



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.10.18.10-TDI

**DISCRIMINAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA
NA REGIÃO AMAZÔNICA A PARTIR DE
INFORMAÇÃO POLARIMÉTRICA ALOS/PALSAR E
COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA DA MISSÃO
TANDEM-X**

Évelyn Marcia Pôssa

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Fábio Furlan Gama, e
João Roberto dos Santos, aprovada
em 12 de fevereiro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L65BH8>>

INPE
São José dos Campos
2016

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@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.10.18.10-TDI

**DISCRIMINAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA
NA REGIÃO AMAZÔNICA A PARTIR DE
INFORMAÇÃO POLARIMÉTRICA ALOS/PALSAR E
COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA DA MISSÃO
TANDEM-X**

Évelyn Marcia Pôssa

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Fábio Furlan Gama, e
João Roberto dos Santos, aprovada
em 12 de fevereiro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L65BH8>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pôssa, Évelyn Marcia.

P843d Discriminação de uso e cobertura da Terra na região Amazônica a partir de informação polarimétrica ALOS/PALSAR e coerência interferométrica da missão TanDEM-X / Évelyn Marcia Pôssa. – São José dos Campos : INPE, 2016.
xxiv + 99 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.10.18.10-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadores : Drs. Fábio Furlan Gama, e João Roberto dos Santos.

1. Sensoriamento remoto. 2. Uso e cobertura da Terra. 3. Dados SAR. 4. Polarimetria. 5. Coerência interferométrica. I.Título.

CDU 528.711.7:332.3(811)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Évelyn Marcia Póssa**

Título: " DISCRIMINAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA NA REGIÃO AMAZÔNICA A PARTIR DE INFORMAÇÃO POLARIMÉTRICA ALOS/PALSAR E COERÊNCIA INTERFEROMÉTRICA DA MISSÃO TANDEM-X".

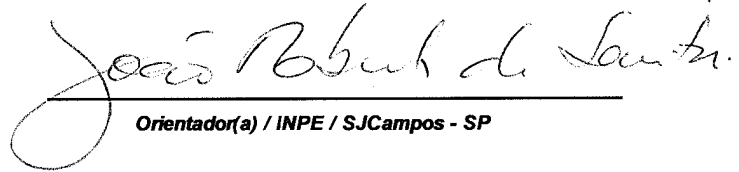
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Fábio Furlan Gama



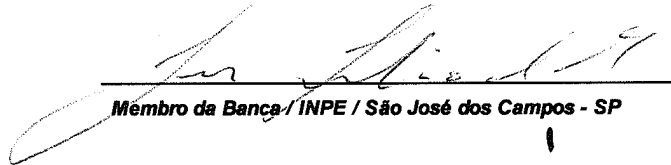
Presidente / Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. João Roberto dos Santos



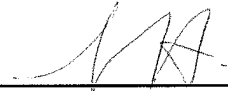
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Claudio Mura



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

Dra. Luciana Spinelli Araujo



Convidado(a) / EMBRAPA / Campinas - SP

Dr. Philippe Maillard



Convidado(a) / UFMG / Minas Gerais - MG

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 12 de Fevereiro de 2016

"É porque se integra - na medida em que se relaciona, e não apenas se acomoda - que o homem cria, recria e decide."

"Pensar certo significa procurar descobrir e entender o que se acha mais escondido nas coisas e nos fatos que nós observamos e analisamos."

"E uma das condições necessárias a pensar certo é não estarmos demasiado certos de nossas certezas."

Paulo Freire

A meus amados pais, José e Elizandra

A meu irmão Bruno

Ao Humberto

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha gratidão pela dádiva da vida, pela força e iluminação no enfrentamento dos desafios.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, pela logística, aos pesquisadores e servidores pelo apoio na realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado e apoio financeiro para o trabalho de campo.

Agradeço aos Doutores Fábio Furlan e João Roberto por possibilitarem junto ao INPE a realização de meu mestrado, etapa de grande aperfeiçoamento científico e diversos aprendizados.

Ao ICMBio, por autorizar a execução de atividade científica na Floresta Nacional do Tapajós (Processo 38157-5) e à equipe da base do Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia- LBA/Santarém pelo suporte para execução do trabalho de campo. Agradeço ao Peú que nos norteou em meio a Grande Floresta.

Ao *Alaska Satellite Facility* pela concessão dos dados PALSAR/ALOS.

À doutora Polyanna Bispo que junto à Agência Espacial Alemã (*Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt - DLR*) concedeu as imagens da missão TanDEM-X/TerraSAR-X dentro da proposta *Structural analysis of central Amazon forest using TANDEM-X (XTI_VEGE3408)*.

Aos Doutores José Claudio Mura e Sidnei João S. Sant'Anna, sou grata pela paciência e presteza com que esclareceram minhas dúvidas.

À Doutora Silvia Ventrini (UFSJ), pelos ensinamentos acadêmicos e atenção de sempre, auxiliando-me profissionalmente com grande generosidade. Agradeço ainda o incentivo à continuidade no meio acadêmico.

A meus pais, agradeço por todos os ensinamentos que vocês construíram em mim, sobretudo, a fé em si e em Deus. Grata pelo amor profundo, porto seguro que tudo acalma. Agradeço a constante participação em minha vida, em especial nesta etapa que se finda. Agradeço ao meu irmão Bruno, pelo carinho e torcida. E ao restante da minha família que acompanha os meus caminhos com pensamentos de bem querer.

Ao Humberto, que nesses dois anos, mesmo distante, esforçou-se para manter-se participativo em minha vida, marcando presença com seu bom humor e carinho, motivando-me e doando seus ouvidos nos momentos de pouca fé.

Aos amigos Maria Falcão, Eunice e Sr. João agradeço o carinho, o acolhimento, as histórias e as boas gargalhadas que adoçaram a rotina joseense. Carregarei os bons momentos na memória.

A todos da turma de pós-graduação em Sensoriamento Remoto de 2014, pela solicitude e pelos bons momentos de descontração. À Bruna Neves, João Pompeu e Heloísa agradeço a partilha de conhecimentos, a vivência amigável e as enriquecedoras conversas. Agradeço às meninas da república mansão que me acolheram afavelmente e imediatamente.

RESUMO

A conversão indiscriminada de florestas tropicais em outras tipologias de cobertura tem impacto na dinâmica climática, hidrológica e dos ciclos biogeoquímicos. No cenário brasileiro, o desflorestamento amazônico motiva pesquisadores adotarem novos produtos de sensoriamento remoto e desenvolverem novas metodologias de extração de informação para o aprimoramento da identificação das forçantes antrópicas de mudanças do meio ambiente. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de dado polarimétrico PALSAR integrado à imagem de coerência interferométrica da missão TanDEM-X para discriminação de classes de uso e cobertura da terra de uma região na Amazônia brasileira. Dados coletados em campo foram empregados como conjunto amostral de referência para treinamento do algoritmo classificador e validação dos resultados. Atributos polarimétricos extraídos a partir de retroespalhamento (sigma zero e índices Pope) e de informação de fase (teoremas de decomposições de alvos de Cloude-Pottier, Touzi, Freeman-Durden e Yamaguchi) resultaram em seis grupos de atributos que foram classificados individualmente e associados à coerência interferométrica utilizando o algoritmo MAXVER-ICM. Um sétimo grupo de atributos foi formado por meio de procedimentos de seleção de atributos que incluíram: análise exploratória da sensibilidade frente às classes temáticas; ordenamento (*ranking*) segundo a importância com relação às classes; análise de correlação; e melhores combinações de atributos. A análise exploratória indicou que os atributos de maior potencial para discriminação de sucessões florestais e das outras classes temáticas abordadas foram aqueles correlacionados à interação volumétrica. Quanto às classificações, o maior valor de *Kappa* (0,72) foi obtido a partir do grupo de atributos da decomposição de Cloude-Pottier associado à coerência interferométrica. Contudo, sem a associação da coerência este grupo obteve um *Kappa* de 0,70, portanto, não apresentando diferença estatística significativa. O grupo de atributos polarimétricos que apresentou maior melhora significativa quando associado à coerência interferométrica foi aquele composto pelos índices de Pope, resultando em melhora do desempenho discriminatório das classes referentes a corpos d'água, floresta primária e estágios de sucessão florestal secundária. Os resultados das classificações dos grupos atributos advindos das decomposições de alvos de Cloude-Pottier, Freeman-Durden e Yamaguchi apresentaram desempenho superiores, estatisticamente significantes, quando comparados aos resultados da classificação do grupo dos coeficientes de retroespalhamento (sigma zero) indicando a potencialidade destes teoremas de decomposição de alvos para estudos de uso e cobertura da terra na área de estudo.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Uso e Cobertura da Terra. Dados SAR. Polarimetria. Coerência Interferométrica. Amazônia.

LAND USE AND LAND COVER DISCRIMINATION ON AMAZON REGION FROM ALOS/PALSAR POLARIMETRIC INFORMATION AND TANDEM-X INTERFEROMETRIC COHERENCE

ABSTRACT

The indiscriminate conversion of the tropical forests into other kind of land cover has an impact on the climate dynamics, hydrological and biogeochemical cycles. In the Brazilian scenario, the Amazon deforestation motivates researchers to use new remote sensing products and to develop new information extraction methodologies, to improve the identification of anthropogenic forcings of environmental changes. In this context, this work aimed to access the integration of PALSAR polarimetric data and TANDEM-X interferometric coherence images for land use and land cover classes discrimination in a Brazilian Amazon region. Fieldwork data samples were used as a reference samples for training of the classification algorithm and for validation of the results. Polarimetric attributes derived from radar backscattering (sigma zero and Pope indexes) and phase-derived information (Cloude-Pottier, Touzi, Freeman-Durden and Yamaguchi target decomposition theorems) resulted in six groups of attributes, which were individually classified, and associated with interferometric coherence using MAXVER-ICM algorithm. A seventh group of attributes was formed by feature selection procedures including: exploratory analysis of sensitivity front of the thematic classes; order (ranking) according to their importance in relation to the classes; correlation analysis; and better combinations of attributes. The exploratory analysis pointed out that the greatest potential attributes for discrimination of forest succession and other thematic classes discussed were those related to the volumetric interaction process. Regarding the classifications, the highest kappa value (0.72) was obtained from Cloude-Pottier decomposition attribute group associated with interferometric coherence. However, without the interferometric coherence association this group obtained 0.70 kappa value, therefore no significant statistical difference. The group of polarimetric attributes with the highest significant improvement when combined with interferometric coherence was that composed by Pope indexes, resulting in improved discriminatory performance of classes related to “water bodies”, “primary forest” and “secondary succession stages”. The results of the classifications of the attributes groups arising from the targets decomposition of Cloude-Pottier, Freeman-Durden and Yamaguchi showed superior performance, statistically significant, when compared to results of the group classification of the of the backscatter coefficients (sigma zero), indicating the potential of these theorems of targets decomposition for studies of land use and land cover in the study area.

Keywords: Remote Sensing. Land use and land cover. SAR data. Polarimetry. Interferometric Coherence. Amazon.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Mecanismos de espalhamento mais comuns	7
Figura 2.2 - Principais fontes de espalhamento em ambiente florestal	9
Figura 2.3 - Elipse de polarização em um plano xy para representação do campo vetor elétrico	12
Figura 2.4 - Interação da onda EM com a superfície natural.	14
Figura 2.5 - Representação de geometria de interferometria para uma única linha de base.....	22
Figura 3.1 - Localização da área de estudo, imagem PALSAR modo Fine Beam Dual ortorretificadas da Amazônia Legal (IBGE, 2010).	30
Figura 3.2 - Comportamento do padrão da antena numa faixa homogênea de floresta primária em área sob influência da Flona Tapajós.....	34
Figura 3.3 - (A) Imagem ALOS/PALSAR; (B) Imagem de coerência interferométrica; (C) Modelo digital de elevação - MDE/SRTM.....	36
Figura 3.4 - Precipitação acumulada diária para a estação de Belterra no mês de março de 2011.	37
Figura 3.5 - Precipitação acumulada diária para a estação de Belterra no mês de julho de 2011.....	37
Figura 3.6 - Sequência metodológica do estudo.....	41
Figura 3.7 - Distribuição espacial do conjunto amostral sobreposto à imagem PALSAR. Composição VV(R) HV(G) HH(B).	47
Figura 4.1 - Análise da redução do efeito <i>speckle</i> por meio do Coeficiente de Variação Médio para diferentes tamanhos de janela do filtro polarimétrico <i>Refined Lee</i>	53
Figura 4.2 - Análise visual da redução do efeito <i>speckle</i> para diferentes tamanhos de janela do filtro polarimétrico <i>Refined Lee</i> , na polarização HH.....	54
Figura 4.3 - Gráficos <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas no atributo ângulo alfa (α) e entropia (H) da decomposição de Cloude-Pottier.	55

Figura 4.4 - Gráfico <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas Anisotropia (A) da decomposição de Cloude-Pottier.	56
Figura 4.5 - Gráfico <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas no atributo de espalhamento volumétrico (P_v) da decomposição de Freeman-Durden.	57
Figura 4.6 - Gráficos <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos de espalhamento <i>double-bounce</i> (P_d) e espalhamento superficial (P_s), respectivamente, gerados a partir da decomposição de Freeman-Durden.	58
Figura 4.7 - Corpo d'água com margem vegetada.	59
Figura 4.8 - Gráficos <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos de espalhamento volumétrico (Y_v) e espalhamento superficial (Y_s) da decomposição de Yamaguchi.	60
Figura 4.9 - Gráfico <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos magnitude do tipo de espalhamento médio (α_s) e magnitude do tipo de espalhamento do primeiro autovetor (α_1).	61
Figura 4.10 - Gráficos <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas no atributo magnitude do tipo de espalhamento do segundo autovetor (α_2).	62
Figura 4.11 - Gráficos <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos σ_{VV0} e σ_{HV0}	63
Figura 4.12 - Gráficos <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas no atributo σ_{HH0}	63
Figura 4.13 - Gráfico <i>Boxplot</i> representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos BMI e VSI.	64
Figura 4.14 - Valores de coerência média para cada classe temática.	65
Figura 4.15 - <i>Ranking</i> segunda a importância dos atributos considerando as classes.	66

Figura 4.16 - Espaço de atributos extraídos da decomposição de Cloude-Pottier para as classes de uso e cobertura estudadas.	71
Figura 4.17 - Mapa de Uso e Cobertura da área de estudo elaborado a partir da classificação de atributos Cloude-Pottier α , A e H da decomposição de Cloude-Pottier.	74
Figura 4.18 - Espaço de atributos das imagens índice de vegetação (BMI, VSI e VSI) para as classes de uso e cobertura estudadas.	77
Figura 4.19 - Espaço de atributos do subconjunto 2 para as classes de uso e cobertura estudadas.	78
Figura A.1 - Gráficos <i>boxplots</i> dos atributos com baixo potencial discriminatório.	93

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Principais interações com componentes florestais.	10
Tabela 3.1 - Características da imagem PALSAR	33
Tabela 3.2 - Calibrações radiométricas e polarimétricas realizadas aos dados PALSAR- PLR.....	33
Tabela 3.3 - Características das imagens TerraSAR-X e TanDEM-X.....	35
Tabela 3.4 - Descrição e agrupamento de classes identificadas em campo. Imagem PALSAR HH(R) HV(G) VV(B).	39
Tabela 3.5 - Atributos gerados a partir de decomposição de alvos de Cloude-Pottier, Freeman-Durden, Yamaguichi e Touzi, com respectiva descrição desses descritores polarimétricos.	44
Tabela 3.6 - Número de pixels para cada classe.....	46
Tabela 3.7 - Entrada de dados das classificações realizadas no estudo.....	49
Tabela 4.1 - Valores médios de BMI para os diferentes estágios sucessionais.....	64
Tabela 4.2 - Matriz de correlação dos 18 atributos pré-selecionados.	67
Tabela 4.3 - Valores de Kappa para as melhores soluções de subconjuntos.....	68
Tabela 4.4 - Valores de <i>Kappa</i> das classificações.....	69
Tabela 4.5 - Teste Z aplicado aos valores de <i>Kappa</i> das classificações realizadas.....	70
Tabela 4.6. Matriz de confusão dos atributos da Decomposição de Cloude-Pottier.....	72
Tabela 4.7 - Matriz de confusão dos atributos da Decomposição de Cloude-Pottier combinada à Coerência Interferométrica	73
Tabela 4.8 - Matriz de confusão da classificação do conjunto das imagens-índice BMI, VSI e CSI	76
Tabela 4.9 - Matriz de confusão da classificação do conjunto das imagens-índice BMI, VSI e CSI combinado à coerência.....	76
Tabela 4.10 - Matriz de confusão da classificação do subconjunto ótimo.....	79
Tabela 4.11 - Porcentagem de acertos de cada classe temática em cada conjunto de atributos.....	80

Tabela B.1 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Freeman-Durden	97
Tabela B.2 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Freeman-Durden integrado à coerência interferométrica	97
Tabela B.3 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Yamaguchi	98
Tabela B.4 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Yamaguchi integrado à coerência interferométrica.	98
Tabela B.5 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Touzi.	98
Tabela B.6 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Touzi integrado à coerência interferométrica.	99
Tabela B.7 - Matriz de confusão da classificação do grupo dos coeficientes de retroespalhamento σ_{HH} , $\sigma_{HV}VH$ e σ_{VV}	99
Tabela B.8 - Matriz de confusão da classificação do grupo dos coeficientes de retroespalhamento σ_{HH} , $\sigma_{HV}VH$ e σ_{VV} integrado à coerência interferométrica.	99

LISTA DE SÍMBOLOS

γ - Coerência interferométrica

A - Anisotropia de Cloude-Pottier

H - Entropia de Cloude-Pottier

α - Ângulo alfa médio de Cloude-Pottier

P_d - Componente de espalhamento *double-bounce* de Freeman-Durden

P_s - Componente de espalhamento superficial de Freeman-Durden

P_v - Componente de espalhamento volumétrico de Freeman-Durden

Y_d - Componente de espalhamento *double-bounce* de Yamaguchi

Y_s - Componente de espalhamento superficial de Yamaguchi

Y_v - Componente de espalhamento volumétrico de Yamaguchi

Y_H - Componente de espalhamento do tipo hélice de Yamaguchi

α_s - Magnitude média do espalhamento de Touzi

α_{s1} - Magnitude de Touzi do primeiro autovetor

α_{s2} - Magnitude de Touzi do segundo autovetor

α_{s3} - Magnitude de Touzi do terceiro autovetor

Φ_n - Fase do tipo de espalhamento de Touzi

Φ_1 - Fase do tipo de espalhamento de Touzi do primeiro autovetor

Φ_2 - Fase do tipo de espalhamento de Touzi do segundo autovetor

Φ_3 - Fase do tipo de espalhamento de Touzi do terceiro autovetor

τ_s - Helicidade média de Touzi

τ_{s1} - Helicidade de Touzi do primeiro autovetor

τ_{s2} - Helicidade de Touzi do segundo autovetor

τ_{s3} - Helicidade de Touzi do terceiro autovetor

Ψ_s - Ângulo de orientação médio de Touzi

Ψ_{s1} - Ângulo de orientação de Touzi do primeiro autovetor

Ψ_{s2} - Ângulo de orientação de Touzi do segundo autovetor

Ψ_{s3} - Ângulo de orientação de Touzi do terceiro autovetor

σ^0 - Coeficiente de retroespalhamento (sigma zero) de um alvo distribuido

σ_{HH}° - Coeficiente de retroespalhamento na polarização HH

$\sigma_{HV\text{VH}}^{\circ}$ - Média entre os coeficientes de retroespalhamento HV e VH.

σ_{VV}° - Coeficiente de retroespalhamento na polarização VV

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Fundamentos de Sensoriamento Remoto por RADAR.....	5
2.2. Tipos de Interação com Alvos.....	6
2.3. Princípios de Polarimetria	10
2.3.1. Onda eletromagnética e representação do campo elétrico	11
2.3.2. Representação do dado polarimétrico	13
2.4. Decomposição de Alvos.....	16
2.5. Coeficiente de Retroespalhamento e Índices Pope	20
2.6. Coerência Interferométrica.....	22
2.7. Classificação	25
3 METODOLOGIA	29
3.1. Área de Estudo	29
3.2. Base de Dados	32
3.2.1. Dados SAR.....	32
3.2.2. Dados de Campo	38
3.2.3. Dados Auxiliares e Aferição Temporal	40
3.3. Processamento e Análise.....	41
3.3.1. Pré-Processamento	41
3.3.2. Seleção de Amostras	45
3.4. Seleção de Atributos	47
3.5. Classificação, Validação e Análise Comparativa.....	49
4 RESULTADOS	53
4.1. Tamanho da Janela de Filtragem.....	53
4.2. Sensibilidade dos Atributos Polarimétricos e da Coerência Interferométrica Frente às Classes de Uso e Cobertura.....	54
4.3. Subconjunto Ótimo Selecionado.....	65

4.4. Resultados e Avaliações das Classificações	68
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICE A - <i>BOXPLOTS</i> DOS ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS	93
APÊNDICE B - MATRIZES DE CONFUSÃO DAS CLASSIFICAÇÕES	97

1 INTRODUÇÃO

Embora a atuação humana na superfície terrestre seja marcada pela modificação do espaço, a recente dinamização do uso da terra tem conduzido mudanças nos ecossistemas, como alteração do clima, dos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos, supressão e fragmentação de *habitats*, dentre outros impactos negativos que podem atingir tanto as escalas local e regional, quanto global.

Estudos que retratam os modos de uso e cobertura da terra configuram-se como subsídios elementares para a construção de indicadores de avaliação da capacidade de suporte ambiental, permitindo a identificação de alternativas promotoras da sustentabilidade do desenvolvimento, direcionamento de tomadas de decisão e formulação de políticas (IBGE, 2006). Além disso, muitos modelos usados para a representação de sistemas ambientais nas interfaces atmosfera/biosfera/solo demandam parametrização do tipo de uso e cobertura da terra em escalas compatíveis com os processos envolvidos (DOBSON, 1996).

Apesar dos termos uso e cobertura serem empregados juntos, eles possuem significados distintos, cujo esclarecimento facilita a integração e interoperabilidade entre dados. De acordo com Lambin et al., (2000), a cobertura da terra refere-se ao estado físico e biológico da superfície terrestre e seu subsolo imediato. O uso da terra refere-se ao processo de modificação ou conversão da cobertura da terra (LAMBIN et al., 2000), com alteração de processos da superfície, incluindo biogeoquímica, hidrologia e biodiversidade. Envolve ainda, os efeitos sociais e econômicos e as características dos contextos em que o território é gerenciado.

Os métodos para análise do uso e cobertura da superfície terrestre incluem sensoriamento remoto, análise geoespacial, modelagem, juntamente com métodos interdisciplinares científicos para investigar as causas e consequências das mudanças na paisagem em uma gama de escalas espaciais e temporais (ELLIS, 2013; FREITAS et al., 2013). Enquanto cobertura da terra pode ser observada diretamente em levantamentos de campo ou por sensoriamento remoto (ARAUJO FILHO et al., 2007), informações sobre o uso demandam a integração de métodos

das ciências naturais e sociais, para identificação das atividades humanas ocorrentes nas paisagens (ELLIS, 2013).

De acordo com o *Relatório de Síntese Técnica: Estudo de Baixo Carbono para o Brasil* do Banco Mundial (2010), o Brasil foi um dos maiores emissores de dióxido de carbono (CO₂) em 2010, em razão das intensas mudanças no uso e cobertura da terra. A conversão de florestas tropicais em áreas agrícolas e pastagens, sobretudo na Amazônia Legal, foi um dos principais contribuintes para o aumento das emissões de gases do efeito estufa no cenário nacional.

