra</i> Jacq.	90	6,9	1,32	0,093	0,43	16,9	1,13	1,75	0,96
<i>Laetia procera</i> (Poepp.) Eichler	55	4,2	0,81	0,089	0,41	12,7	0,84	1,22	0,69
<i>Casearia javitensis</i> Kunth	40	3,1	0,59	0,056	0,26	12,3	0,82	0,84	0,55
<i>Homalium</i> sp.	6	0,5	0,09	0,012	0,06	2,3	0,15	0,14	0,1
<i>Lindackeria paraensis</i> Kuhlmann	4	0,3	0,06	0,006	0,03	1,5	0,1	0,09	0,06
<i>Ryania speciosa</i> Vahl	1	0,1	0,01	0,001	0,01	0,4	0,03	0,02	0,02
Sapindaceae									
<i>Talisia longifolia</i> (Benth.) Radlk.	29	2,2	0,43	0,098	0,45	9,2	0,61	0,88	0,5
<i>Sapindus saponaria</i> L.	1	0,1	0,01	0,004	0,02	0,4	0,03	0,03	0,02
Sapotaceae									
<i>Pouteria</i> sp. 1	327	25	4,79	1,224	5,65	58,1	3,86	10,4	4,77
<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Chevalier	36	2,7	0,53	0,566	2,61	12,3	0,82	3,14	1,32
<i>Pouteria</i> sp. 2	96	7,3	1,41	0,17	0,78	26,5	1,77	2,19	1,32
<i>Pouteria bilocularis</i> (H. Winkl.) Baehni	27	2,1	0,4	0,134	0,62	8,5	0,56	1,01	0,52
<i>Manilkara paraensis</i> (Huber) Standl.	9	0,7	0,13	0,043	0,2	3,1	0,2	0,33	0,18
<i>Micropholis venulosa</i> (Mart. & Eichler) Pierre	2	0,2	0,03	0,003	0,01	0,8	0,05	0,04	0,03
Simaroubaceae									
<i>Picrolemma sprucei</i> Hook. F.	113	8,6	1,66	0,115	0,53	18,5	1,23	2,19	1,14

(Continua)

Tabela A.1 - (Continuação)

Famílias e Espécies	N	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVC	IVI (%)
<i>Simarouba amara</i> var. <i>opaca</i> Engl.	14	1,1	0,21	0,073	0,34	5,4	0,36	0,54	0,3
<i>Simaba cedron</i> Planch.	8	0,6	0,12	0,012	0,05	3,1	0,2	0,17	0,13
Solanaceae									
<i>Solanum</i> sp.	7	0,5	0,1	0,003	0,01	0,8	0,05	0,12	0,06
Urticaceae									
<i>Cecropia leucoma</i> Miq.	328	25	4,81	0,479	2,21	30,4	2,02	7,02	3,01
<i>Cecropia sciadophylla</i> Mart.	131	10	1,92	0,336	1,55	16,2	1,07	3,47	1,52
<i>Pourouma longipendula</i> Ducke	20	1,5	0,29	0,296	1,37	7,3	0,49	1,66	0,72
Verbenaceae									
<i>Aegiphila</i> sp.	109	8,3	1,6	0,045	0,21	5,8	0,38	1,8	0,73
Violaceae									
<i>Rinorea guianensis</i> Aubl.	192	14,7	2,81	0,548	2,53	36,2	2,41	5,34	2,58
<i>Rinorea flavescens</i> (Aubl.) Kuntze	55	4,2	0,81	0,046	0,21	14,2	0,95	1,02	0,66
<i>Paypayrola grandiflora</i> Tul.	11	0,8	0,16	0,012	0,05	4,2	0,28	0,22	0,17
Vochysiaceae									
<i>Erisma uncinatum</i> Warm.	3	0,2	0,04	0,137	0,63	1,2	0,08	0,68	0,25
<i>Vochysia maxima</i> Ducke	3	0,2	0,04	0,107	0,49	1,2	0,08	0,54	0,2
<i>Vochysia haenkeana</i> Mart.	2	0,2	0,03	0,009	0,04	0,8	0,05	0,07	0,04
<i>Vochysia surinamensis</i> Stafleu	1	0,1	0,01	0,016	0,07	0,4	0,03	0,09	0,04
Indeterminadas									
Quataquisala*	109	8,3	1,6	0,55	2,54	26,5	1,77	4,14	1,97
Não identificada	3	0,2	0,04	0,007	0,03	1,2	0,08	0,08	0,05
Totais	6821	521	100	21,67	100	1503	100	200	100

(*) **Indivíduos identificados apenas pelo nome comum.**