Um estudo realizado pelo Instituto de Economia Aplicada - IPEA indica que a intensificação da conversão das florestas na Amazônia Legal está associada ao crescimento da produção de grãos e de bovinos, colocando a região como a principal frente de expansão das atividades agropecuárias brasileiras (IPEA, 2013). Apesar da Floresta Amazônica constituir um reservatório de cerca de 47 bilhões de toneladas de carbono e sequestrar um grande volume de CO₂ emitido globalmente a cada ano, sob a lógica do produtor e do modelo de desenvolvimento vigente na região, a conversão da floresta para a realização de atividades agropecuárias, de mineração, madeireiras, entre outras são mais rentáveis do que o uso sustentável da floresta (MMA, 2008).

O controle das alterações indiscriminadas no ambiente amazônico tornou-se um grande desafio para o país (BANCO MUNDIAL, 2010). Frente à extensão da Floresta Amazônica brasileira, o sensoriamento remoto configura-se como importante ferramenta para subsidiar ações de planejamento, políticas de controle e fiscalização da ocupação, bem como fornece dados fundamentais para estudos da região.

Atualmente os sensores remotos ópticos têm sido amplamente utilizados no monitoramento desta região, mas como geralmente as áreas tropicais apresentam alta nebulosidade, a utilização contínua de imagens no espectro óptico é prejudicada (VAN DER SANDEM, 1997). Por conseguinte, imagens de sensores que operam na região do espectro das micro-ondas representam uma alternativa na aquisição contínua de informações acerca do domínio Amazônico por serem pouco afetadas pela cobertura de nuvens.

Dentre as características consideradas relevantes dos sensores de *Radio Detection and Ranging* (RADAR) para aquisição de dados em ambiente tropical, destacam-se: a baixa sensibilidade à nebulosidade, permitindo mapeamento em condições meteorológicas adversas; controle do ângulo de iluminação e visada, flexibilizando a geometria de aquisição de dados e permitindo a visualização de diferentes perspectivas do terreno; a geração de imagens em diferentes canais de polarização; e a independência das condições de iluminação (BALTZER, 2001).

Atualmente, está disponível uma gama de dados provenientes de diversos sensores radar orbitais (radar de abertura sintética, *Synthetic Aperture Radar* - SAR), dentre eles aqueles obtidos pelo radar *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) a bordo da série de satélites *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS 1 e 2). Os satélites da série ALOS foram desenvolvidos para fomentar pesquisas científicas relacionadas ao monitoramento de desastres, análise de recursos naturais e de cobertura da terra. Dentre as qualidades oferecidas pelo sistema está a possibilidade de aplicação de técnicas polarimétricas como a decomposição de alvos, que auxilia no reconhecimento de padrões de uso e cobertura da superfície.

Em 2010, o Centro Aeroespacial Alemão (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* - DLR) iniciou a missão denominada *TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements* (TanDEM-X), que utiliza os satélites TerraSAR-X (TSX-1) e TanDEM-X (TDX-1) em imageamento sequencial, gerando imagens de um mesmo ponto do terreno com geometria ligeiramente diferente (DLR, 2010). Tal missão tem como objetivo principal a criação de um modelo de elevação digital global com resolução de 10 metros. Além disso, fornece uma plataforma configurável de interferometria para testar novas técnicas e aplicações. Entre os produtos interferométricos, cita-se a coerência interferométrica que indica o grau de correlação das zonas da superfície imageada.

Com o avanço das tecnologias dos sistemas imageadores por radar, diversas metodologias tem sido testadas para caracterização do uso e cobertura da terra. Dentro desse contexto, este trabalho tem em seu escopo a análise do potencial de atributos polarimétricos PALSAR isolados e integrados à informação de coerência

interferométrica da missão TanDEM-X para a discriminação de classes de uso e cobertura no domínio Amazônico.

1.1. Objetivos

O objetivo geral do trabalho é avaliar a potencialidade de atributos polarimétricos baseados em medidas de potência e informação de fase de imagens PALSAR integrados ao dado de coerência interferométrica da missão TanDEM-X para caracterização de uso e cobertura da terra no domínio Amazônico. Para o cumprimento deste objetivo geral, foi necessário especificamente:

- Extrair atributos polarimétricos baseados em medida de fase de dados PALSAR por meio da decomposição de alvos (Cloude-Pottier, Touzi, Freeman-Durden e Yamaguchi) e do cálculo dos coeficientes de retroespalhamento e índices de Pope;
- Avaliar a sensibilidade dos atributos polarimétricos frente às classes temáticas por meio de análise estatística exploratória;
- Integrar a variável coerência interferométrica derivada da missão TanDEM-X aos atributos polarimétricos PALSAR no processo de classificação para avaliar a contribuição desta integração para o mapeamento temático;
- Avaliar e comparar os desempenhos dos mapeamentos gerados a partir dos grupos de atributos polarimétricos integrados e não integrados à coerência interferométrica, com auxílio de dados de campo por meio de análise estatística;
- Elaborar um mapa de uso e cobertura da terra com o grupo de atributos de melhor desempenho na discriminação temática da área de estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fundamentos de Sensoriamento Remoto por RADAR

Sistemas de imageamento por radar operam emitindo pulsos de micro-ondas em intervalos regulares para superfície e registrando o sinal de retorno, seja por meio da mesma antena emissora (sistemas monoestáticos) ou por uma segunda antena (sistemas biestáticos) (LEWIS; HENDERSON, 1998). A energia na região das micro-ondas apresenta comprimentos de onda que variam de 1 mm a 1 m e as bandas de radar mais utilizadas em investigações de sensoriamento remoto são a X (~ 3 cm), C (~ 5,6 cm), L (~ 23 cm) e a banda P (~ 72 cm) (RANEY, 1998).

As ondas eletromagnéticas transversais, por meio das quais os radares imageiam a superfície, possuem um parâmetro que descreve a direção em que as oscilações estão ocorrendo, denominado polarização. As direções de oscilação registradas pelo sistema SAR, considerando o plano da superfície terrestre, podem ser horizontais (H) e verticais (V), compondo assim as configurações de canais de polarização radar HH, HV, VH e VV (WOODHOUSE, 2006).

Ao interagirem com a superfície, o sinal emitido pelo radar tem seus atributos modificados. Os atributos do sinal retroespalhado dependem tanto de atributos do sistema sensor (comprimento de onda (λ), ângulo de incidência (θ_i) e polarização), quanto de atributos da superfície iluminada, como: topografia, ângulo de incidência local (θ_{loc}), geometria e propriedade dielétrica dos espalhadores (ULABY, et al. 1981; LEE; POTTIER, 2009; RICHARDS, 2009). O processamento do sinal de retorno permite a geração de uma matriz de pixels, que informam sobre a refletividade do terreno iluminado, a partir dos sinais de eco de cada espalhador contido dentro de um elemento de resolução iluminado pelo sistema radar (LEE; POTTIER, 2009).

O sinal de retorno num sistema SAR é quantizado na forma de um número complexo, em que a parte real é representada pela componente em fase (In Phase - I) e a parte imaginária é representada pela componente em quadratura de fase (Quadrature - Q) (RANEY, 1998). A partir destes dados pode-se gerar as imagens em amplitude (Equação 1) e intensidade (Equação 2).

$$\text{Amplitude} = A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (1)$$

$$\text{Intensidade} = A^2 = I^2 + Q^2 \quad (2)$$

O sistema SAR opera numa geometria de visada lateral com a direção de iluminação na direção perpendicular à linha de voo. A direção de voo é referida como direção de azimute e o eixo ortogonal à direção de azimute é denominado direção de alcance (range). A região do terreno iluminado mais próxima ao sensor é chamada de *near range*, enquanto o ponto mais distante em relação à linha de voo atingido pelo pulso de micro-ondas é denominado de *far range* (RANEY, 1998; LEE; POTTIER, 2009). Devido às características geométricas de imageamento, dados de radar apresentam obliteração de feições por sombreamento e distorções como *layover* (inversão de relevo) e *foreshortening* (encurtamento de rampa) (RICHARDS, 2009).

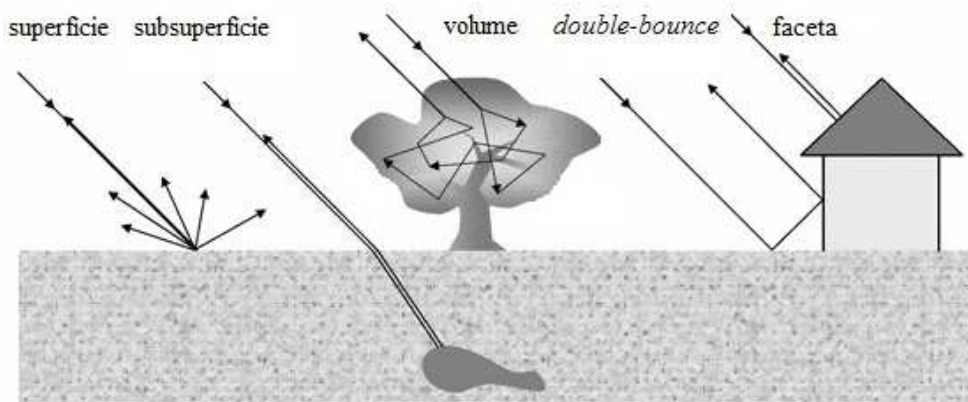
Além das distorções, as imagens de radar apresentam um aspecto granuloso que prejudicam sua interpretação e classificação digital. Este é um efeito multiplicativo denominado *Speckle* (SANT'ANNA, 1995) e surge em razão da natureza coerente das ondas utilizadas no processo de aquisição, que ao interagirem com os diversos alvos independentes no terreno, podem sofrer interferências construtivas ou destrutivas, causando bruscas variações nos níveis de cinza da cena. O *Speckle* pode ser atenuado por meio de filtragens e/ou pela técnica *Multilook* no decorrer da fase de pré-processamento.

2.2. Tipos de Interação com Alvos

A interação das micro-ondas ocorre com alvos de dimensões comparáveis ao comprimento de onda utilizado pelo radar (ULABY et al., 1984). Existem diversos mecanismos, simples e complexos, pelos quais a energia pode ser retroespalhada logo na superfície do alvo ou em seu interior, com posterior retorno e captação pelo sensor-radar. O grau de penetrabilidade da onda depende do comprimento de onda, do ângulo de incidência, polarização e das características do meio, como a umidade (RANEY, 1998). A profundidade de penetração decai em escala logarítmica com o aumento do conteúdo de umidade do alvo (WOODHOUSE, 2006).

Para a interpretação de imagens de radar é necessário considerar os principais mecanismos de espalhamento a fim de que se torne possível correlacioná-los às suas fontes produtoras. Os tipos de espalhamento mais comuns relatados na literatura são: o espalhamento superficial, o espalhamento volumétrico e o espalhamento do tipo *double-bounce*. A Figura 2.1 ilustra os três mecanismos de espalhamento supracitados e também outros dois tipos: a faceta de espalhamento, que é produzida por refletores planos orientados para frente de onda e geram um forte sinal de retorno; e o espalhamento na subsuperfície (RICHARDS, 2009).

Figura 2.1 - Mecanismos de espalhamento mais comuns



Fonte: Adaptado de Richards (2009).

O espalhamento superficial refere-se à dispersão que ocorre ainda na superfície do alvo. A intensidade deste mecanismo de espalhamento depende da rugosidade superficial e da constante dielétrica do material a partir do qual ocorre a dispersão. Quanto à rugosidade superficial, uma das aproximações de maior acurácia foi proposta por Peake e Oliver (1971) que dividiu a rugosidade em três categorias: lisa, intermediária e rugosa, adotando como base as Equações 3 e 4 (HENDERSON; LEWIS, 1998) . Uma superfície é considerada lisa quando:

$$h_{rms} > \frac{\lambda}{25 \cos \phi} \quad (3)$$

E é denominada rugosa se:

$$h_{rms} < \frac{\lambda}{25 \cos \phi} \quad (4)$$

A rugosidade pode ser analisada em microescala, mesoescala e macroescala. A microescala refere-se a uma escala centimétrica relacionada ao espalhamento por pequenos alvos como seixos, folhas etc. que situam dentro de uma célula de resolução. A quantidade de energia retroespalhada para o sensor a partir dos componentes da microescala depende do ângulo de incidência, do comprimento de onda e da altura dos objetos contidos dentro da célula de resolução. Já a mesoescala é uma função das características de rugosidade que ocorrem em um conjunto de muitas células de resolução (como um dossel florestal) e a macroescala refere-se a um conjunto maior, já sob influência topográfica e do aspecto geral do terreno (HENDERSON; LEWIS, 1998; JENSEN, 2009).

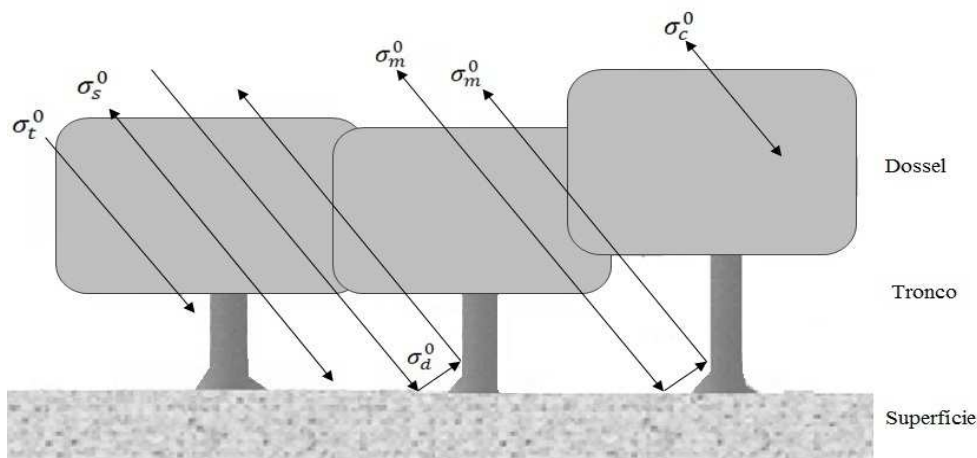
Considerando a microescala, superfícies rugosas geram fortes sinais de retorno, resultando em pixels claros na imagem. Já superfícies lisas tendem a gerar baixos sinais de retorno ao sensor, portanto regiões escuras na imagem ocorrem devido à energia incidente se dispersar com ângulo igual ao incidente, porém em direção contrária.

O espalhamento volumétrico ocorre quando a energia é espalhada a partir de uma infinidade de elementos de dispersão em um meio. Este tipo de espalhamento ocorre com frequência em áreas de floresta em que a onda sofre múltiplas dispersões gerando inversão e/ou rotação da polarização, tornando a contribuição volumétrica melhor registrada em canais de polarização cruzada (HV e VH) (RICHARDS, 2009).

O espalhamento do tipo *double-bounce* ocorre quando há uma superfície vertical adjacente a um plano horizontal, orientados diretamente para a frente de onda do radar. Este mecanismo retorna ao sensor um forte sinal, gerando pixels claros na imagem (RICHARDS, 2009). Bandas de menor comprimento de onda apresentam maior contribuição de espalhamento *double-bounce* em regiões de vegetação de pequeno porte, em algumas culturas agrícolas, em formações arbustivas, ambiente urbano etc. Nas bandas L e P o espalhamento por *double-bounce* ocorre de modo mais intenso em florestas inundáveis, podendo ocorrer em florestas de terra firme (HESS et al., 1990; HENDERSON; LEWIS, 1998).

O espalhamento das micro-ondas em ambiente florestal é complexo e pode ocorrer em três níveis (Figura 2.2): a) em nível de dossel, quando a interação ocorre com pequenos galhos e folhagem, podendo penetrar o dossel e sofrer espalhamento volumétrico ou sofrer um espalhamento superficial ainda no topo; b) em nível de grandes galhos e troncos, sofrendo *double-bounce* (tronco versus solo) ou múltiplas reflexões, e; c) em nível de superfície, quando as micro-ondas atingem diretamente o substrato florestal, estando a resposta em função da rugosidade na microescala e da umidade do substrato.

Figura 2.2 - Principais fontes de espalhamento em ambiente florestal



σ_t^0 é o espalhamento direto pelo tronco das árvores, σ_s^0 é o espalhamento direto do substrato florestal, σ_d^0 é o espalhamento por *double-bounce*, σ_m^0 refere-se ao espalhamento por múltipla reflexão entre o solo e a camada do dossel e, σ_c^0 espalhamento produzido pelos elementos do dossel florestal.

Fonte: Produção do autor.

No ambiente florestal, o parâmetro de maior influência no tipo de interação com o dossel é o comprimento de onda, sendo fontes de espalhamento elementos da vegetação com tamanhos proporcionais ao comprimento de onda (Tabela 2.1) (LE TOAN et al., 2002). Neste sentido, bandas X e C possuem baixa penetração em florestas densas, interagindo apenas com os elementos do topo do dossel (folhas e pequenos galhos), gerando maior contribuição do espalhamento superficial (WOODHOUSE, 2006). Contudo, estas bandas podem penetrar formações vegetais de menor densidade. Já as bandas L e P apresentam maior penetração em florestas, onde sofre múltiplos espalhamentos, apresentando maior contribuição do espalhamento volumétrico (LE TOAN, et al., 1992; HENDERSON; LEWIS,

1998; WOODHOUSE, 2006). Por serem mais sensíveis à estrutura florestal, as bandas L e P tem sido amplamente utilizadas para investigações florestais (VAN DER SANDEN, 1997; SAATCHI, et al. 2011).

Tabela 2.1 - Principais interações com componentes florestais.

Banda	Comprimento de onda	Fonte de retroespalhamento
X	~ 3 cm	Folhas
C	~ 5,6 cm	Folha e galhos
L	~ 23 cm	Galhos e troncos
P	~ 72 cm	Galhos e troncos

Fonte: Adaptada de Le Toan et al. (2002).

2.3. Princípios de Polarimetria

O SAR convencional opera com antenas de polarização fixa para transmissão e recepção e tem a capacidade de registrar a amplitude (relacionada à intensidade) do sinal de retorno, para uma combinação particular de polarização linear (HH, HV, VH ou VV) (HELLMAN, 2001). Este registro fornece informações sobre o brilho e textura dos alvos, mas a informação sobre o processo de espalhamento contido nas propriedades de polarização do sinal se perde em razão da natureza vetorial da onda de retorno ser ignorada.

Para que todas as informações da onda recebida sejam registradas, as propriedades (amplitude e fase) de todos os canais de polarização devem ser medidas em cada elemento de resolução. Este processo é feito por meio da medição do vetor campo elétrico da onda (HELLMANN, 2001).

Dados SAR polarimétricos podem registrar, além do brilho e textura, a informação de fase, que viabiliza a análise dos tipos de mecanismos de espalhamento contidos na cena e permite análises mais quantitativas dos alvos em estudo.

2.3.1. Onda eletromagnética e representação do campo elétrico

A onda eletromagnética (EM) constitui dos campos elétrico e magnético, situados em planos ortogonais, e apresenta propagação na direção perpendicular a estes campos através do espaço (WOODHOUSE, 2006). Uma vez que o campo magnético está diretamente relacionado ao elétrico, a onda eletromagnética pode ser descrita apenas pelo vetor do campo elétrico \vec{E} (ULABY; ELACHI, 1990; RICHARDS, 2009).

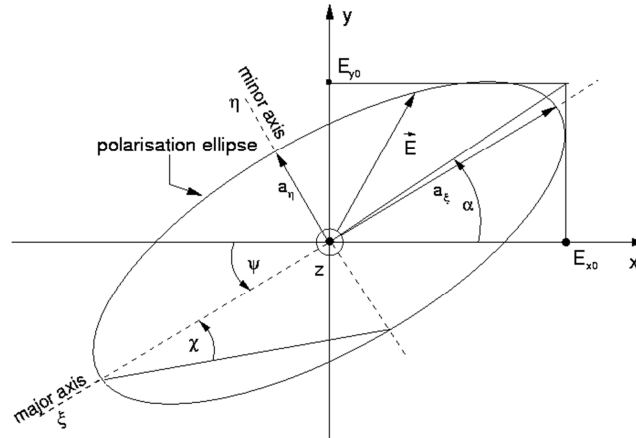
O vetor do campo elétrico pode ser decomposto nas componentes vertical \vec{E}_v e horizontal \vec{E}_h . O traço da extremidade do vetor \vec{E} num plano perpendicular à direção de propagação dá-se pela oscilação polarizada vertical e horizontal e, geralmente, descreve uma elipse, denominada onda elipticamente polarizada (HELLMANN, 2001; WOODHOUSE, 2006). Casos especiais de polarização podem ocorrer: quando as componentes \vec{E}_h e \vec{E}_v são de mesma magnitude e possuem diferença de fase de 90° , define-se uma polarização circular; quando a diferença de fase é zero ou um múltiplo de 180° , ocorre uma polarização linear, muito utilizada em sistemas SAR (ULABY; ELACHI, 1990; HELLMANN, 2001). A posição do vetor no plano de propagação é definida pela fase (ϕ).

Para análise da polarização da onda emitida e espalhada, é necessária a adoção de um sistema de coordenadas que fixará uma direção de referência de propagação. O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) convencionou dois diferentes sistemas de coordenadas: o *Forward Scatter Alignment* (FSA), que orienta o sistema de coordenadas local para a direita em relação à direção de propagação da onda; e o *Back-Scatter Alignment* (BSA), que é orientado pela antena, definindo o sistema local em relação à polarização da antena (HELLMANN, 2001; WOODHOUSE, 2006; CLOUDE, 2009).

Uma onda plana pode ser descrita por meio de vetores, como o vetor Stokes e o vetor Jones, ou por meio da elipse de polarização. A elipse de polarização possui duas propriedades que se relacionam diretamente com o estado de polarização da onda. A primeira propriedade é a elipticidade (χ) que especifica a forma da elipse e o sentido de rotação do vetor. A segunda é o ângulo de rotação (ψ) relativo à inclinação em relação à horizontal, é o ângulo formado entre o eixo maior (ξ) e o

eixo X (Figura 2.3). Estas propriedades estão relacionadas com a diferença de fase e com as amplitudes da onda (HELLMANN, 2001; WOODHOUSE, 2006; RICHARDS, 2009).

Figura 2.3 - Elipse de polarização em um plano xy para representação do campo vetor elétrico



Sendo α ângulo auxiliar, para uma onda viajando em \vec{e}_z direção; a eixo menor.

Fonte: Hellmann (2001).

Em 1852 Stokes descreveu um conjunto de quatro atributos reais e mensuráveis, capazes de caracterizar o estado de polarização de uma onda, dando origem à representação pelo vetor de Stokes, amplamente utilizado em aplicações ópticas (Equação 5).

$$I_0^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \quad (5)$$

O primeiro parâmetro (I_0) refere-se à intensidade total da onda; o segundo (Q) representa a diferença entre a intensidade da onda verticalmente e horizontalmente e expressa a quantidade de polarização vertical ou horizontal linear; o terceiro (U) e o quarto parâmetro (V) referem-se à diferença de fase entre a componente horizontal e vertical do campo elétrico e pode ser considerada como a quantidade de polarização circular da onda para a direita ou para a esquerda. O vetor de Stokes é amplamente utilizado em aplicações ópticas (HELLMANN, 2001).

Em aplicações de detecção remota por radar é mais comum a utilização do vetor de Jones, cuja representação é feita a partir de um espaço complexo bidimensional, descrito pelo vetor do campo elétrico complexo \vec{E}_{ab} , conforme a Equação 6. Nesta representação de onda plana, o vetor \vec{E}_{ab} é dado como uma

combinação linear de dois estados arbitrários ortogonais de polarização (\vec{a} , \vec{b}), ponderado por suas correspondentes amplitudes (E_a, E_b) e fases (δ_a, δ_b) (HELLMANN, 2001; LEE; POTTIER, 2009).

$$\vec{E}_{ab} = \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{b0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a0} \exp(j\delta_a) \\ E_{b0} \exp(j\delta_b) \end{bmatrix} \quad (6)$$

O vetor Jones contém as mesmas informações sobre a elipse de polarização, exceto a capacidade de representar duas ondas planas propagando em direções opostas. Para contornar esta defasagem, o vetor de Jones pode ser complementado por subscritos ("+" e "-") que diferenciam sentidos opostos (HELLMANN, 2001; RICHARDS, 2009).

2.3.2. Representação do dado polarimétrico

Após interação com o alvo, há uma transformação linear entre o vetor de onda do campo elétrico incidente E_i e o vetor do campo elétrico espalhado E_s . Esta transformação pode ser descrita por uma matriz, que contém todas as informações sobre o processo de espalhamento. A correção das influências sobre o percurso de propagação torna a matriz supracitada descritora do espalhador no terreno (HELLMANN, 2001).

As matrizes de representação de espalhadores determinísticos mais utilizadas na literatura são a matriz de espalhamento [S] e a matriz Muller [M] (HELLMANN, 2001; LEE; POTTIER, 2009; CLOUDE, 2009). Alvos determinísticos (ou coerentes) são aqueles que na interação com ondas EM, preservam a polarização da onda incidente e geram ondas perfeitamente polarizadas (ULABY; ELACHI, 1990).

A matriz [S] (chamada de matriz de Jones no sistema FSA ou matriz de Sinclair no sistema BSA) é descrita na base de polarização horizontal-vertical. Em sistemas monoestáticos, supõe-se reciprocidade do meio entre a antena receptora e o alvo (em que $S_{HV} = S_{VH}$ quando a rotação do plano de polarização, rotação de *Faraday*, não é um problema), sendo a matriz [S] simétrica (LEE; POTTIER, 2009; CLOUDE, 2009). Esta matriz é comumente utilizada para a representação

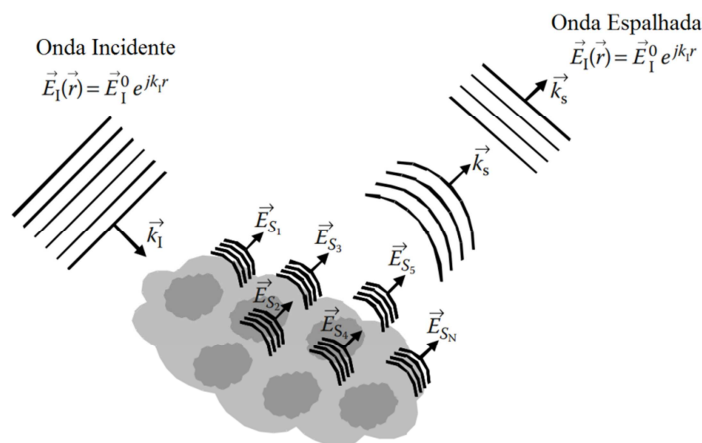
do vetor de Jones, pois relaciona o vetor da onda incidente \vec{E}^i e da onda espalhada \vec{E}^s (7) (HELLMANN, 2001).

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Já os vetores de Stokes do campo elétrico incidente \vec{g}^i e espalhado \vec{g}^s estão relacionados com a matriz de Muller [M] no sistema FSA. No sistema BSA, esta matriz é chamada de matriz de Kennaugh [K], a qual relaciona os vetores \vec{g}^i e \vec{g}^s (HELLMANN, 2001).

Para aplicações de sensoriamento remoto do ambiente por SAR, as formulações de alvos puramente determinísticos não são válidas em razão da célula de resolução ser maior do que o comprimento de onda utilizado no imageamento. Isso implica na existência de vários centros de espalhamento espacialmente distribuídos dentro da área do terreno que descreve um elemento de resolução do radar (Figura 2.4). Cada um desses centros pode ser totalmente representado por uma matriz [S]_i. A matriz [S] para uma célula de resolução consiste na superposição coerente das matrizes [S]_i de todos os centros de espalhamento localizados no interior da célula de resolução (HELLMANN, 2001; (LEE; POTTIER, 2009).

Figura 2.4 - Interação da onda EM com a superfície natural.



Fonte: Adaptado de Lee e Pottier (2009).

Nem todos os alvos imageados pelo radar são estacionários. Geralmente os alvos da superfície estão situados em um ambiente em dinâmica, sujeitos a variações

espaciais e temporais (LEE; POTTIER, 2009). Esses alvos produzem um espalhamento parcial, que torna a onda parcialmente polarizada (alvos não-determinísticos ou incoerentes) (ULABY; ELACHI, 1990). No entanto, mesmo em um ambiente em mutação, suposições relativas à estacionariedade e homogeneidade precisam ser feitas para a sua descrição. Alvos com essas características podem ser analisados de modo mais preciso através das matrizes de covariância [C] e coerência [T] (LEE; POTTIER, 2009).

A matriz [C] é definida como o valor esperado do produto do vetor de espalhamento e seu complexo conjugado transposto, em que teremos uma matriz 4x4 (8) (RICHARDS, 2009):

$$C = E\langle kk^{*T} \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{HV}S_{HH}^* \rangle & \langle |S_{HV}|^2 \rangle & \langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HV}S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VH}S_{HH}^* \rangle & \langle S_{VH}S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VH}|^2 \rangle & \langle S_{VH}S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV}S_{HH}^* \rangle & \langle S_{VV}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{VV}S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\langle \dots \rangle$ denota média espacial de um conjunto assumindo homogeneidade de um meio de espalhamento aleatório. Os elementos da diagonal da matriz [C] representam a intensidade do sinal.

De modo comparável, desenvolve-se a matriz [T] (Equação 9), porém a partir da matriz [S] na base vetorial de Pauli, dada pela Equação 10:

$$T = E\langle k_p k_p^{*T} \rangle \quad (9)$$

$$\vec{K}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} [(S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})(S_{HV} + S_{VH})]^T \quad (10)$$

que expande para (11):

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle K_a K_a^* \rangle & \langle K_a K_b^* \rangle & \langle K_a K_c^* \rangle & \langle K_a K_d^* \rangle \\ \langle K_b K_a^* \rangle & \langle K_b K_b^* \rangle & \langle K_b K_c^* \rangle & \langle K_b K_d^* \rangle \\ \langle K_c K_a^* \rangle & \langle K_c K_b^* \rangle & \langle K_c K_c^* \rangle & \langle K_c K_d^* \rangle \\ \langle K_d K_a^* \rangle & \langle K_d K_b^* \rangle & \langle K_d K_c^* \rangle & \langle K_d K_d^* \rangle \end{bmatrix} \quad (11)$$

Sendo $K_a = S_{HH} + S_{VV}$, $K_b = S_{HH} - S_{VV}$, $K_c = S_{HV} + S_{VH}$ e $K_d = S_{HV} - S_{VH}$, em que $S_{HH} + S_{VV}$ está associado ao mecanismo de espalhamento superficial,

$S_{HV} + S_{VH}$ relaciona-se ao mecanismo de espalhamento volumétrico e $S_{HH} - S_{VV}$ associa-se ao espalhamento do tipo *double-bounce*.

Supondo a reciprocidade, a matriz [T] é reduzida em três dimensões [T₃] sem perda de informação, devido ao o quarto elemento de Pauli não ocorrer. As matrizes [C] e [T] fornecem a intensidade total da onda, possuem os mesmos autovalores, porém apresentam diferentes autovetores (HELLMANN, 2001).

Todas as matrizes [S], [M], [C] e [T] viabilizam a análise da relação entre o vetor do campo elétrico emitido e o vetor espalhado e, por conseguinte, a informação sobre o espalhador (HELLMANN, 2001; LEE; POTTIER, 2009; CLOUDE, 2009). Estas informações sobre o processo de espalhamento podem ser extraídas por meio de técnicas estatísticas e técnicas polarimétricas, como a decomposição de alvos.

2.4. Decomposição de Alvos

Teoremas de decomposição de alvos (*Target decomposition theorems*) foram formalizados pela primeira vez por Huynen (AGRAWAL, 1988), mas têm suas origens no trabalho de Chandrasekhar Raman sobre a dispersão da luz por pequenas partículas anisotrópicas (LEE; POTTIER, 2009). A decomposição de alvos facilita a interpretação de imagens polarimétricas SAR, pois possibilita separar mecanismos de espalhamento de diferentes naturezas.

Alguns autores agruparam as abordagens de decomposição de alvos em duas principais classes: (a) decomposição coerente (matriz de Sinclair), empregada para caracterização dos estados de polarização de ondas completamente polarizadas, geradas a partir da interação com alvos determinísticos; e (b) decomposição incoerente ([M], [K] e [C]), aplicada à caracterização dos estados de polarização de ondas parcialmente polarizadas, produzidas pela interação com alvos não-determinísticos (CLOUDE, 2009). Para investigações por SAR é preferível as abordagens a partir das matrizes de [C] e [T] (HELLMAN, 2001), em que o mecanismo de espalhamento médio é tratado como uma soma de elementos independentes, que podem ser associados a um mecanismo físico (TOUZI, 2007).

No presente trabalho propõe-se a aplicação das técnicas de Decomposição de Alvos formuladas por Cloude e Pottier (1996), Freeman e Durden (1998), Yamaguchi et al. (2005) e de Touzi (2007).

A Decomposição de Cloude - Pottier é um método para a extração de atributos médios de modo invariante utilizando um algoritmo de suavização com base em estatísticas de segunda ordem e parte do pressuposto de que há sempre um mecanismo de espalhamento médio dominante em cada célula de resolução.

Três atributos sobre o espalhamento são gerados a partir da matriz [T] (ângulo alfa ($\bar{\alpha}$), entropia (H), anisotropia (A)), que, após ser decomposta, passa a ser representada pela soma de três outras matrizes [T_n], compostas por seus autovetores e ponderadas por seus relativos autovalores (Equação 12). Os autovetores relacionam-se ao espalhamento, enquanto que os autovalores indicam a contribuição de cada tipo para o espalhamento total (LEE; POTTIER, 2009; CLOUDE, 2009).

$$\langle |T_3| \rangle = \sum_{i=1}^3 [T_{3i}] = \lambda_1(e_1 e_1^{*T}) + \lambda_2(e_2 e_2^{*T}) + \lambda_3(e_3 e_3^{*T}) \quad (12)$$

sendo λ_i os autovalores e e_i autovetores da matriz [T].

A entropia (H) é representada por uma medida escalar ($0 \leq H \leq 0$) e indica o grau de aleatoriedade da distribuição dos mecanismos de espalhamento. Um valor de entropia baixo ($H \cong 0$) é um indicativo de que há apenas um mecanismo de espalhamento dominante, enquanto uma alta entropia ($H \cong 1$) indica que não há um tipo de espalhamento dominante (LEE; POTTIER, 2009; CLOUDE, 2009) (Equação 13).

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i) \quad (13)$$

em que $p_i = \lambda_i / \sum_{k=1}^3 \lambda_k$ representa a intensidade relativa de cada processo de espalhamento i .

O ângulo alfa médio ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) possibilita a identificação do tipo de mecanismo de espalhamento, em que $\alpha = 0^\circ$ relaciona-se a um espalhamento superficial, $\alpha = 45^\circ$ ao espalhamento dipolo e $\alpha = 90^\circ$ refere-se ao espalhamento do tipo *double-bounce*. Este atributo é definido pela Equação (14):

$$\bar{\alpha} = \sum p_i \alpha_i \quad (14)$$

sendo α_i derivadas dos autovetores da matriz [T].

A anisotropia (A) indica a importância relativa dos mecanismos de espalhamento secundários (Equação 15). Este atributo produz informação complementar à entropia, quando esta apresenta valores entre o intervalo $0,5 < H < 0,7$ (LEE; POTTIER, 2009). Altos valores de A indicam que somente o segundo mecanismo de espalhamento (λ_2) apresenta importância, enquanto que baixos valores indicam que o terceiro mecanismo (λ_3) também é importante.

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (15)$$

sendo λ_2 e λ_3 os menores autovalores em ordem decrescente obtidos da matriz de coerência.

A decomposição proposta por Freeman e Durden (1998) é um modelo que trata da física do espalhamento e por isso torna a interpretação dos resultados mais simples (Equação 16). Este método modela a matriz [C] considerando o espalhamento total como uma soma das contribuições individuais dos mecanismos de espalhamento volumétrico (P_v), superficial (P_s) e do tipo *double-bounce* (P_d).

$$\langle |C_3| \rangle = \langle |C_3| \rangle_v + \langle |C_3| \rangle_s + \langle |C_3| \rangle_d \quad (16)$$

O espalhamento volumétrico é produzido a partir de múltiplos dipolos distribuídos e orientados aleatoriamente, como ocorre em copas de florestas, definido por:

$$P_v = \frac{8f_v}{3} \quad (17)$$

A contribuição do espalhamento superficial ocorre em superfícies moderadamente rugosas, em que a polarização cruzada é negligenciável, sendo:

$$P_s = f_s (1 + |\beta|^2) \quad (18).$$

A contribuição do tipo *double-bounce* é produzida por refletores de canto, ou por interações entre solo-tronco e solo-edificação (Equação 19).

$$P_s = f_d (1 + |\alpha_j|^2) \quad (19)$$

sendo, f_v , f_s e f_d a contribuição dos espalhadores derivados da matriz [C] final, α_j refere-se aos efeitos de atenuação da propagação, mudança de fase e coeficientes de reflexão, e β é razão entre os coeficientes de reflexão da onda polarizada horizontal e verticalmente.

Yamaguchi et al. (2005) propuseram uma decomposição baseado na matriz [C], que se estende pelo método de decomposição introduzido por Freeman e Durden (1998), adicionando um quarto componente, o espalhamento do tipo hélice, não abordado nos teoremas de decomposição de alvos supracitados. Neste tipo de espalhamento, as ondas apresentam estado de polarização circular (para direita ou esquerda) gerado a partir da interação com estruturas artificiais comuns em áreas urbanas, sendo assim, o espalhamento do tipo hélice desaparece em áreas com alvos naturalmente distribuídos.

Além da adição de um quarto componente, a decomposição de Yamaguchi et al. (2005) implementa uma modificação na modelagem da matriz de espalhamento volumétrico de acordo com as magnitudes relativas do retroespalhamento de $\langle |S_{HH}|^2 \rangle$ versus $\langle |S_{VV}|^2 \rangle$. Na abordagem teórica tradicional, este espalhamento é tratado como uma nuvem de dipolos aleatoriamente orientados e é modelado por meio de uma função de probabilidade uniforme para diferentes ângulos de orientação. Todavia, para áreas vegetadas, o espalhamento gerado por troncos e galhos exibe ângulo de distribuição preferencial. Para modelar esta característica foi feita uma modificação na função de probabilidade considerando a estrutura vertical dominante dos troncos das florestas e a distribuição dos ramos, conforme a Equação 20 (YAMAGUCHI et al. 2005).

$$p(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin \theta, & \text{para } 0 < \theta < \pi \\ 0, & \text{para } \pi < \theta < 2\pi \end{cases} \text{ com } \int_0^{2\pi} p(\theta) d\theta = 1 \quad (20)$$

O modelo do vetor de espalhamento baseado na projeção da matriz [S] na base de Pauli, proposto por Touzi (2007), permite uma decomposição unificada dos espalhamentos produzidos por alvos coerentes e alvos que apresentam uma

variabilidade natural significativa nas suas propriedades de dispersão (Equação 21).

$$\vec{e}_T^{SV} = m |\vec{e}_T|_m \cdot \exp^{j\phi_s} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\psi & -\sin 2\psi \\ 0 & \sin 2\psi & \cos 2\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha_s \cos 2\tau_m \\ \sin \alpha_s e^{j\Phi_{\alpha_s}} \\ -j \cos \alpha_s \sin 2\tau_m \end{bmatrix} \quad (21)$$

O modelo descreve cada espalhador por meio de cinco atributos, tais como: magnitude do tipo de espalhamento (α_s); fase do tipo de espalhamento (Φ); helicidade (τ_m), que varia de -45° e 45° e permite distinguir alvos simétricos ($\tau_m=0$) e assimétricos ($\tau = -45^\circ$ e 45° , referindo a um alvo canônico com orientação à direita ou à esquerda, respectivamente); ângulo de orientação (ψ), que é uma medida intrínseca do ângulo de inclinação do alvo em relação à linha de visada do radar; e amplitude máxima de retorno (m) (TOUZI, 2007).

As componentes α_s juntamente com a τ_m resolvem a ambiguidade inerente da informação fornecida pelo ângulo α médio da decomposição $H/A/\bar{\alpha}$ de Cloude-Pottier na descrição de espalhamentos assimétricos (TOUZI, 2007).

Além destes atributos que necessitam da informação de fase relativa das medidas polarimétricas, também denominados atributos coerentes, existem os atributos incoerentes, extraídos diretamente da diversidade de polarização dos dados sobre as medidas da intensidade de cada pixel (BOERNER et al., 1998). Dentre os atributos incoerentes estão: o coeficiente de retroespalhamento (VAN DER SANDEN, 1997; WOODHOUSE, 2006; RICHARDS, 2009) e os índices desenvolvidos por Pope et al. (1994).

2.5. Coeficiente de Retroespalhamento e Índices Pope

O coeficiente de retroespalhamento (relativo à seção cruzada normalizada do alvo) corresponde à porção de energia retornada ao sensor a partir da superfície independente da geometria de medida das características da área frontal do alvo, orientada para frente de onda do radar, representa uma medida em escala linear (m^2/m^2) ou escala logarítmica (dB) (VAN DER SANDEN, 1997). O coeficiente de retroespalhamento baseia-se na informação de intensidade da matriz de

espalhamento complexa. Alguns atributos SAR são baseados no coeficiente de retroespalhamento, como os Índices de Pope.

Com a finalidade de otimizar a análise de ambientes florestais e desenvolver uma hierarquia de classificação de paisagem de uma região tropical por meio de dado SAR polarimétrico, Pope et al. (1994) desenvolveram alguns índices biofísicos relacionados às características da estrutura florestal, discutidos abaixo.

O Índice de Biomassa (*Biomass Index* - BMI) associa-se à biomassa foliar e é um indicador indireto da biomassa dos troncos. Este índice sofre influência da umidade foliar e apresenta valores baixos para alvos em fase de senescência, descrito pela Equação 22:

$$BMI = \frac{\sigma_{HH}^0 + \sigma_{VV}^0}{2} \quad (22)$$

sendo σ^0 o coeficiente de retroespalhamento nas dadas polarizações.

O Índice de Espalhamento Volumétrico (*Volume Scattering Index* - VSI) é uma medida indireta do número e tamanho de espalhadores que provocam a despolarização do sinal de radar incidente e é dado pela Equação 23. Este tipo de interação é comum quando há a existência de múltiplos cilindros finos aleatoriamente orientados e distribuídos, como ocorre em dosséis florestais. Alto valor de VSI é reportado quando o retroespalhamento registrado na polarização cruzada é alto. A despolarização é baixa para objetos que favorecem o espalhamento superficial. Deste modo, o VSI pode ser usado como um indicador da espessura ou de densidade da copa (POPE et al., 1994).

$$VSI = \frac{\sigma_{HV}^0}{\sigma_{HV}^0 + BMI} \quad (23)$$

O Índice de estrutura do dossel (*Canopy Structure Index* - CSI) é um indicador da importância das estruturas verticais em relação às estruturas horizontais no ambiente florestal imageado. Este índice é dado por:

$$CSI = \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{HH}^0} \quad (24)$$

Em uma investigação utilizando dados do sistema AIRSAR nas bandas P, L e C de uma região de floresta tropical na América Central, Pope et al. (1994) testaram o índice VSI. Os resultados indicaram que para este índice as bandas P e L apresentaram maior desempenho na discriminação das respostas de diferentes alvos. Além disso, o VSI se mostrou mais eficiente para a área de investigação na distinção entre floresta primária e sucessão secundária, quando comparado aos outros índices desenvolvidos pelos autores.

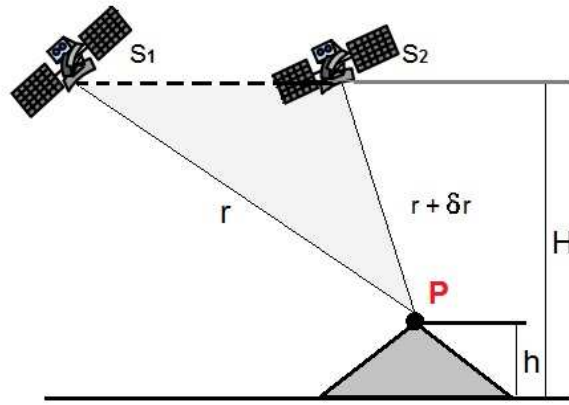
Haldar et al. (2012) aplicaram os índices de Pope a partir de dados do sensor Radarsat-2 para investigação do uso e cobertura do distrito de Jalpaiguri na Índia, numa região de cultivo de juta, cercada por plantações de chá e florestas de regiões montanhosas no extremo norte. Os resultados indicaram grande potencial do índice BMI para este fim e que combinado ao índice VSI possibilitou uma acurácia do mapeamento de 84%.

2.6. Coerência Interferométrica

Por meio do ângulo de fase do sinal retroespalhamento para um dado pixel, a fase pode ser medida. A partir da comparação entre as diferenças de fase ($\delta\phi$) de duas imagens de uma mesma região, obtidas a partir de antenas com ligeira diferença de geometria, é possível encontrar as localizações dos pixels em três dimensões: latitude, longitude e altitude, ou seus equivalentes. Tal técnica é chamada de interferometria (RICHARDS, 2009).

A linha formada pela diferença de posição entre as antenas é referida como *linha de base (baseline)* (Figura 2.5) e pode ser configurada a partir de uma plataforma contendo duas antenas ou por duas passagens de um mesmo sensor em tempos diferentes (MADSEN; ZEBKER, 1998).

Figura 2.5 - Representação de geometria de interferometria para uma única linha de base.



S1 e S2 = sensores; H = altitude da plataforma; h = altitude do relevo; e P = ponto observado por ambos os satélites.

Fonte: Produção do autor.

A diferença de fase dos sinais de retorno está relacionada à diferença nas trajetórias percorridas pelos mesmos e ao comprimento de onda utilizado (λ) e é dada pela Equação 25:

$$\delta\phi = \frac{4\pi\delta r}{\lambda} \quad (25)$$

Após as aquisições, as imagens complexas sofrem um rígido processo de correção (GENS, 1998). Para este processo uma imagem é definida como *master* (referência para o ajuste), e a outra como *slave* (imagem a ser ajustada).

A partir de processamentos interferométricos as imagens complexas podem gerar interferogramas e imagens de coerência. De modo simplificado, um interferograma é gerado por meio da multiplicação do valor de cada pixel da imagem e_p pelo complexo conjugado do seu correspondente na imagem e_m (SANTITAMNONT, 1998), conforme a Equação 26:

$$p(x, y) = e_1(x, y)e_2^*(x, y) \quad (26)$$

em que $e_1(x, y)$ e $e_2(x, y)$ referem-se aos pixels do par de imagens complexas, e * ao complexo conjugado.

Num interferograma, a fase é representada em módulo 2π , portanto, duas alturas topográficas diferentes podem apresentar mesma fase em franjas diferentes, gerando problemas de ambiguidade. Para obtenção da fase absoluta,

correspondente à topografia, aplica-se um processo denominado desdobramento da fase (*phase unwrapping*). A partir da fase absoluta, pode-se extrair modelos digitais de elevação (DEM) de alta precisão (REIGBER, 2001).

Finalmente, além da observação da topografia, processamentos interferométricos podem gerar imagens de coerência interferométrica (γ), muito úteis para fins de classificação. A coerência ou o grau de correlação é uma medida da correlação da informação complexa correspondente ao sinal de duas imagens e_n e e_m complexas (COLTELLI et al., 1996; GENS, 1998; SANTITAMNONT, 1998; PAPATHANASSIOU, 1999) e é descrita pela Equação 27:

$$\gamma = \frac{\langle |e_1 e_2^*| \rangle}{\sqrt{\langle |e_1|^2 \rangle \langle |e_2|^2 \rangle}} \quad (27)$$

em que $\langle \dots \rangle$ refere-se a uma média espacial de pixels, $*$ ao complexo conjugado, e_1 e e_2 referem-se aos pixels complexos das imagens que formam o par interferométrico.

Cada pixel de uma imagem de coerência representa a informação do módulo do coeficiente de correlação complexa de um par interferométrico. Esta informação relaciona-se ao desvio-padrão da fase interferométrica gerada a partir da interação com alvos: altos valores de coerência indicam que as fases associadas a determinados espalhadores são estáveis, diferente, por exemplo, de um espalhamento volumétrico (SILVA et al., 2009).

Em ambiente florestal, uma das fontes comuns de descorrelação é o espalhamento volumétrico, em que se pode esperar o decréscimo da coerência com o aumento da quantidade de vegetação, enquanto regiões de maior estabilidade, como vegetação esparsa e solo exposto, apresentam maior coerência.

A descorrelação pode ser também: (a) espacial, gerada pela linha de base: quanto menor for a linha de base maior será a coerência; (b) temporal: a tendência é de que quanto menor for o tempo entre as aquisições maior será a coerência (causada por efeitos ambientais, como pela alteração da orientação e/ou mudança das propriedades dielétricas do espalhador entre duas passagens); (c) topográfica e; (d) gerada por fontes de ruído, como ruídos térmicos referente ao próprio sistema sensor (LU, 1998).

Tendo em vista suas propriedades, as aplicações de imagens de coerência interferométrica para a caracterização da superfície terrestre têm sido utilizadas em alguns estudos: Luckman et al. (2000) avaliaram o potencial de imagem de coerência, adquirida por interferometria *repeat-pass*, combinada a dados SAR para estimativas de atributos biofísicos de floresta tropical amazônica. Os resultados indicaram que por meio da imagem de coerência interferométrica foi possível identificar com facilidade as áreas de desflorestamento e as áreas sob a atuação de outras atividades antrópicas. Além disso, os autores destacaram que algumas superfícies eram identificáveis na imagem coerência, todavia, não eram visíveis no dado SAR de intensidade ou em um conjunto de dados ópticos do sensor *Thematic Mapper - TM/Landsat*.

Gaboardi (2002) comparou a aplicação de informação de coerência interferométrica e um dado em amplitude, adquiridos pelo sensor ERS-1 na banda C, para mapeamento temático de uma região na Amazônia brasileira. O autor conclui que a coerência interferométrica apresentou resultados superiores à classificação da imagem intensidade e menor confusão entre classes, com índice *Kappa* superior a 0,6.

Jin et al. (2014) examinaram a coerência interferométrica para classificação de uso e cobertura de uma área no centro do estado de New York - Estados Unidos. O estudo utilizou dados PALSAR multitemporais em banda L e os resultados indicaram acréscimo na acurácia do mapeamento ao incluir a coerência interferométrica combinada ao dado de intensidade. Os autores concluíram que a coerência interferométrica foi importante para indicar o grau de alteração das superfícies na análise multitemporal.

2.7. Classificação

Uma importante aplicação de produtos de sensoriamento remoto do ambiente é o reconhecimento de padrões de uso e cobertura da terra, subsídio fundamental para análises espaciais e temporais dos processos antrópicos que ocorrem na superfície terrestre.

Denomina-se padrão um vetor de atributos que descrevem um objeto. Um conjunto de atributos pode ser tratado como eixos de um espaço de k dimensões, chamado espaço de atributos (MATHER; TSO, 2009). A classificação de imagens consiste numa análise quantitativa do espaço de atributos da imagem, com o objetivo de reconhecer padrões e estabelecer uma relação entre um objeto e um rótulo associado a uma classe (CRÓSTA, 1992; MATHER; TSO, 2009). Este objeto pode ser um único pixel, em classificações pixel a pixel, ou um conjunto de pixels adjacentes formando uma entidade geográfica, em classificações por região (MATHER; TSO, 2009).

Para classificação de dados SAR, diferentes abordagens podem ser adotadas, dentre elas: a) classificação (supervisionada ou não-supervisionada) baseada em teoremas de decomposição de alvos; b) classificação supervisionada baseada na estatística dos dados de radar; c) classificação (supervisionada ou não supervisionada) sem o uso de abordagem estatística (redes neurais, k -médias etc.); d) classificação híbrida (combina as abordagens contidas nos itens a e b). Em imagens SAR no modo amplitude ou intensidade pode-se aplicar a abordagem de classificação sem um modelo estatístico para os dados. Todavia, para tratar da natureza complexa dos dados SAR polarimétricos, descritos por matrizes [C] ou [T], são aplicadas as demais abordagens supracitadas (GARCIA CORTES, 2011).

Para este estudo será considerada a abordagem classificatória por Máxima Verossimilhança (MaxVer) integrada ao classificador contextual *Iterated Conditional Modes* (ICM) – MaxVer-ICM. A classificação por máxima verossimilhança (MAXVER) é um método supervisionado pixel a pixel que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando atributos estatísticos. Contudo, este método não leva em consideração a informação contextual, gerando resultados pobres ou não satisfatórios quando aplicados a dados de radar, em que este tipo de informação é imprescindível (CORREIA, 1998). Para adequar o desempenho do classificador MaxVer no tratamento de dados SAR, sem abandonar a teoria estatística baseada na formulação Bayesiana, incorpora-se a informação contextual, que considera a dependência espacial na classificação por meio da integração do classificador MaxVer ao algoritmo ICM (FREITAS, et al., 2007).

O algoritmo ICM tem como função refinar iterativamente uma classificação inicial, substituindo a classe de um dado pixel pela classe que maximiza a distribuição *a posteriori*, dada a influência das classes dos elementos vizinhos (FREITAS, et al., 2007). No classificador MaxVer-ICM polarimétrico (CORREIA, 1998) pode-se escolher as distribuições para modelar as classes conforme o grau de homogeneidade.

A escolha deste classificador deve-se aos bons resultados obtidos em estudos temáticos da paisagem amazônica a partir de dados SAR. O estudo de Negri (2009) utilizando dados polarimétricos do PALSAR para a caracterização de uso e cobertura numa região da Amazônia demonstrou desempenho superior do classificador MaxVer-ICM na discriminação de alvos, na comparação com o classificador *K-Médias Wishart* $H/A/\alpha$. Pereira et al. (2011) realizaram uma análise comparativa dos métodos de classificação *Support Vector Machine* (SVM) *Radial Basis Function* (RBF) e Maxver-ICM para um dado PALSAR tendo como área teste uma região situada no domínio Amazônico. Os resultados assinalaram novamente maior desempenho do classificador MaxVer-ICM com 80, 24% de exatidão global, contra 74,23% do SVM. Gomes et al. (2012) utilizaram o algoritmo Maxver-ICM para uma investigação da capacidade discriminatória de dado SAR da constelação de satélites COSMO-SkyMed (*Constellation of Small Satellites for Mediterranean*) à classes Solo Exposto, Corpo d'Água, Vegetação Arbórea e Vegetação Arbustiva na região amazônica. Nesta investigação, alcançaram-se valores de exatidão global de 64% para a imagem HH+VV.

3 METODOLOGIA

Nesta Seção estão apresentadas as informações referentes à área de estudo, à base de dados, bem como o procedimento metodológico adotado para o estudo.

3.1. Área de Estudo

A área de estudo abrange parte da Floresta Nacional do Tapajós (Flona do Tapajós) e adjacências no estado do Pará. A área está localizada na zona UTM 21M, coordenadas 721213 mE - 9665507 mS e 727742 mE - 9642508 mS, ao longo de um trecho da rodovia BR-163 Santarém-Cuiabá, como ilustrado a Figura 3.1.

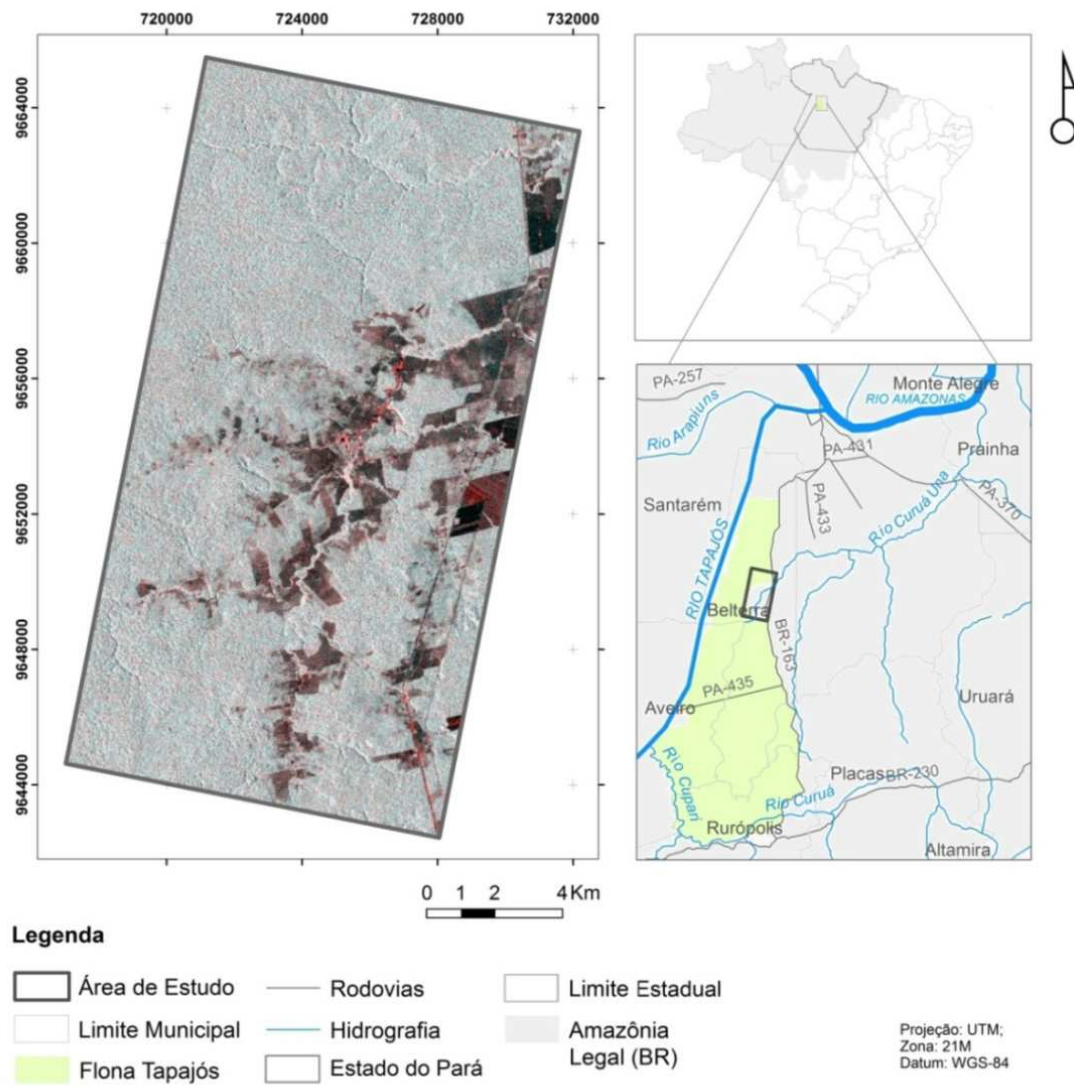
O clima na região é classificado como Clima Tropical Úmido de acordo com o sistema Köppen, com variação térmica anual inferior a 5°C. A precipitação média anual gira em torno de 2100 mm, com as maiores registros ocorrendo nos meses de dezembro a maio (IBAMA, 2004; COSTA, et al. 2007).

A unidade apresenta uma rede hidrográfica dividida entre as calhas do Rio Tapajós a oeste e a bacia do Rio Curuá-Una a leste. A geomorfologia da área de estudo pode ser caracterizada quanto à forma de erosão, forma de acumulação e tipologias de dissecação. A partir de dados do projeto Radambrasil (1976), pode-se identificar quatro unidades geomorfológicas na área: interflúvios tabulares com drenagem alta e calhas profundas, resultando em relevos com topo aplainado (It_d); superfície tabular erosiva, geralmente limitada por escarpas e/ou rebordos e unida à superfície aplainada rebaixada (Est_b); presença de colinas e ravinas, com calha de drenagem de 1ª ordem pouco profunda (Cr); e interflúvios tabulares de relevo com topo aplainado (It). A região apresenta ainda um desnível de cerca de 150 m entre o planalto e o planalto rebaixado na margem do Rio Tapajós (IBAMA, 2004).

Solos argilosos predominam na região, compreendendo latossolos amarelos distróficos, com boa condição física de retenção de umidade e permeabilidade, e podzólicos vermelho-amarelo com perfis profundos, ambos produzidos a partir do intemperismo dos folhelhos e calcários regionalmente abundantes (DAMASCENO, 2001). As áreas de podzólico encontram-se distribuídas na

região declivosa, enquanto os Latossolos recobrem as áreas de planalto e flanco, com variações de textura em função do maior ou menor teor de argila (HERNANDEZ et al., 1993). Quanto à vegetação nativa, nesta região ocorre floresta ombrófila densa e aberta (IBAMA, 2004; GONÇALVES et al., 2011).

Figura 3.1 - Localização da área de estudo, imagem PALSAR modo Fine Beam Dual ortorretificadas da Amazônia Legal (IBGE, 2010).



Composição R:VV; G: HV; B: HH.

Fonte: Produção do autor.

A década de 1970 foi o marco do início da ocupação desta região com a criação do Projeto de Integração Nacional (PIN) por meio do Decreto Lei 1.106/70 de 16 de junho de 1970, que tinha por finalidade específica financiar um plano de obras de infraestrutura na região, cuja primeira etapa seria a abertura das rodovias

Transamazônica e Cuiabá-Santarém (BRASIL, 1970). Esta lei instituiu a reserva de 10 quilômetros à esquerda e à direita das novas rodovias para colonização e reforma agrária. Este processo histórico de ocupação explica parte do quadro atual de uso da terra da área estudada. A parte central da área sob investigação, onde se situa a vila de São Jorge, apresenta-se como um mosaico de usos que expressam o sistema de produção familiar realizado em pequenas propriedades. A pastagem é o padrão mais comum identificado em campo, o que indica a importância do segmento pecuário no cenário produtivo local. Com relação à atividade agrícola, atualmente prevalecem na localidade cultivos para fins de subsistência, normalmente contínuos às áreas de moradia. A alta ocorrência de classes de sucessões florestais, próximo a vila São Jorge, é decorrente do sistema tradicional de agricultura migratória (*shifting cultivation*) praticado pelos pequenos proprietários locais. Dentre os principais produtos produzidos pela agricultura familiar local e que se destinam ao mercado destacam-se a produção de mandioca, a pimenta-do-reino, a banana e a produção de leite.

A aceleração da dinâmica do uso da terra no entorno da Flona Tapajós veio a ocorrer com a derrubada da floresta e a expansão da fronteira agrícola do Estado do Mato Grosso para o Pará, com o início da pavimentação da BR-163 e com a abertura do terminal graneleiro da Cargill em Santarém no ano de 2003. O impacto esperado desta aceleração na dinâmica difere dos sistemas de roçado da população tradicional que antes predominavam na região (IBAMA, 2004). Na porção leste da área de estudo, próximo ao traçado da BR-163, há a ocorrência de áreas de agricultura mecanizada. Nesta localidade, cultivos extensivos de milho, soja, arroz, fazem parte do panorama de produção agrícola. De acordo com o Boletim Agropecuário do Estado do Pará (PARÁ, 2015) as culturas de milho (613.546 t) e soja (506.347 t) ocupam, respectivamente, o 3º e 4º lugar em volume de produção das culturas temporárias do Estado do Pará. A expansão destas culturas tanto na região circunvizinha à Flona do Tapajós, quanto no restante do Estado, ocorre sobre áreas antropizadas antes destinadas a pastagens.

Como resultado destas dinâmicas, o entorno da Flona apresenta uma paisagem fragmentada, com frações florestais em gradientes de degradação contrastantes com a matriz de floresta primária (ARAGÃO, 2004). A antropização por meio da dominância de atividades agropecuárias gera um mosaico de áreas de pasto limpo

e sujo, bem como, áreas agrícolas (mecanizadas ou cultivos de subsistência), áreas em pousio ou abandonadas e também, áreas em processo sucessional em estágios inicial, intermediário e avançado.

A delimitação do polígono em estudo baseou-se na área comum recoberta pelos dados orbitais disponíveis, com representatividade temática dessa porção geográfica da Amazônia.

3.2. Base de Dados

3.2.1. Dados SAR

Para a elaboração desta dissertação foram utilizados dados do sensor *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR), a bordo do satélite japonês *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS-1) e uma imagem coerência gerada a partir das imagens da missão denominada *TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements* da Agência Espacial Alemã, composta pelos satélites TerraSAR-X (TSX-1) e TanDEM-X (TDX-1).

O dado PALSAR foi obtido no modo de operação *Polarimetric* (HH+HV+VV+VH - PLR). Este modo permite adquirir imagens com ângulo de incidência variando entre 8° e 30° e pode cobrir uma faixa no terreno entre 20 e 65 km. A imagem PLR utilizada possui um nível de processamento 1.1, que se refere a um dado complexo em *Slant range*, com compressão em alcance e 1 *look* em azimute. Mais atributos sobre a imagem PALSAR utilizada encontram-se explicitados na Tabela 3.1.

O modo de operação PLR do PALSAR foi calibrado e validado radiometricamente pela Agência Espacial Japonesa - JAXA utilizando 572 pontos de calibração coletados ao redor do planeta, incluindo a floresta Amazônica, também utilizada como medida de estabilidade (SHIMADA, 2009). A Tabela 3.2 lista as calibrações radiométricas e polarimétricas aplicadas aos dados adquiridos no modo PLR.

Tabela 3.1 - Características da imagem PALSAR

Atributos	Imagem ALOS/PALSAR PLR 1.1
Data da Aquisição	19/03/2011
Órbita	Ascendente
Comprimento de onda (cm)	~23,6
Ângulo de incidência	23.98
Número de Linhas	18432
Número de Colunas	1248
Resolução Radiométrica	16 bits
Resolução <i>slant range</i> (m)	9,3685
Resolução Azimute (m)	3,5878

Tabela 3.2 - Calibrações radiométricas e polarimétricas realizadas aos dados PALSAR-PLR

Calibração Radiométrica e Polarimétrica				
	Padrão da Antena	σ^0	Cross-Talk	<i>Channel Imbalance</i>
PLR	SIM	NÃO	SIM	SIM

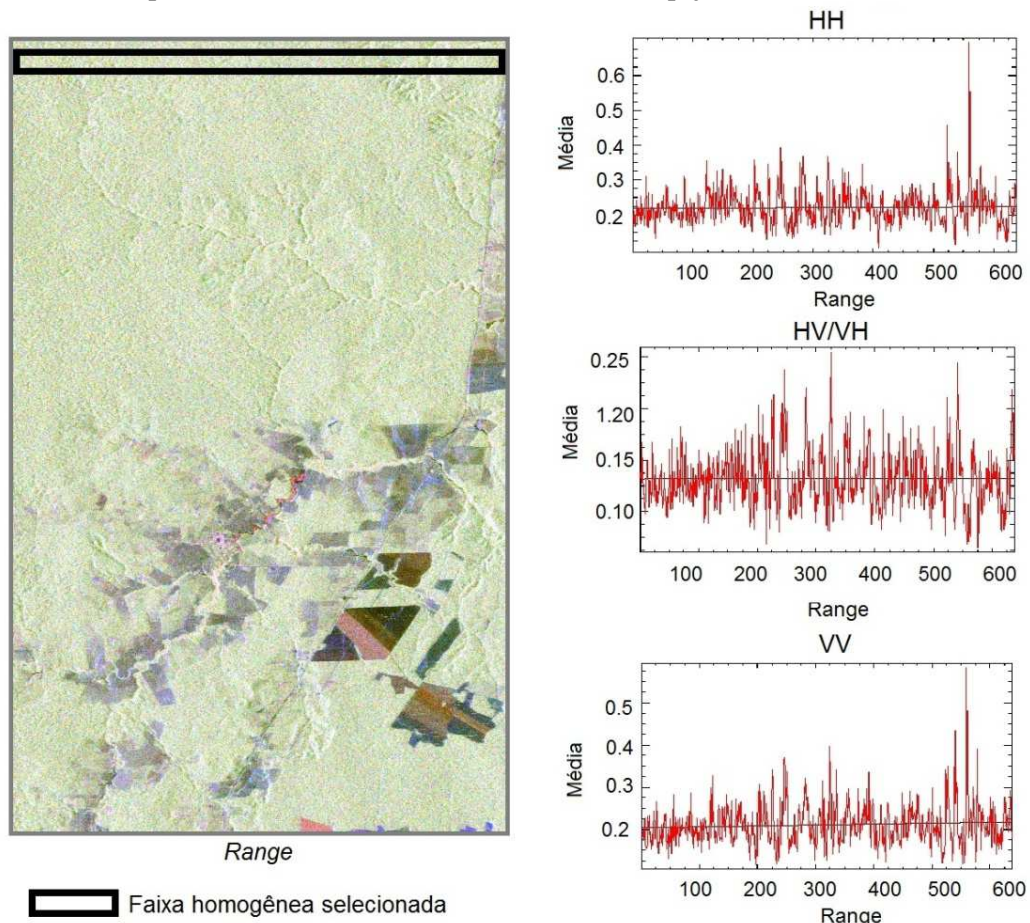
SIM = correção realizada e NÃO = não realizada.

Fonte: Adaptado de Lavallo e Wright (2009).

O *Cross-Talk* refere-se às interferências do próprio sistema sensor, que afeta as medidas do estado de polarização para uma dada configuração. *Channel Imbalance* são os desajustes de fase e amplitude entre as diferentes componentes adquiridas. O decaimento gradual de iluminação, causada pelo aumento do ângulo de incidência entre o *near range* e *far range*, é denominado efeito do padrão da antena. Este desajuste pode causar artefatos nos processos de classificação devido a alvos similares serem classificados como diferentes dependendo de sua posição na direção de *range*. Para verificação do dado PLR utilizado neste estudo na região de abrangência da área sob investigação, foi realizada uma verificação prévia às etapas de processamento que consistiu em: selecionar uma faixa constituída de alvos radiometricamente homogêneos na direção de *range* e calcular a média aritmética de cada coluna de pixels desta faixa, em cada um dos componentes de polarização em intensidade. Por meio da Figura 3.2, verifica-se que a faixa de alvos homogêneos não apresentou decaimento radiométrico ao

longo do *range*, estando este dado radiometricamente adequado com relação ao comportamento do padrão da antena, em conformidade com as avaliações de Shimada et al. (2009) e com as especificações do documento *Absolute radiometric and polarimetric calibration of Alos Palsar Products* (LAVALLE; WRIGHT, 2009).

Figura 3.2 - Comportamento do padrão da antena numa faixa homogênea de floresta primária em área sob influência da Flona Tapajós.



Fonte: Produção do autor.

A imagem de coerência interferométrica foi gerada a partir de produtos de imageamento no modo tandem, livres de efeitos atmosféricos e decorrelação temporal, adquiridos pelos satélites TSX-1 e TDX-1 que apresentam características similares. Estes dados são decorrentes da cooperação científica entre *German Aerospace Center - DLR* e o departamento de Sensoriamento Remoto do INPE por meio da *TanDEM-X proposal XTI_VEGE3408*. O processamento da coerência interferométrica foi realizado no Departamento de Processamento de Imagens do INPE. Os principais parâmetros das imagens

utilizadas para a geração da coerência interferométrica estão apresentados da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características das imagens TerraSAR-X e TanDEM-X

Atributos	TSX-1	TDX-1
Data de Aquisição	18/07/2011	18/07/2011
Órbita	Descendente	Descendente
Comprimento de Onda (cm)	~3	~3
Ângulo de Incidência (nominal)	40.5	40.5
Modo da Imagem	<i>Single look slant range complex</i>	<i>Co-registrada Single look Slant range Complex</i>
Aquisição	Biestático	Biestático
Número de Linhas	22334	22334
Número de Colunas	13120	13120
Imageamento	<i>Stripmap</i>	<i>Stripmap</i>
Polarimetria	HH	HH
Resolução <i>ground range</i> (m)	1.08	1.08
Resolução Azimute (m)	6.59	6.59

Inicialmente, as imagens complexas TSX-1 e TDX-1 foram registradas em nível de subpixel. Este tipo de registro consiste na justaposição de uma imagem de ajuste (*slave*) em relação a uma imagem de referência (*master*), com erros espaciais inferiores ao tamanho do pixel, de modo que cada pixel, em ambas as imagens, representem a mesma região no terreno (GABOARDI, 2002).

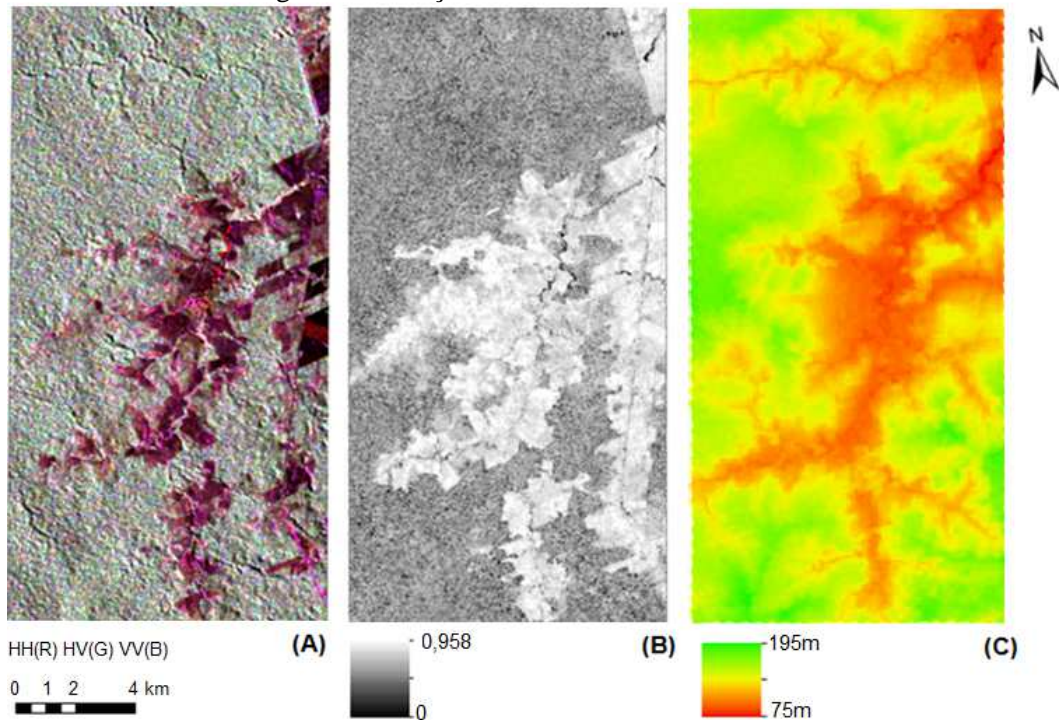
Após o registro das imagens, estas foram submetidas ao filtro *Goldstein* (GOLDSTEIN; WERNER, 1998) com tamanho de janela de 5 x 5 pixels que, baseando-se nesta média espacial, permitiu a estimação do coeficiente de correlação complexa por meio do estimador definido pela Equação 28:

$$\hat{\gamma} = \frac{|(e_1 e_2^*)|}{\sqrt{\langle |e_1|^2 \rangle \langle |e_2|^2 \rangle}} \quad (28)$$

sendo que $|\hat{\gamma}|$ é estimador da coerência interferométrica, podendo assumir valores entre $0 \leq |\hat{\gamma}| \leq 1$, $\langle \dots \rangle$ refere-se a uma média espacial de pixels, e e_1 e e_2 referem-se aos pixels complexos das imagens que formam o par interferométrico.

Como resultado deste processo obteve-se uma imagem em que cada pixel representa valores de $|\hat{\gamma}|$, sendo os pixels mais claros associados a maiores valores de coerência e pixels próximos de 0 (pixels mais escuros) representam regiões de baixa coerência. A imagem resultante possui um *look* em azimuth e três *looks* em *range* (Figura 3.3).

Figura 3.3 - (A) Imagem ALOS/PALSAR; (B) Imagem de coerência interferométrica; (C) Modelo digital de elevação - MDE/SRTM.

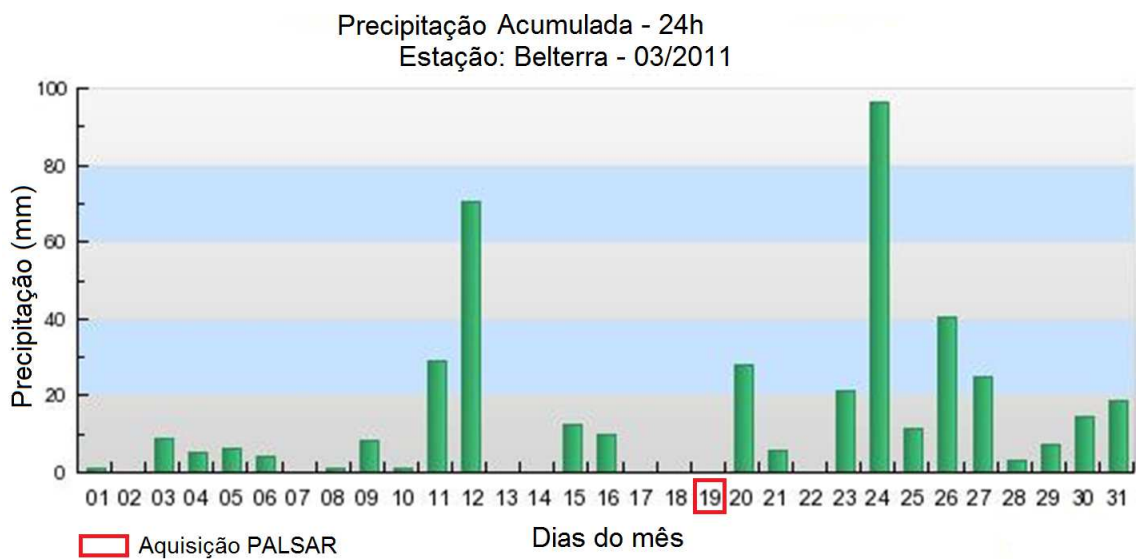


Após estes processos, a imagem de coerência interferométrica TanDEM-X passou por um processo de reamostragem pelo método de vizinho mais próximo para 12,5 metros, dimensões correspondentes aos pixels do dado PALSAR. O método de reamostragem utilizado foi escolhido pois gera baixa alteração na estatística do dado resultante com relação ao original (NOVO, 1989). Em seguida, a imagem foi submetida ao processo de ortorretificação pelo método nominal (*range-doppler*), considerando atributos orbitais (posições e velocidades da plataforma), atributos processados (*doppler*, intervalo de atraso, espaçamento de pixel etc.) e um Modelo Digital de Elevação - MDE/SRTM (citado na Seção 3.2.3).

Um importante parâmetro a ser considerado sobre os dados SAR é relativo à quantidade de precipitação próxima à data de aquisição dos mesmos, devido à quantidade de umidade influenciar na propriedade dielétrica dos materiais,

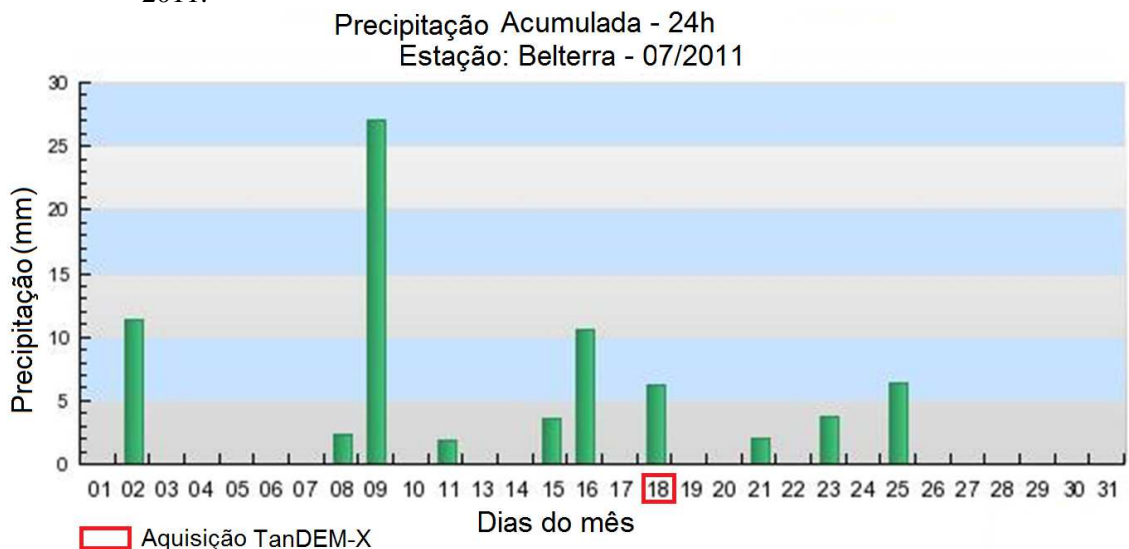
alterando significativamente o retroespalhamento de alguns alvos, como áreas florestadas e agrícolas (RANEY, 1998). Considerando isso, verificou-se a série histórica de dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET relativa à precipitação acumulada diária da Estação do município de Belterra (mais próxima da área de estudo) para o mês de março e para o mês de julho de 2011, meses em que os dados PALSAR e da missão TanDEM-X foram adquiridos, conforme apresenta as Figuras 3.4 e 3.5 .

Figura 3.4 - Precipitação acumulada diária para a estação de Belterra no mês de março de 2011.



Fonte: INMET (2015).

Figura 3.5 - Precipitação acumulada diária para a estação de Belterra no mês de julho de 2011.



Fonte: INMET (2015).

Observa-se pela Figura 3.4 que próximo à data de aquisição do dado PALSAR não houve precipitação. Porém, no dia 18 de julho (Figura 3.5), data de aquisição dos dados TanDEM-X, ocorreu uma baixa precipitação em torno de seis milímetros. Watanabe et al. (2015) verificaram que a precipitação nem sempre induz a um significativo aumento do retroespalhamento.


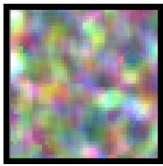



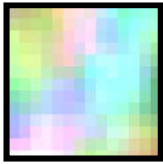

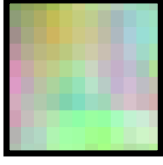

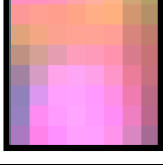

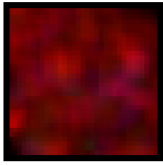


3.2.2. Dados de Campo

Os dados temáticos de observação foram coletados por meio de um levantamento de campo realizado na Flona do Tapajós e adjacências, em setembro de 2014. A cada ponto de identificação realizou-se o registro de coordenadas, por meio de Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS), na projeção *Universal Transversa de Mercator* (UTM), datum *World Geodetic System 1984* (WGS 84) e registro fotográfico.

Para compor o conjunto de dados de campo, foram também utilizados levantamentos decorrentes de outras incursões científicas realizadas na área de estudo em agosto de 2012. Estes levantamentos históricos disponibilizaram o reconhecimento de estágios sucessionais da vegetação, conforme descritos no estudo de Silva (2014), bem como o levantamento de classes temáticas da Flona do Tapajós e do seu entorno, registrados por Silva et al. (2014).



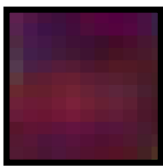



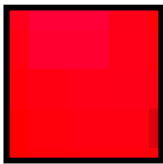
As classes identificadas por meio das incursões de campo foram: a) floresta primária; b) floresta primária manejada; c) floresta degradada; d) sucessão secundária (inicial, intermediária e avançada); e) área agrícola (com variações de uso, desde áreas em processo de cultivo formado a outras de solo em pousio ou com solo preparado); f) pasto limpo; g) pasto sujo (com presença babaçu - *Orbignya phalerata*- e/ou inajá - *Attalea maripa*); e h) corpo d'água. Numa análise visual exploratória das imagens orbitais, aliada ao conhecimento da informação de campo, optou-se por agrupamento de algumas classes, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Descrição e agrupamento de classes identificadas em campo. Imagem PALSAR HH(R) HV(G) VV(B).

Classe	Uso e Cobertura	Descrição	Registro fotográfico	Aparência na Imagem PALSAR
FP	Floresta Primária	Florestas sem alteração antrópica		
	Floresta Primária Manejada	Florestas com corte seletivo		
	Floresta Degradada	Florestas que sofreram leve perda de densidade por atividades de corte indiscriminado e/ou queimada		
SSA	Sucessão Secundária Avançada	Regeneração natural com mais de 15 anos		
SSInt	Sucessão Secundária Intermediária	Regeneração natural de 5 a 15 anos		
SSI	Sucessão Secundária Inicial	Regeneração natural com menos de 5 anos		
AC	Área Cultivada	Cultivos agrícolas ao longo da fase de desenvolvimento fenológico		
SP	Solo em Pousio	Áreas de descanso agrícola temporário entre períodos de cultivo		

(Continua)

Tabela 3.4 – Conclusão

	Solo Exposto Preparado	Áreas gradeadas para receber o cultivar		
PL	Pasto Limpo	Pastagens bem manejadas, com poucas espécies invasoras		
PS	Pasto Sujo com ou sem presença de babaçu e/ou inajá	Pastagens com e sem a presença de espécies invasoras arbustivas, babaçu e/ou inajá		
CA	Corpo d'água	Lâminas d' água de rios, córregos, lagoas, açudes		

3.2.3. Dados Auxiliares e Aferição Temporal

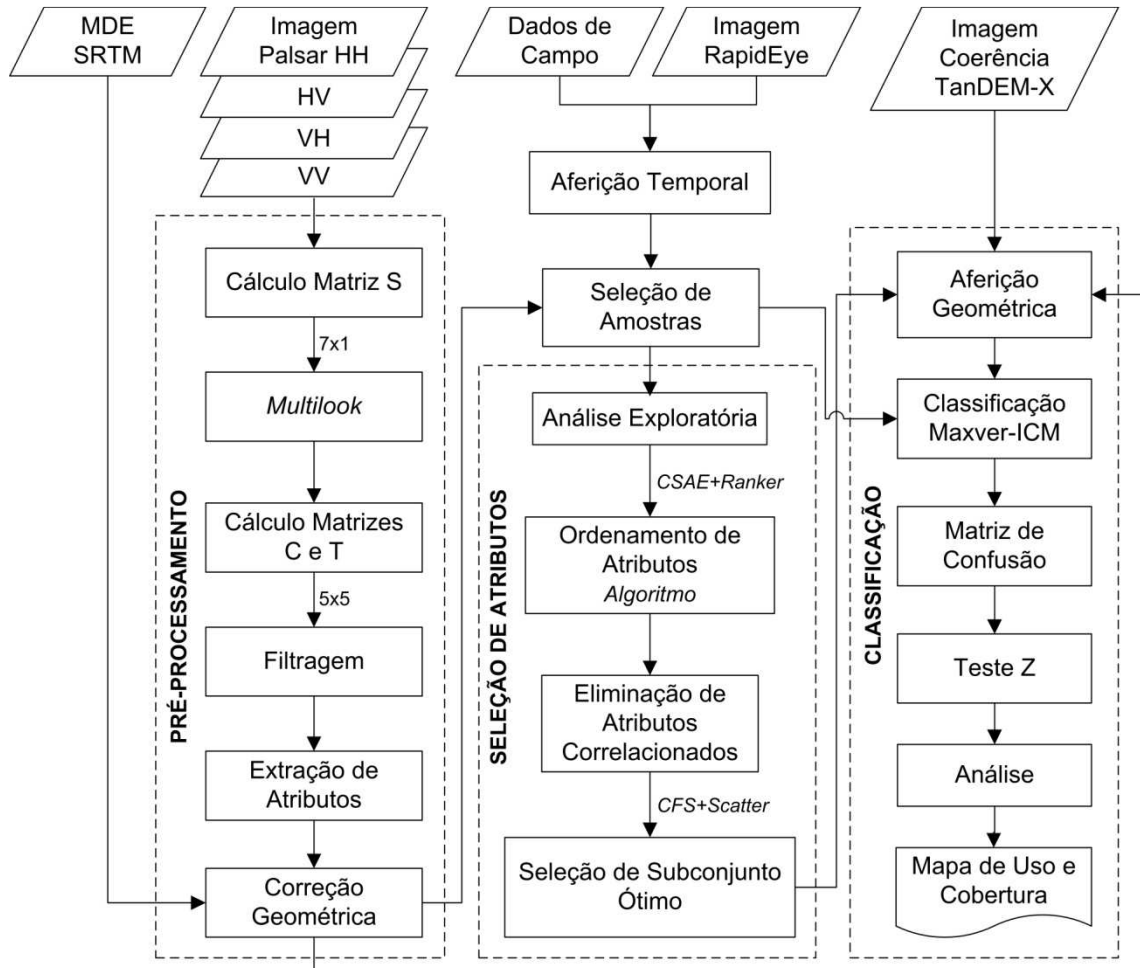
Considerando que houve um intervalo de tempo entre as aquisições dos dados pelos sensores remotos e os levantamentos de campo, uma aferição temporal da concordância entre os pontos coletados e o estado da paisagem registrado pelos SAR foi necessária. Esta avaliação foi feita por fotointerpretação, a partir da sobreposição dos pontos coletados com um dado óptico adquirido pela constelação de satélites RapidEye em junho de 2011. A imagem apresenta 5 metros de resolução espacial, 12 bits de resolução radiométrica e possui um nível de processamento de 3A, que se refere a um dado já ortorretificado. O dado foi obtido por meio do Geo Catálogo do Ministério do Meio Ambiente.

Um Modelo Digital de Elevação - MDE adquirido pela *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM (Figura 3.3) foi também utilizado neste estudo como informação auxiliar ao processo de ortorretificação nominal das imagens SAR. O dado possui 90 metros de resolução e foi obtido a partir da plataforma *Earth Explorer do United States Geological Survey* - USGS/NASA.

3.3. Processamento e Análise

A Figura 3.6 ilustra o fluxograma da metodologia adotada no estudo, contendo todas as etapas do processamento e análise de dados.

Figura 3.6 - Sequência metodológica do estudo.



A seguir, apresenta-se uma descrição das etapas deste estudo.

3.3.1. Pré-Processamento

Inicialmente as imagens PALSAR em formato *Single Look Complex* foram importadas para o ambiente *Polarimetric SAR Data Processing and Educational Tool - PolSARpro 5.0* e em seguida foram calculados os elementos da matriz de espalhamento. Para o cálculo das matrizes de covariância e coerência, a partir da matriz de espalhamento, foi necessária a aplicação de uma média espacial, processo denominado *Multilook* (LEE; POTTIER, 2009). Utilizando uma média

de 7x1, o espaçamento do pixel foi convertido de 3,59 x 9,37m (azimute x *range*) para 25,12 x 23,04m (azimute x *ground range*), considerando o ângulo de incidência de 23,98°. A obtenção da média espacial adequada foi feita por meio da Equação 29, que determina o *ground range*, e da Equação 30, que determina o fator de reamostragem. Além de tornar as dimensões do pixel regulares, o processo *Multilook* reduz sutilmente o efeito *speckle*.

$$Gr = \frac{Sl}{\text{sen}(\theta)} \quad (29)$$

em que *Gr* é o *ground range*; *Sl* refere-se à resolução em *slant range*; e θ é o ângulo de incidência.

$$Fr = \frac{Gr}{Az} \quad (30)$$

em que *Fr* é o fator de reamostragem e *Az* é a resolução em azimute.

Para o tratamento efetivo do efeito *speckle*, as matrizes de coerência e covariância foram filtradas utilizando o filtro *Refined Lee* (LEE et al., 1981), com uma janela de 5x5 pixels. O filtro polarimétrico foi determinado considerando a metodologia testada por Narvaes (2010) e Silva (2014) na mesma área de estudo com imagem PALSAR. A determinação do tamanho da janela de filtragem foi feita por meio de testes com janelas variando de 3x3 a 11x11 pixels, aplicadas a matriz de covariância. A partir disso, avaliou-se: a) a redução do *speckle* por meio do Coeficiente de Variação - CV de regiões homogêneas para cada tamanho de janela; e b) a integridade informacional das feições apresentadas nas imagens filtradas, por meio de análise visual. O CV é definido pela razão entre o desvio padrão e a média dos pixels que formam a vizinhança do pixel ruidoso e é utilizado para auxiliar a avaliação da redução do efeito *speckle*, estando associados os baixos valores de CV de regiões homogêneas da imagem, à maior redução do efeito (ROSA, 2012). Neste estudo, regiões de Floresta Primária foram adotadas como regiões homogêneas.

A partir das matrizes filtradas [C] e [T], foram calculadas as decomposições polarimétricas de Cloude-Pottier, Freeman-Durden, Touzi, Yamaguchi e as imagens em intensidade que geraram os coeficientes de retroespalhamento

σ_{HH}^0 , σ_{HV}^0 , σ_{VH}^0 e σ_{VV}^0 . Assumindo a reciprocidade, nesta investigação utilizou-se a média entre σ_{HV}^0 e σ_{VH}^0 . A partir dos coeficientes de retroespalhamento foram calculados os Índices de Pope BMI, VSI e CSI.

Os coeficientes de retroespalhamento foram obtidos por meio da calibração radiométrica que consiste na transformação dos números digitais da imagem para valores de retroespalhamento (σ^0). Para uma imagem polarimétrica PALSAR, com nível de processamento 1.1, os σ^0 foram calculados por meio da Equação 31 proposta por Shimada et al. (2009):

$$\sigma^0 = 10 \log_{10} I + CF - A \quad (31)$$

sendo I a intensidade para cada polarização; CF o fator de calibração radiométrica, dependente do ângulo de incidência; e A o fator de conversão que é 32, determinado a partir de 572 pontos coletados em nível global (SHIMADA et al., 2009).

Os atributos gerados nesta etapa estão explicitados na Tabela 3.5. Destaca-se que as componentes da Decomposição de Touzi α_{sn} , Φ_n , τ_n e Ψ_n foram calculadas para cada um dos autovetores da matriz de covariância.

Tabela 3.5 - Atributos gerados a partir de decomposição de alvos de Cloude-Pottier, Freeman-Durden, Yamaguichi e Touzi, com respectiva descrição desses descritores polarimétricos.

Atributo Extraído	Símbolo	Descrição	Fonte	
A partir de informação de fase	Ângulo alfa	α	Tipos de mecanismo de espalhamento dominante	Cloude-Pottier (1996)
	Entropia	H	Grau de aleatoriedade do espalhamento	
	Anisotropia	A	Mede a importância relativa do segundo e terceiro tipos de mecanismos presentes.	
	Espalhamento Volumétrico	P_v	Modelado por uma nuvem de dispersores cilíndricos e finos aleatoriamente distribuídos	Freeman-Durden (1998)
	Espalhamento <i>double-bounce</i>	P_d	Modelado a partir de duas superfícies ortogonais	
	Espalhamento Superficial	P_s	Parcela do espalhamento superficial	
	Espalhamento Volumétrico	Y_v	Nuvem de espalhadores cilíndricos e muitos finos aleatoriamente distribuídos	Yamaguichi (et al. 2005)
	Espalhamento <i>double-bounce</i>	Y_d	Modelado por duas superfícies ortogonais	
	Espalhamento Superficial	Y_s	Parcela do espalhamento superficial	
	Espalhamento do tipo hélice	Y_H	Espalhamento em forma de hélice	
	Magnitude do tipo de espalhamento	α_{sn}	Ângulo da direção do vetor de espalhamento simétrico em base triedral-diedral	Touzi (2007)
	Fase do tipo de espalhamento	Φ	Diferença de fase entre espalhamentos a partir de triedro e diedro	
	Helicidade	τ_n	Indica a simetria do espalhamento do alvo	
	Ângulo de orientação	Ψ_n	Medida intrínseca do ângulo de orientação	
A partir do retroespalhamento	Coefficiente de retroespalhamento HH	σ_{HH}^0	Porção de energia retornada ao sensor a partir da superfície	Woodhouse (2006)
	Coefficiente de retroespalhamento HV	σ_{HV}^0		
	Coefficiente de retroespalhamento VV	σ_{VV}^0		

(Continua)

Tabela 3.5 – Conclusão

	Índice de Biomassa	BMI	Índices biofísicos extraídos a partir do retroespalhamento, que se relacionam com as características da estrutura florestal	Pope et al. (1994)
	Índice de Espalhamento Volumétrico	VSI		
	Índice de estrutura do dossel	CSI		

A última etapa do pré-processamento consistiu na correção geométrica dos atributos por meio da geocodificação e ortorretificação. Esta etapa foi realizada no *software MapReady Remote Sensing Tool 3.1.2*. Para tanto, utilizou-se o mesmo MDE e o mesmo método nominal de ortorretificação aplicados à imagem coerência (Seção 3.2.1), com dimensão de pixel padrão de 12,5 metros.

3.3.2. Seleção de Amostras

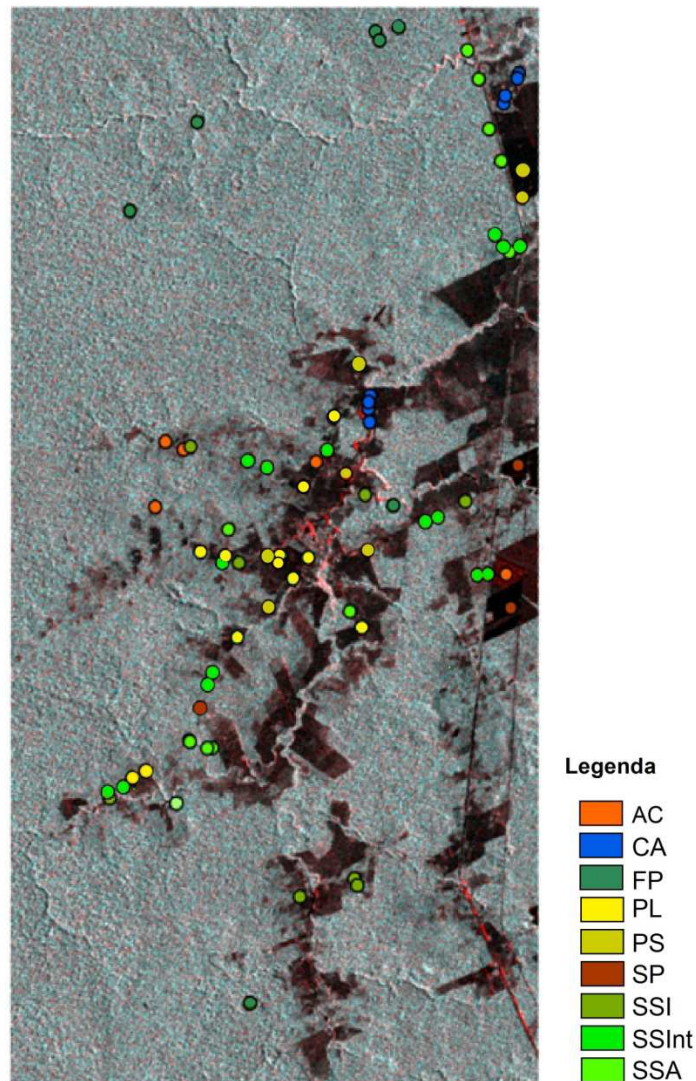
A seleção de amostras representativas de cada classe temática estudada foi feita utilizando os pontos de amostragem levantados em campo. Esta etapa foi realizada no *software Exelis Visual Information Solutions - ENVI 4.8*. Parte do conjunto amostral destinou-se ao treinamento do algoritmo de classificação e às análises para seleção de atributos, enquanto a outra parte foi destinada à validação do mapeamento, conforme apresenta a Tabela 3.6. Este procedimento visa minimizar a tendenciosidade dos resultados no momento da avaliação da qualidade dos mapeamentos. A Figura 3.7 apresenta a distribuição espacial do conjunto amostral.

Tabela 3.6 - Número de pixels para cada classe

Tipo de amostra	Classe	Número de pixels
Treinamento	AC	1069
	CA	461
	FP	1080
	PL	1005
	PS	1037
	SSA	661
	SSInt	633
	SSI	315
	SP	1086
Validação	AC	106
	CA	138
	FP	632
	PL	109
	PS	158
	SSA	104
	SSInt	95
	SSI	58
	SP	85

Em que, AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Figura 3.7 - Distribuição espacial do conjunto amostral sobreposto à imagem PALSAR. Composição VV(R) HV(G) HH(B).



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

3.4. Seleção de Atributos

Após os processamentos, foram realizadas as etapas de análise e de seleção de dados para formação de um subconjunto ótimo, considerando a diminuição da dimensionalidade do espaço de atributos, otimização do processo de classificação e qualidade dos resultados do processo classificatório.

Uma análise exploratória de cada um dos 32 atributos gerados foi feita utilizando o conjunto amostral anteriormente mencionado. Para avaliação da separabilidade das classes e da capacidade discriminatória dos atributos foram elaborados gráficos do tipo *boxplot*, que informam sobre a distribuição e o aspecto do conjunto de dados por meio de atributos como mediana, quartil inferior, quartil superior e *outliers*. Nesta etapa foram eliminados atributos que possuíam baixa ou nenhuma capacidade discriminatória.

Após esta pré-seleção, os atributos foram ordenados segundo sua importância com relação às classes por meio do teste estatístico qui-quadrado. Este processo foi realizado no ambiente *Waikato Environment for Knowledge Analysis - WEKA*, combinando o avaliador de atributos *ChiSquareEval - CSAE* ao método de busca *Ranker*.

Posteriormente, elaborou-se uma matriz de correlação utilizando os atributos anteriormente selecionados. Para o processo de seleção foi considerado a posição do atributo no ordenamento realizado na etapa anterior, de tal forma que o atributo de maior importância era mantido e os atributos que possuíam correlação com este superior a 0,90 eram excluídos. Em seguida foi analisado o próximo atributo de melhor posição no ordenamento e o procedimento de exclusão já mencionado foi repetido. Este processo foi sucessivo até que se chegasse a um grupo de atributos que possuíam entre si uma correlação inferior a 0,90.

O procedimento seguinte consistiu em buscar dentro do grupo de atributos, já com baixa correlação, as melhores combinações de atributos possíveis, considerando o potencial discriminatório com relação às nove classes abordadas nesta investigação. Para tanto, foram testadas as diversas combinações possíveis, avaliando, através do espaço de atributos, a importância discriminatória de cada atributo com relação à classe e as combinações de maior variabilidade entre si, até retornar o subconjunto ótimo, aquele com a melhor solução. Este procedimento foi realizado por meio do algoritmo *CFSSubsetEval - CFS* combinado ao método de busca *ScatterSearch* no ambiente no ambiente WEKA.

3.5. Classificação, Validação e Análise Comparativa

Após o pré-processamento e a etapa de seleção de atributos, fez-se uma aferição da correspondência geométrica entre os atributos gerados a partir do dado PALSAR e da imagem coerência. A partir disso, verificou-se a sobreposição adequada dos dados com correspondência entre os pixels, estando estes representando a mesma região no terreno. A integração entre os dados PALSAR e Coerência Interferométrica TSX/TDX foi feita no ambiente do classificador, por meio de empilhamento de bandas.

Para a etapa de classificação foi utilizado o algoritmo MAXVER-ICM implementado no Classificador Polarimétrico 7 (CORREIA, 1998). Além do subconjunto ótimo selecionado na etapa anterior, foram feitas classificações tendo como entrada seis grupos de atributos polarimétricos agrupados de acordo com a natureza destes, associados cada qual à coerência interferométrica a fim de avaliar a contribuição desta às informações de natureza polarimétrica para o mapeamento temático, conforme explicita a Tabela 3.7. O espaço de atributos de cada combinação foi avaliado por meio de gráficos de dispersão.

Tabela 3.7 - Entrada de dados das classificações realizadas no estudo.

σ^0																			
Cloude Pottier																			
Freeman Durden																			
Touzi																			
Yamaguchi																			
Índices																			
Sub-conjunto ótimo																			

■ Grupo de atributos polarimétricos; ■ Grupo de atributos polarimétricos associado à coerência interferométrica.

Dispondo dos resultados das classificações e de um conjunto amostral de referência, uma análise da acurácia foi realizada, a fim de analisar a efetividade dos métodos empregados. De acordo com Congalton e Green (1999), a Matriz de

Confusão é uma das formas mais eficientes de representação da exatidão de uma classificação, viabilizando a análise da qualidade da classificação. Esta matriz representa uma hipótese h e fornece uma medida do modelo de classificação ao apresentar o número de classificações corretas *versus* classificações preditas para cada classe.

A partir da matriz de confusão podem-se calcular alguns coeficientes, como o coeficiente *Kappa*. O coeficiente *Kappa* gera uma medida da concordância da classificação com os dados adotados como referência, utilizando todos os elementos da matriz de confusão (FIGUEIREDO, et al., 2007). Este coeficiente permite analisar o nível de aleatoriedade da classificação. O coeficiente de concordância *Kappa* é dado pela Equação 32 e sua variância é determinada pela Equação 33:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^m x_{ij} - \sum_{i=1}^m x_{i+} x_{+j}}{N^2 - \sum_{i=1}^m x_{i+} x_{+j}} \quad (32)$$

em que K é uma estimativa do coeficiente *Kappa*, x_{ij} o valor na linha i e coluna j , x_{i+} a soma da linha i e x_{+j} é a soma da coluna da matriz de confusão; N é o número total de amostras e m o número total de classes.

$$var(K) = \frac{1}{N} \left\{ \frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_1)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2-\theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4-4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right\} \quad (33)$$

sendo,

$$\theta_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m N_{ii} \quad (34)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^m N_{i+} N_{+j} \quad (35)$$

$$\theta_3 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^m N_{ii} (N_{i+} + N_{+j}) \quad (36)$$

$$\theta_4 = \frac{1}{N^3} \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^m N_{ii} (N_{i+} + N_{+j})^2 \quad (37)$$

Para uma análise comparativa entre os valores de coeficiente *Kappa* de cada classificação, Congalton e Green (1999) propõem o emprego de testes de hipótese com a utilização de estatística que segue uma distribuição normal, como o teste de

hipótese Z, dado pela Equação 38. Este teste é utilizado para dois ou mais valores estimados de coeficiente de *Kappa*, permitindo verificar a significância estatística da diferença entre eles. É um teste adequado a esta investigação, uma vez que serão feitas classificações distintas, avaliadas a partir de um mesmo referencial.

$$Z = \frac{K_2 - K_1}{\sqrt{\sigma_{K_2}^2 + \sigma_{K_1}^2}} \quad (38)$$

sendo K_1 o índice *Kappa* da imagem 1, K_2 o índice *Kappa* da imagem 2 e σ^2 a variância de *Kappa*.

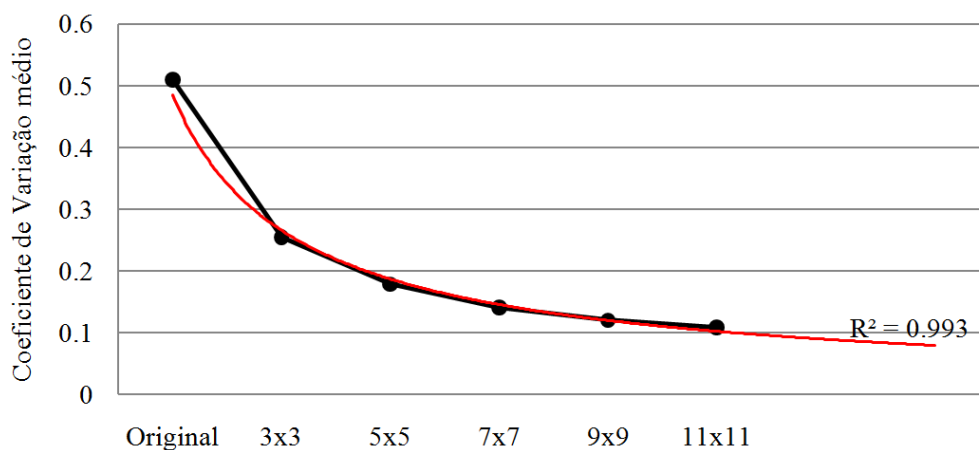
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta investigação. A Seção 4.1 aborda o resultado do processo de seleção do tamanho da janela de filtragem. Na Seção 4.2 são apresentados os resultados da análise da sensibilidade dos atributos polarimétricos e coerência interferométrica às classes de uso e cobertura da terra encontradas na área de estudo. Na Seção 4.3 são apresentados os resultados da etapa de seleção de atributos. Os resultados das classificações estão apresentados e discutidos na Seção 4.4.

4.1. Tamanho da Janela de Filtragem

Mediante metodologia descrita na Seção 3.3.1, o coeficiente de variação médio - CV, apresentou uma redução de 78,58% em relação à imagem sem filtragem para o tamanho de janela 11x11, passando de 0,509 para 0,109 (Figura 4.1). Porém, verificou-se que 64,8% da redução do CV ocorreu até a janela 5x5. A partir deste tamanho de janela até a janela 11x11, a redução foi de apenas 13,75%. A linha de tendência representada na Figura 4.1, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,993, prediz uma tendência de baixa alteração dos valores de CV para dois períodos adiante ao tamanho de janela de 11x11.

Figura 4.1 - Análise da redução do efeito *speckle* por meio do Coeficiente de Variação Médio para diferentes tamanhos de janela do filtro polarimétrico *Refined Lee*

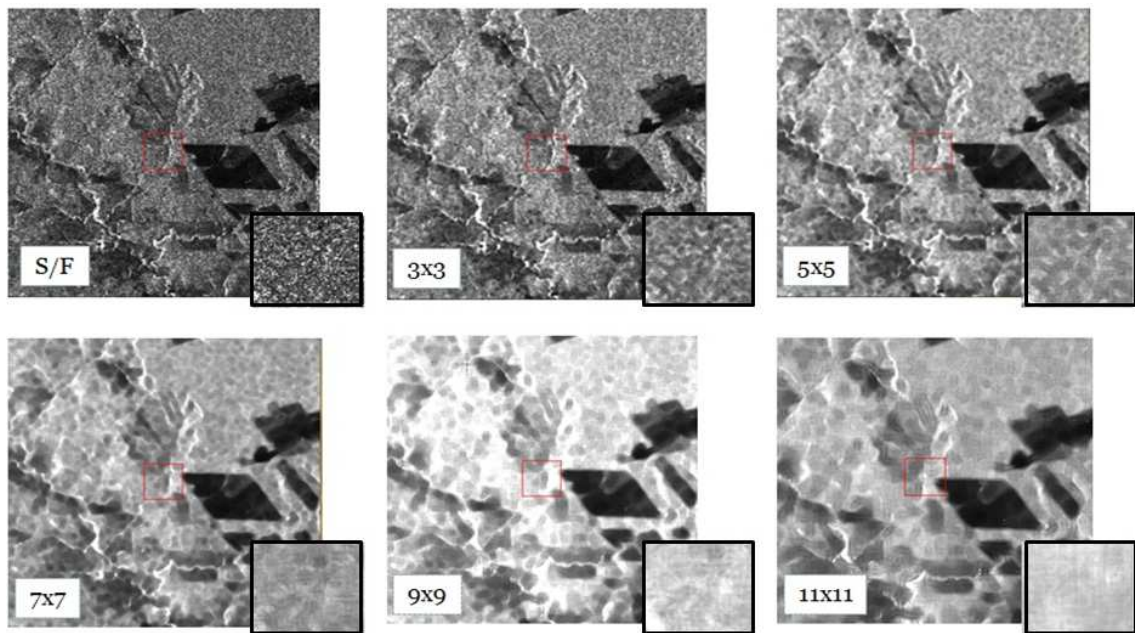


Polarização HH, em regiões de floresta primária. Original = Sem filtragem; Linha vermelha = Linha de Tendência de Potência.

Fonte: Produção do autor.

Por meio da Figura 4.2, observa-se perda de informação sobre a rugosidade e borramento das bordas das feições presentes na imagem na medida em que se aumenta o tamanho da janela. A partir da janela 7x7, percebe-se uma suavização excessiva de algumas bordas e feições.

Figura 4.2 - Análise visual da redução do efeito *speckle* para diferentes tamanhos de janela do filtro polarimétrico *Refined Lee*, na polarização HH.



Fonte: Produção do próprio autor.

Dessa forma, considerando a análise dos valores de CV e a análise visual, selecionou-se o tamanho de janela 5x5, por este apresentar melhor custo-benefício, reduzindo o efeito *speckle* e apresentando baixa degradação das feições representadas na imagem.

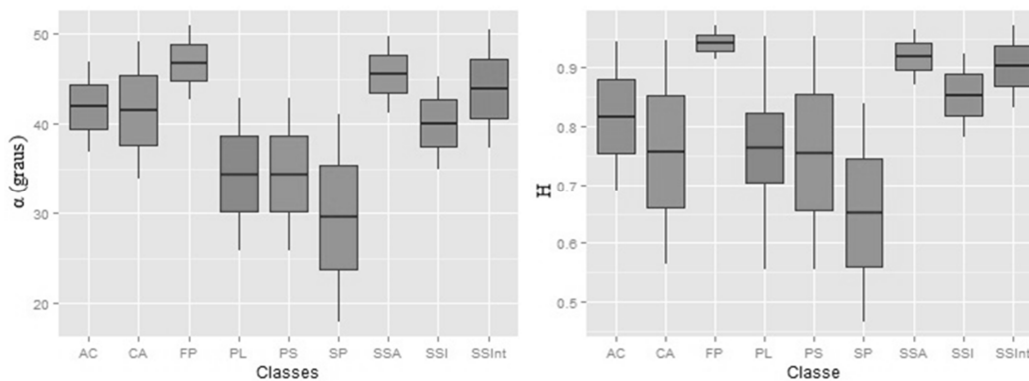
4.2. Sensibilidade dos Atributos Polarimétricos e da Coerência Interferométrica Frente às Classes de Uso e Cobertura

Conforme descrito na Seção 3.4, foi realizado uma análise por meio de *boxplot* da sensibilidade às classes temáticas abordadas neste estudo de todos os atributos polarimétricos extraídos e da coerência interferométrica.

Iniciando a análise exploratória pelo grupo de atributos derivados da decomposição de Cloude-Pottier, com relação às sucessões, os atributos Ângulo Alfa (α) e Entropia (H) (Figura 4.3) exibiram maior sensibilidade aos diferentes estágios de sucessão florestal, apresentando, porém, sobreposição de distribuições.

Esses dois atributos apresentaram ainda capacidade discriminatória da classe Sucessão Secundária Inicial (SSI) com relação à Sucessão Avançada (SSA) e Floresta Primária (FP). Os valores de média de α das classes SSA, Sucessão Secundária Intermediária (SSInt) e SSI foram respectivamente 46,2°, 43,9° e 41,7°. A variação dos valores de α entre os estágios sucessionais pode estar associada à densidade de elementos dispersores que produzem o espalhamento volumétrico, sendo menor em SSI e maior em SSA, considerando $\alpha \cong 45$ indicador de espalhamento do tipo volumétrico. Dentre os temas investigados, as classes solo em pousio ou solo preparado (SP) apresentam o menor valor médio de α de 24,83°, aproximando-se de um espalhamento do tipo superficial. Os altos valores de média de Entropia para as classes SSA ($H=0,94$), SSInt ($H=0,91$) e SSI ($H=0,88$) evidenciam que diferentes mecanismos de espalhamento contribuíram de modo equivalente para o sinal retornado ao sensor (LEE; POTTIER, 2009; CLOUDE, 2009).

Figura 4.3 - Gráficos *Boxplot* representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas no atributo ângulo alfa (α) e entropia (H) da decomposição de Cloude-Pottier.

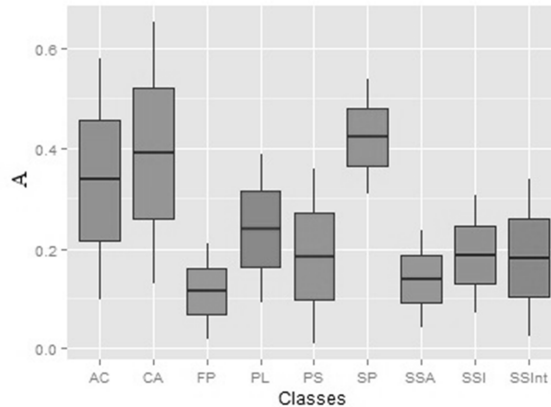


AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

O atributo Anisotropia (A) (Figura 4.4) possibilitou a discriminação da classe SP com relação às classes Pasto Limpo (PL) e Pasto Sujo (PS). Porém, neste atributo, a separabilidade entre SP, Área Agrícola (AC) e Corpo d'Água (CA) é baixa. O alto valor de média do atributo A para a classe SP ($\mu=0,42$) indica uma direção

preferencial de retroespalhamento gerada pelo padrão de rugosidade do terreno arado. Os atributos A e H mostraram-se sensíveis às diferenças das classes PL e PS, enquanto que α apresentou incapacidade de discriminação entre as mesmas.

Figura 4.4 - Gráfico *Boxplot* representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas Anisotropia (A) da decomposição de Cloude-Pottier.

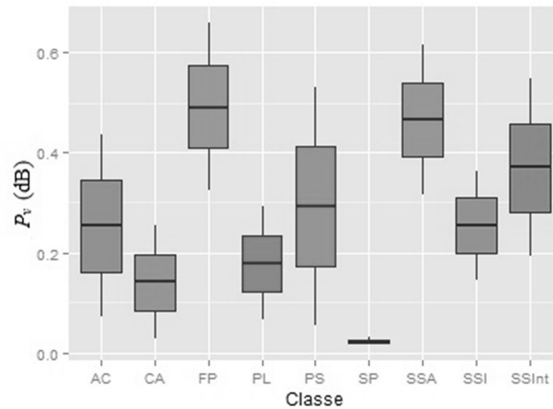


AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

No grupo de atributos extraídos da decomposição de Freeman-Durden, o atributo de maior variabilidade com relação às respostas temáticas foi o atributo espalhamento volumétrico (P_v) (Figura 4.5). Destaca-se a potencialidade deste atributo para a discriminação da classe SP como relação às outras oito tipologias temáticas abordadas no estudo. Conforme esperado, altos valores de P_v estão associados às classes FP e SSA, em razão deste atributo modelar especificamente o espalhamento produzido por esses tipos de alvo. FP apresenta média de 0,49 e intervalo de distribuição de 0,32 a 0,65 e SSA possui média de 0,46 e distribuição entre o intervalo 0,31 - 0,61, denotando, portanto, similaridade radiométrica entre essas duas classes no atributo P_v . As classes FP e SSA diferenciam-se de SSInt e SSI. Esta resposta é esperada devido à estrutura do dossel ser mais complexa, derivada de um maior número de estratos (meio propício à ocorrência de espalhamento do tipo volumétrico), em regenerações florestais mais avançadas e também, em florestas do tipo clímax, se comparadas àquelas de cronologia

sucessional mais jovem. Os resultados do estudo de Kuplich et al. (2009) apontam que dentre os atributos de Freeman-Durden, P_v foi o que mais contribuiu para a discriminação de classes de uso e cobertura da terra numa região da Amazônia brasileira.

Figura 4.5 - Gráfico *Boxplot* representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas no atributo de espalhamento volumétrico (P_v) da decomposição de Freeman-Durden.

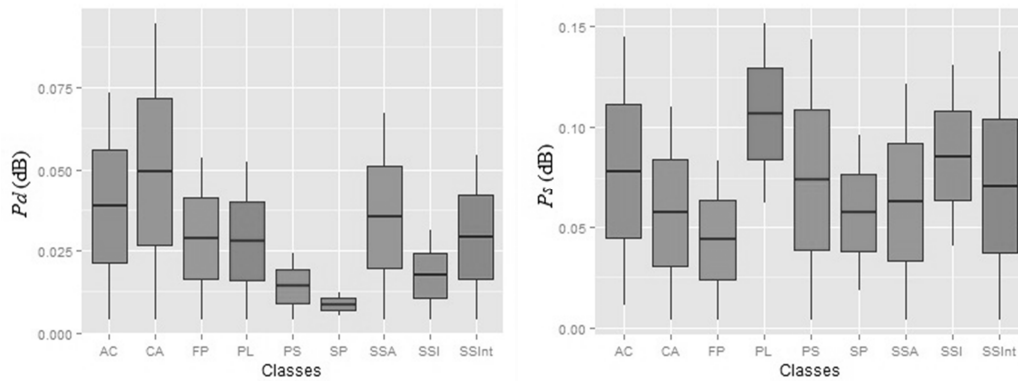


AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

A classe SSI apresentou valores menores de espalhamento do tipo *double-bounce* (P_d) com relação à FP, SSA e SSInt (Figura 4.6). Silva (2014) também relatou valores de P_d maior para floresta primária e menor para sucessões em um estudo a partir de dado PALSAR em uma região da Floresta Nacional do Tapajós. As características físico-estruturais de ambientes de sucessão secundária podem explicar esta relação visto que, em sucessões secundárias iniciais os indivíduos vegetais apresentam-se randomicamente dispostos com altura e diâmetros de troncos menores. Em contrapartida, ambientes de sucessão secundária mais avançada e floresta primária são fisionomicamente mais estruturados, os indivíduos arbóreos apresentam maior diâmetro de tronco e as disposições ortogonais (entre solo e tronco) são bem definidas. Estas características favorecem a ocorrência do espalhamento do tipo *double-bounce* e por isso os maiores valores para o atributo P_d para as classes FP e SSA quando comparados aos valores encontrados para as classes que representam sucessões mais jovens. Kobayashi et

al. (2015) também identificaram a relação entre altos valores de espalhamento do tipo *double-bounce* para regiões florestais e indivíduos de troncos e altura mais desenvolvidos.

Figura 4.6 - Gráficos *Boxplot* representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos de espalhamento *double-bounce* (P_d) e espalhamento superficial (P_s), respectivamente, gerados a partir da decomposição de Freeman-Durden.



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

A classe CA denotou altos valores de P_d , perfazendo uma média de 0,027. A interação entre a superfície do corpo d'água com seu entorno imediato pode ter condicionado esta resposta, visto que a área de estudo apresenta canais fluviais de ordem inferior, portanto estreitos, e com a presença de vegetação arbustivo-arbórea ciliar alagável (Figura 4.7). Considerando que o tamanho de pixel dos dados trabalhados apresenta 12,5 metros, possivelmente pixels utilizados na amostragem apresentavam interferências dos alvos circundantes, justificando desta forma este comportamento. Esta interferência também explica o comportamento volumétrico de CA (Figura 4.5) e estende-se para o comportamento de CA nos demais atributos.

Figura 4.7 - Corpo d'água com margem vegetada.

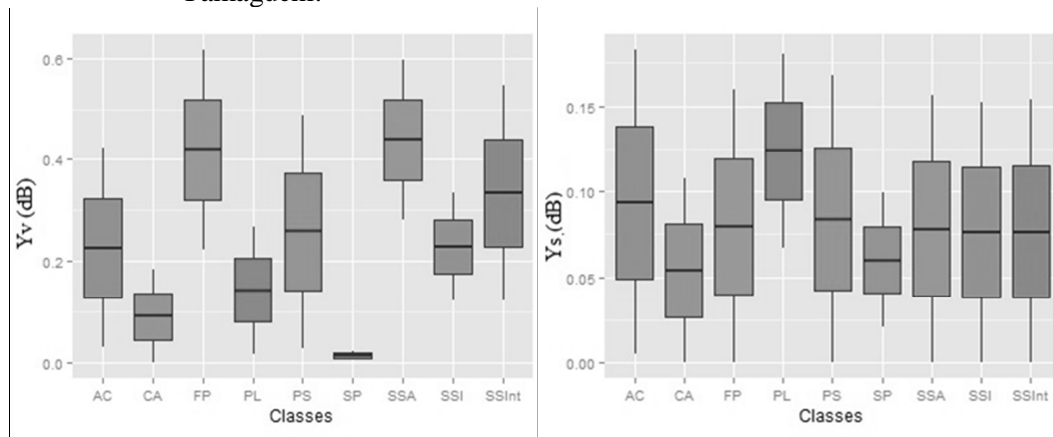


Conforme apresenta o gráfico *boxplot* apresentado da Figura 4.6, a classe SP no atributo P_s exibiu valor de média inferior ($\mu=0,049$) quando comparado a média da classe PL ($\mu=0,080$). Isso se deve ao fato de que a classe SP, como discutido anteriormente, inclui áreas de terreno arado que resultam em altos valores de anisotropia e valores médios de entropia de Cloude-Pottier, indicando que não há um espalhamento dominante para esta classe, o que explica, portanto, a baixa resposta superficial (P_s) de SP. Com relação às classes AC, PS e SSI a classe SP também apresentou valor médio inferior. Freeman e Durden (1998) identificaram inconsistência dos valores de P_s para áreas de solo exposto (*bare soil*) para as bandas C e L, quando aplicaram o teorema de decomposição de alvos criado por eles, ao estudo de uso e cobertura da terra em região a noroeste de Belize. Os autores esclarecem que o modelo utilizado para dispersão de superfície não é totalmente válido para esta tipologia de alvo quando utilizado bandas C e L. Esta inconsistência foi identificada igualmente no atributo Y_s da decomposição de Yamaguchi (Figura 4.8).

De acordo com Van Der Sandem, imageamento em banda L em um ângulo de incidência de $23,98^\circ$ favorece a penetração vertical de áreas florestadas (VAN DER SANDEM, 1997), que será maior em vegetações de menor densidade e menor em vegetação de maior densidade. Isso explicaria, portanto, a variação das respostas das diferentes sucessões florestais para o atributo P_s , sendo maior em SSI, devido às micro-ondas atingirem o substrato florestal.

Com relação ao grupo de atributos derivados da decomposição de Yamaguchi, o atributo de espalhamento volumétrico de Yamaguchi (Y_v) assim como o P_v , apresentou maior variabilidade de respostas para às diferentes classes (Figura 4.8). A similaridade entre os atributos de Yamaguchi e Freeman-Durden estabelece as mesmas potencialidades de discriminação, exceto para o atributo de espalhamento superficial (Y_s) que apresentou sensibilidade temática inferior ao P_s . Neste atributo, diferentes estágios de sucessão florestal apresentaram comportamento similar.

Figura 4.8 - Gráficos *Boxplot* representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos de espalhamento volumétrico (Y_v) e espalhamento superficial (Y_s) da decomposição de Yamaguchi.



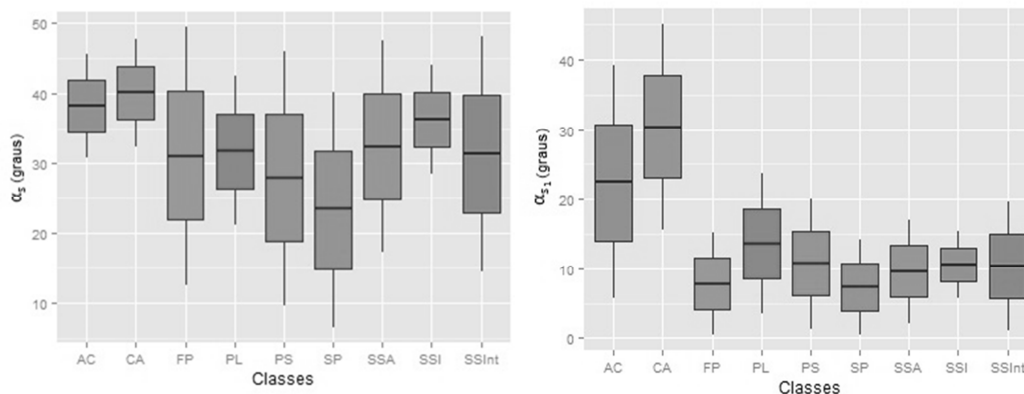
AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

O atributo específico da decomposição de Yamaguchi, referente ao espalhamento do tipo hélice (Y_H) não apresentou potencial para diferenciação entre os diferentes estágios de sucessão florestal. Os maiores valores de Y_H referem-se à FP, enquanto que os menores estão associados às classes SP e CA. Kobayashi et al. (2015) observaram que o espalhamento do tipo hélice é maior para regiões florestais apresentando ramos mais espaçados.

O grupo derivado de Touzi é composto por 16 atributos. Contudo, apenas três apresentaram algum potencial discriminatório, considerando as classes aqui abordadas, sendo eles: magnitude do tipo de espalhamento médio (α_s); magnitude

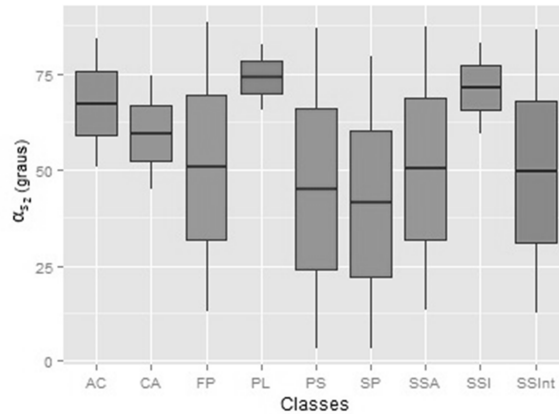
do tipo de espalhamento do primeiro (α_{s_1}) e do segundo autovetor (α_{s_2}) (Figuras 4.9 e 4.10). Nos atributos α_s e α_{s_1} as classes FP, SSA e SSInt apresentaram respostas similares, portanto, baixo potencial de discriminação. O atributo α_{s_2} apresentou potencial para discriminação de SSI com relação à SSInt e SSA e PL com relação a PS. A classe FP apresentou maior variabilidade com relação às sucessões secundárias no atributo α_{s_1} .

Figura 4.9 - Gráfico *Boxplot* representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos magnitude do tipo de espalhamento médio (α_s) e magnitude do tipo de espalhamento do primeiro autovetor (α_{s_1}).



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

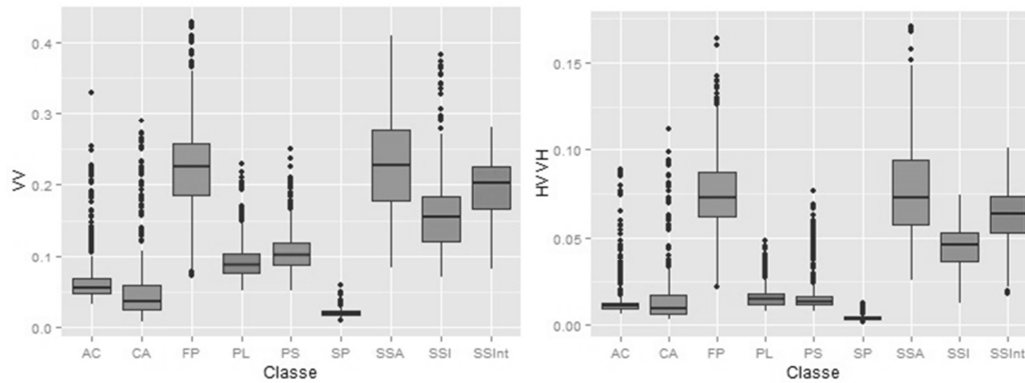
Figura 4.10 - Gráficos Boxplot representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas no atributo magnitude do tipo de espalhamento do segundo autovetor (α_{s_2}).



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

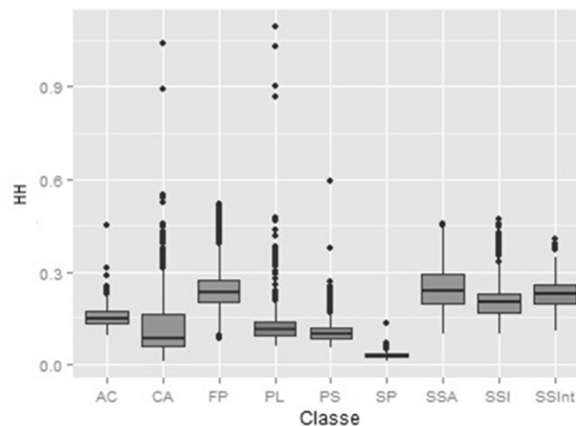
Dos atributos de coeficiente de retroespalhamento (σ^0) (Figuras 4.11 e 4.12), o atributo σ_{VV}^0 apresentou maior variabilidade de resposta radiométrica das classes abordadas, destacando a sensibilidade às diferenças entre as classes PS e PL. Em classes como CA, SP, PL e SP ocorrem o espalhamento superficial e a intensidade da resposta é condicionada pela rugosidade na *microescala*, atingindo maiores valores para PS e menores para SP. SSI exibe maior diferença radiométrica com relação à SSInt, SSA e FP no atributo σ_{HV}^0 (Figura 4.11), pois neste atributo a interação registrada é de natureza volumétrica. Com relação à vegetação, menores valores de σ^0 estão associados à SSI, que apresenta menor porte e densidade, enquanto os maiores foram resultantes das classes FP e SSA, por estas possuírem maior densidade de elementos dispersores.

Figura 4.11- Gráficos *Boxplot* representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos σ_{VV}^0 e σ_{HVVH}^0



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Figura 4.12 - Gráficos *Boxplot* representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas no atributo σ_{HH}^0 .

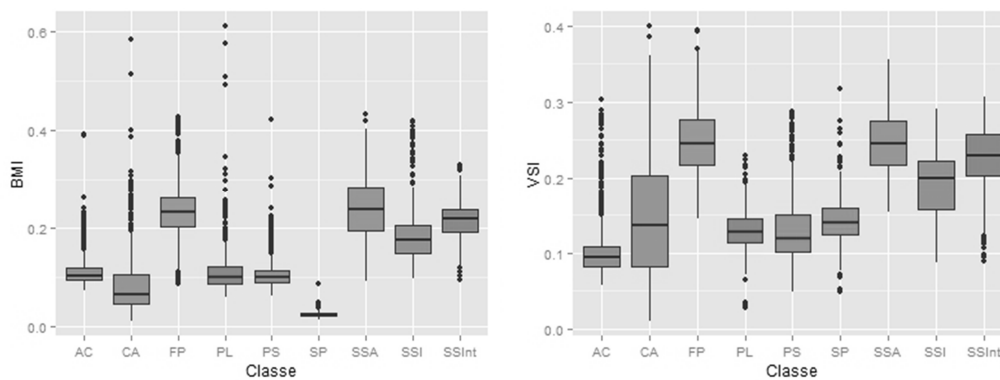


AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Destaca-se que nos três atributos de coeficiente de retroespalhamento (σ_{HH}^0 , σ_{VV}^0 , σ_{HVVH}^0) a classe CA apresenta valores superiores à classe SP. Este comportamento, em geral, não deveria ocorrer e indica a interferência da vegetação ciliar discutida anteriormente apresentada pelas amostras de CA.

Com relação aos índices de Pope, destacam-se os atributos BMI e VSI (Figura 4.13). Baixos valores de BMI, como esperado, estão associados às classes SP e CA e os mais altos estão relacionados aos alvos florestais. No atributo BMI, as sucessões florestais apresentaram variação de valores médios para os diferentes estágios sucessionais, conforme apresenta a Tabela 4.1. Valores de VSI foram maiores para FP e SSA. CA apresentou altos valores de VSI e também os mais baixos valores, lembrando que CA, conforme discutido anteriormente, pode estar sofrendo interferência da vegetação ciliar o que justificaria a grande amplitude no intervalo de valores para esta classe neste atributo.

Figura 4.13 - Gráfico *Boxplot* representando o quartil superior, inferior e mediana das distribuições das classes temáticas nos atributos BMI e VSI.



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

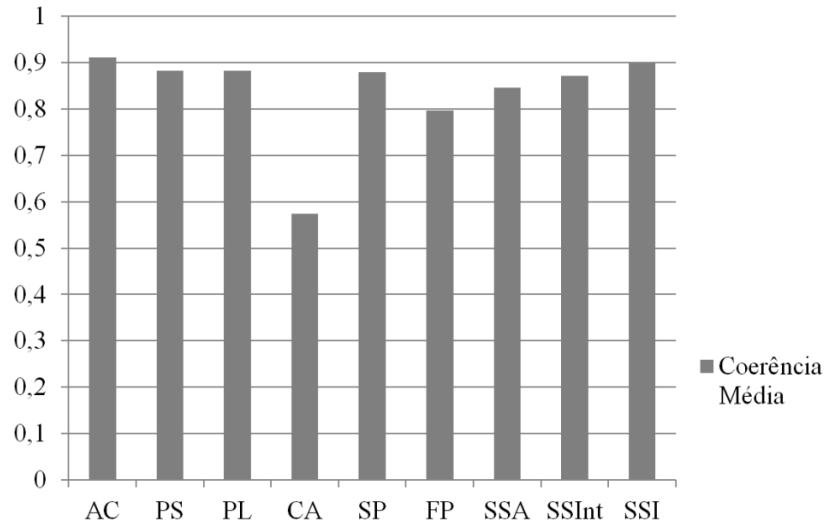
Tabela 4.1 - Valores médios de BMI para os diferentes estágios sucessionais

Classe	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)
FP	0,234	0,054
SSA	0,238	0,065
SSInt	0,212	0,039
SSI	0,187	0,063

A Figura 4.14 apresenta os valores de coerência interferométrica média para cada classe temática abordada no estudo. Os menores valores de coerência média são

relativos às classes CA, FP, SSA e SSInt. Já os maiores valores de coerência média são relativos às classes AC, SSI, PL, PS e SP. As classes PS e PL apresentam valores de coerência média próximos, 0,883 e 0,882, respectivamente.

Figura 4.14 - Valores de coerência média para cada classe temática.



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

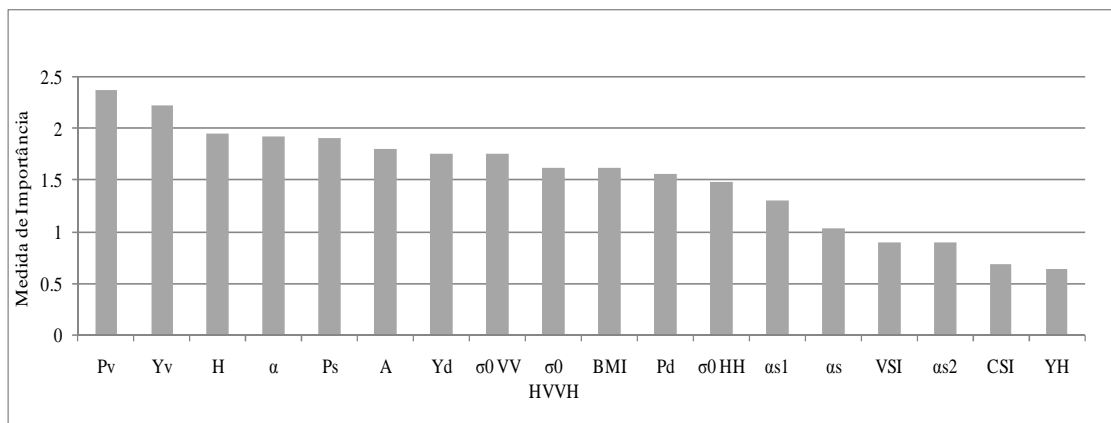
4.3. Subconjunto Ótimo Selecionado

Para a definição do subconjunto ótimo de atributos, considerou-se os resultados das análises apresentadas na seção anterior e assim foram eliminados 14 atributos que apresentavam baixíssima ou nenhuma sensibilidade às classes temáticas tratadas no estudo, sendo eles: o atributo de espalhamento superficial da decomposição de Yamaguchi (Y_s); e da decomposição de Touzi, o ângulo α do terceiro autovetor (α_{s3}), fase do tipo de espalhamento médio Φ e dos autovetores Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , helicidade média τ_s e dos autovetores τ_{s1} , τ_{s2} , τ_3 e ângulo de orientação médio Ψ_s dos autovetores Ψ_{s1} , Ψ_{s2} , Ψ_{s3} . Os *boxplots* dos atributos desconsiderados para a construção do subconjunto ótimo estão apresentados no Apêndice A.

A partir desta pré-seleção, ordenaram-se os atributos constituindo um *ranking* de importância, apresentado na Figura 4.15. O atributo de maior importância no

ranking é o espalhamento volumétrico de Freeman-Durden (P_v), dessa forma, analisando a matriz de correlação (Tabela 4.2), bandas que possuíam correlação acima de 0,9 com P_v foram excluídas. A partir disso, avaliou-se o próximo atributo do *ranking*, não eliminado na etapa anterior, que foi coeficiente de retroespalhamento de VV (σ_{VV}^0) e atributos com correlação acima de 0,9 com este atributo foram eliminados. A próxima referência de maior posição no *ranking* foi magnitude do tipo de espalhamento médio de Touzi (α_s) e o mesmo processo de análise e eliminação por correlação foi feito. Nesta etapa as bandas excluídas foram: espalhamento volumétrico de Yamaguchi (Y_v), ângulo alfa de Cloude-Pottier (α), índice de espalhamento volumétrico (VSI), coeficiente de retroespalhamento HVVH (σ_{HVVH}^0), entropia de Cloude-Pottier (H), coeficiente de retroespalhamento HH (σ_{HH}^0), índice de biomassa (BMI), magnitude do tipo de espalhamento do segundo autovetor de Touzi (α_{s2}), índice de estrutura de copa (CSI).

Figura 4.15 - *Ranking* segunda a importância dos atributos considerando as classes.



Sendo: A = Anisotropia; Y_d = Espalhamento *Double-Bounce*; σ_{VV}^0 = Coeficiente de Retroespalhamento VV; α_{s1} = Magnitude do Tipo de Espalhamento do primeiro autovetor de Touzi; e Y_H = Espalhamento do Tipo Hélice de Yamaguchi.

Tabela 4.2 - Matriz de correlação dos 18 atributos pré-selecionados.

Correlação	A	A	H	P_d	P_s	P_v	Y_d	Y_H	Y_v	α_s	α_{s1}	α_{s2}	BMI	CSI	VSI	σ_{HH}^0	σ_{HvvH}^0	σ_{vv}^0
A	1,00	0,61	0,63	0,64	0,62	0,35	0,54	0,30	0,33	0,65	0,66	0,70	0,46	0,64	0,47	0,48	0,33	0,42
A		1,00	0,99	0,46	0,25	0,92	0,61	0,59	0,91	0,95	0,75	0,89	0,81	0,96	0,95	0,80	0,87	0,78
H			1,00	0,46	0,30	0,91	0,61	0,59	0,89	0,95	0,74	0,91	0,81	0,97	0,94	0,80	0,85	0,78
P_d				1,00	0,38	0,33	0,65	0,25	0,32	0,51	0,46	0,50	0,44	0,45	0,34	0,45	0,31	0,40
P_s					1,00	0,08	0,35	0,14	0,06	0,31	0,34	0,44	0,33	0,33	0,15	0,36	0,06	0,28
P_v						1,00	0,55	0,61	0,99	0,84	0,59	0,76	0,80	0,88	0,92	0,78	0,91	0,79
Y_d							1,00	0,32	0,53	0,64	0,66	0,59	0,56	0,57	0,52	0,58	0,48	0,51
Y_H								1,00	0,48	0,51	0,43	0,50	0,51	0,57	0,58	0,50	0,55	0,50
Y_v									1,00	0,82	0,55	0,74	0,79	0,86	0,91	0,76	0,90	0,78
α_s										1,00	0,79	0,96	0,76	0,91	0,88	0,76	0,78	0,72
α_{s1}											1,00	0,72	0,57	0,67	0,65	0,61	0,54	0,50
α_{s2}												1,00	0,73	0,89	0,82	0,73	0,71	0,69
BMI													1,00	0,79	0,74	0,98	0,83	0,97
CSI														1,00	0,92	0,74	0,82	0,80
VSI															1,00	0,72	0,91	0,73
σ_{HH}^0																1,00	0,80	0,90
σ_{HvvH}^0																	1,00	0,82
σ_{vv}^0																		1,00

As melhores soluções de combinações de atributos considerando a potencialidade discriminatória temática individual e a variabilidade do conjunto encontram-se reunidas na Tabela 4.3. Todas as soluções foram classificadas, estando os valores de *kappa* explícitos na Tabela 4.3. O valor de *Kappa* mais alto foi obtido pelo subconjunto constituído pelos atributos $A, P_s, P_v, \sigma_{VV}^0$ e Y_d e foi este subconjunto selecionado para as análises realizadas na Seção 4.4.

Tabela 4.3 - Valores de Kappa para as melhores soluções de subconjuntos.

Subconjuntos	Número de Atributos	<i>Kappa</i>
$[P_d, P_s, Y_d]$	3	0,513
$[P_d, \sigma_{VV}^0, \alpha_s]$	3	0,499
$[A, P_d, P_s, P_v]$	4	0,537
$[A, P_s, P_v, \sigma_{VV}^0, Y_d]$	5	0,637
$[A, P_d, P_s, P_v, \sigma_{VV}^0]$	5	0,473
$[A, P_d, P_s, P_v, \sigma_{VV}^0, \alpha_{s1}]$	6	0,598

4.4. Resultados e Avaliações das Classificações

Os valores de *Kappa* das classificações realizadas neste estudo estão explícitos na Tabela 4.4. O coeficiente de *Kappa* mais alto foi alcançado pelo grupo de atributos de Cloude-Pottier integrado à coerência. Contudo a Tabela 4.5, que apresenta o teste Z para os valores de *Kappa* das diferentes classificações, mostra que não há diferença significativa entre o grupo de atributos de Cloude-Pottier associado e não associado à coerência. Os resultados das classificações a partir das decomposições de Cloude-Pottier, Freeman-Durden, Yamaguchi e do subconjunto ótimo apresentaram desempenho superior às classificações a partir do grupo de atributos de σ^0 , dos índices de Pope e da decomposição de Touzi. A diferença estatística entre a classificação a partir da Cloude-Pottier e o grupo de atributos de σ^0 foi de 13,15, mostrando o potencial da técnica de decomposição de alvos frente aos atributos σ^0 para estudos de uso e cobertura da terra na área de estudo. As avaliações das classificações mais pertinentes estão apresentadas com maior detalhe abaixo.

Tabela 4.4 - Valores de *Kappa* das classificações.

	s/γ	γ
σ^0	0,42	0,58
Cloude Pottier	0,70	0,72
Freeman Durden	0,54	0,57
Touzi	0,34	0,46
Yamaguchi	0,53	0,57
Índices	0,48	0,69
Sub- conjunto	0,63	0,67

s/γ classificação a partir de atributos polarimétricos; γ classificação a partir de atributos polarimétricos integrados à coerência interferométrica.

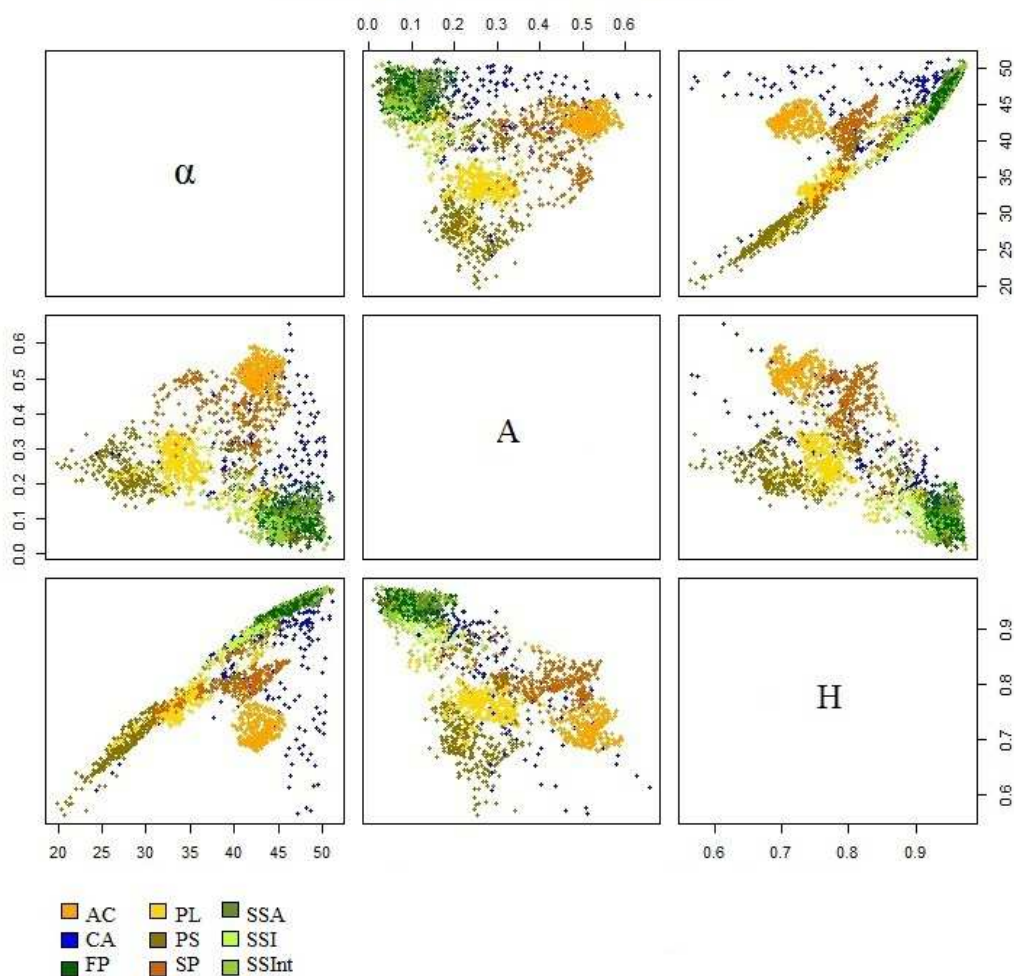
Tabela 4.5 - Teste Z aplicado aos valores de *Kappa* das classificações realizadas.

	σ^0	$\sigma^0 + \gamma$	Cloude Pottier	Cloude Pottier + γ	Freeman Durden	Freeman Durden + γ	Touzi	Touzi + γ	Yamaguchi	Yamaguchi + γ	Índices Pope	Índices Pope + γ	Subconjunto ótimo	Subconjunto ótimo + γ
σ^0	0,00													
$\sigma^0 + \gamma$	-7,38	0,00												
Cloude-Pottier	-13,15	-5,87	0,00											
Cloude Pottier + γ	-15,45	-7,90	-1,74*	0,00										
Freeman Durden	-5,53	1,81*	7,62	9,70	0,00									
Freeman Durden + γ	-6,76	0,86*	6,60	9,13	-1,02*	0,00								
Touzi	3,89	11,72	17,83	20,51	9,72	11,20	0,00							
Touzi + γ	-1,64*	5,97	11,97	14,34	4,07	5,29	-5,75	0,00						
Yamaguchi	-4,85	2,68	8,64	10,85	0,82*	1,89*	-9,10	-3,32	0,00					
Yamaguchi + γ	-7,12	0,36*	6,32	8,42	-1,48*	-0,50*	-11,51	-5,69	-2,35	0,00				
Índices Pope	-2,75	4,52	10,22	12,36	2,71	3,82	-6,74	-1,21*	1,97	4,22	0,00			
Índices Pope + γ	-12,69	-5,35	0,56*	2,34	-7,12	-6,42	-17,37	-11,48	-8,14	-5,80	-9,75	0,00		
Subconjunto ótimo	-9,85	-2,46	3,44	5,38	-4,26	-3,42	-14,35	-8,53	-5,20	-2,87	-6,94	2,91	0,00	
Subconjunto ótimo + γ	-11,86	-4,47	1,48*	3,32	-6,26	-5,51	-16,51	-10,61	-7,26	-4,91	-8,91	0,92*	-2,00	0,00

*diferença não significativa a 95% de confiança; γ = Coerência interferométrica.

Entre os grupos de atributos não associados à coerência, o grupo das componentes de Cloude-Pottier apresentou o maior valor de *Kappa* de 0,70. Mediante análise do espaço bidimensional de atributos desta decomposição (Figura 4.16), observa-se que a combinação de α e H favorece a discriminação das classes AC e SP. A matriz de confusão da Tabela 4.6 evidencia confusão não ultrapassando 14% entre as classes PS e PL, sendo a confusão entre estas classes maior no par α e H e menor no par α e A.

Figura 4.16 - Espaço de atributos extraídos da decomposição de Cloude-Pottier para as classes de uso e cobertura estudadas.



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Todas as combinações de pares de atributos de Cloude-Pottier exibiram espaços de atributos com baixa separabilidade entre as classes SSA, SSInt e SSI (Figura 4.16) e isso justifica a confusão gerada para estas classes no processo de classificação, conforme explicita a matriz de confusão da Tabela 4.6, em que o percentual de acerto de SSA, SSInt e SSI foi de 25,96%, 30,53% e 12,07%, respectivamente. O menor desempenho classificatório para este grupo de atributos foi para a classe SSI e o melhor foi para a classe AC, com 92,45% de acerto. CA apresentou comportamento radiométrico disperso, afetando o desempenho classificatório das classes AC, SP, FP, SSInt e SSI.

Tabela 4.6. Matriz de confusão dos atributos da Decomposição de Cloude-Pottier

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	58,70	0,48	0,00	12,63	13,79	0,00	0,00	5,66	6,00
	FP	0,00	91,81	74,04	23,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	5,78	25,96	33,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	1,93	0,00	30,53	74,14	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	0,00	0,00	0,00	12,07	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	86,08	9,17	1,89	0,00
	PL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,92	90,83	0,00	2,24
	AC	33,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,45	0,00
	SP	7,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,76

AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Integrado ao dado de coerência interferométrica, o grupo de atributos de Cloude-Pottier apresentou um valor de *Kappa* de 0,72 contra 0,70 da classificação apenas utilizando os atributos da referida decomposição. Conforme supracitado e apresentado na Tabela 4.5, esta diferença não foi estatisticamente significativa. Porém, analisando as matrizes de confusão nas Tabelas 4.6 e 4.7, com a integração da coerência observa-se que a classe SSA apresentou uma considerável melhora da capacidade discriminatória, passando de 25,96% para 92,31%; houve um aumento de cerca de 10% de amostras de CA corretamente classificadas; a classe SSI também apresentou uma melhora importante

com a associação da coerência. Registra-se uma diminuição do potencial discriminatório da classe FP e as demais classes não apresentaram mudança significativa com a integração da coerência interferométrica.

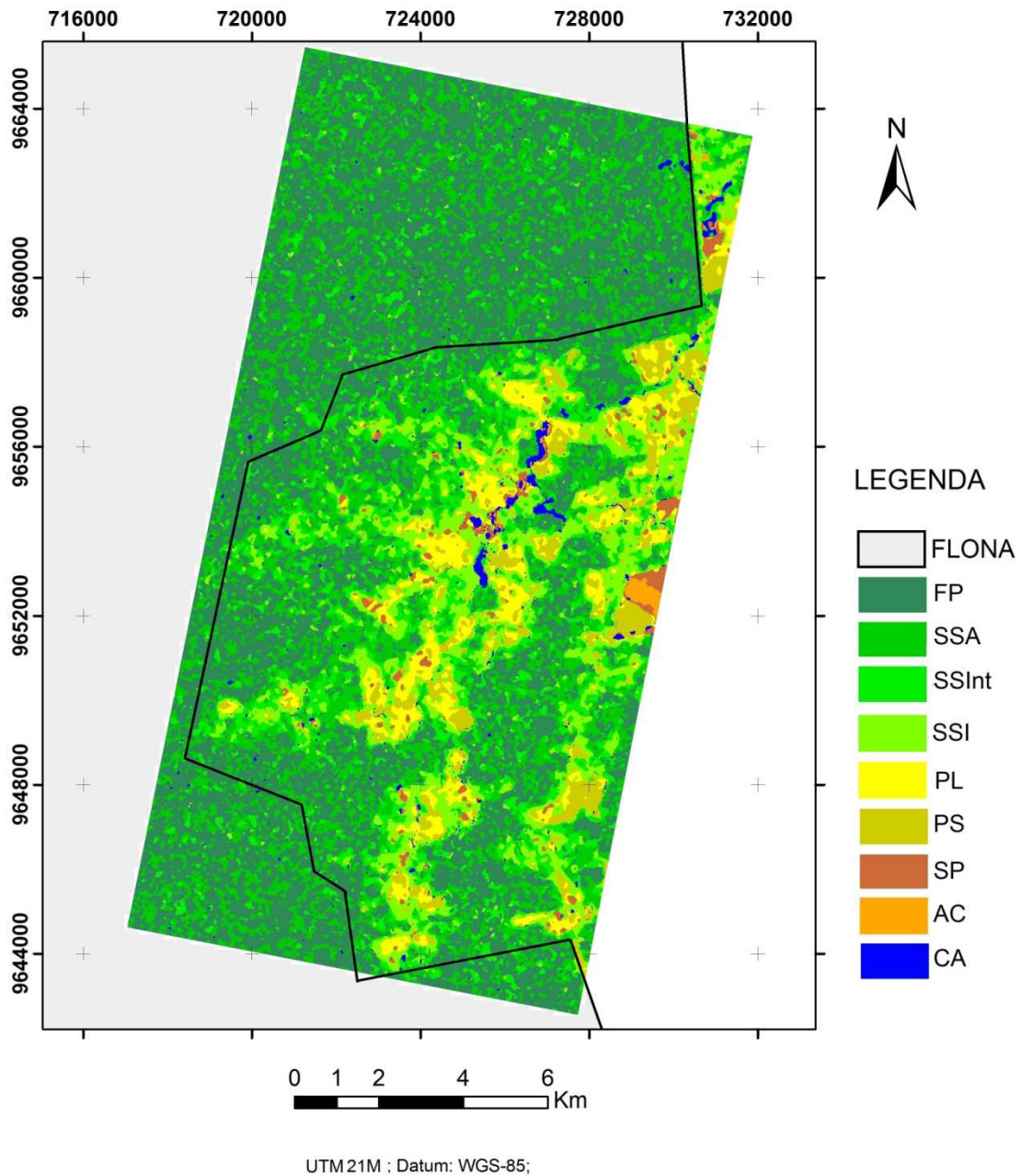
Tabela 4.7 - Matriz de confusão dos atributos da Decomposição de Cloude-Pottier combinada à Coerência Interferométrica

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	69,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	FP	0,00	79,61	7,69	10,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	18,62	92,31	51,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	1,77	0,00	31,58	68,97	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	0,00	0,00	1,05	31,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,00	0,00	0,00	5,26	0,00	84,81	6,42	1,89	0,00
	PL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,19	93,58	4,72	7,06
	AC	27,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	93,40	0,00
	SP	2,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,94

AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

O Mapa de Uso e Cobertura da Terra elaborado a partir do grupo de atributos de Cloude-Pottier é apresentado na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Mapa de Uso e Cobertura da área de estudo elaborado a partir da classificação de atributos Cloude-Pottier α , A e H da decomposição de Cloude-Pottier.



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Liesenberg e Gloaguen (2013) fizeram uso de medidas texturais e parâmetros polarimétrico (dentre os quais os atributos da decomposição de Cloude-Pottier - A, H e α) e interferométrico a partir de dados ALOS-1/PALSAR (*dual e quadri-pol*), nessa mesma região sob influência da Floresta Nacional do Tapajós, estabelecendo como legenda temática as classes de floresta primária, floresta ripária, sucessões secundárias avançada, intermediária e avançada, áreas de pastagem e corpos d' água. Por meio da classificação *Support Vector Machines* (SVM), de abordagem supervisionada não-paramétrica, revelaram que dados co-polarizados de banda L e os parâmetros de α/H são atributos importantes para discriminação de uso e cobertura da terra, servindo de *input* no processo de classificação de ambientes tropicais.

A contribuição da coerência interferométrica foi estatisticamente significativa para os grupos dos atributos de índices de Pope, coeficientes de retroespalhamento, Touzi e Yamaguchi. Dentre estes grupos de atributos, o grupo dos índices de Pope apresentou maior diferença significativa dos valores de *Kappa* após a integração da coerência, passando de 0,48 para 0,69, um acréscimo percentual de 43,75%. Comparando as matrizes de confusão apresentadas nas Tabelas 4.8 e 4.9, verifica-se o impacto positivo da coerência interferométrica na discriminação das classes FP, SSA, CA e SSI. Destaca-se o aumento do acerto de amostras da classe SSA, que passou de 18,27% para 81,73%, um percentual quatro vezes melhor; e da classe FP, que passou de 48,48% para 75,28% amostras corretamente classificadas. Esta melhora indica que a coerência interferométrica contribuiu para a melhora da discriminação das tipologias de vegetação nos modelos propostos por Pope, considerando ambientes de floresta primária e sucessão secundária. O espaço de atributos dos índices de Pope está ilustrado na Figura 4.18. O percentual de acertos das classes PS e PL não alteraram com a integração da coerência. Cerca de 36% das amostras de SSI foram classificadas como PS, indicando, portanto, similaridade radiométrica entre essas classes neste grupo de atributos. Esta similaridade pode ser explicada devido à classe PS incluir pasto sujo com presença de indivíduos de porte arbóreo como babaçu e inajá distribuídos de modo esparso.

Tabela 4.8 - Matriz de confusão da classificação do conjunto das imagens-índice BMI, VSI e CSI

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	64,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,24
	FP	0,00	48,48	78,85	25,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	12,84	18,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	38,52	2,88	72,63	32,76	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	0,16	0,00	2,11	31,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	2,17	0,00	0,00	0,00	36,21	62,03	33,03	0,00	0,00
	PL	20,29	0,00	0,00	0,00	0,00	37,97	66,97	5,66	0,00
	AC	13,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	94,34	0,00
	SP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,76

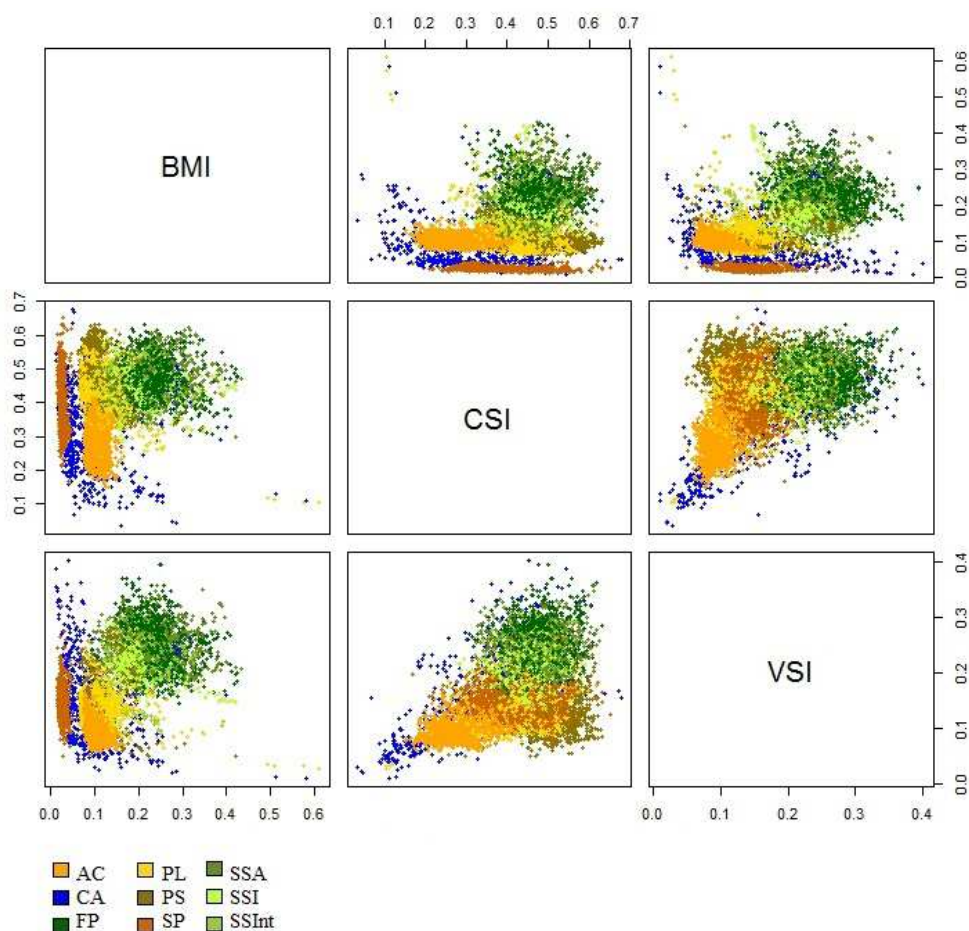
AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Tabela 4.9 - Matriz de confusão da classificação do conjunto das imagens-índice BMI, VSI e CSI combinado à coerência

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	78,26	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	FP	0,00	75,28	0,00	10,53	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	16,53	81,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	7,54	18,27	64,21	24,14	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	0,48	0,00	25,26	46,55	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	5,80	0,00	0,00	0,00	27,59	62,03	33,03	2,83	0,00
	PL	10,87	0,00	0,00	0,00	0,00	34,18	66,97	4,72	0,00
	AC	5,07	0,00	0,00	0,00	0,00	3,80	0,00	92,45	3,53
	SP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,47

AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Figura 4.18 - Espaço de atributos das imagens índice de vegetação (BMI, VSI e VSI) para as classes de uso e cobertura estudadas.

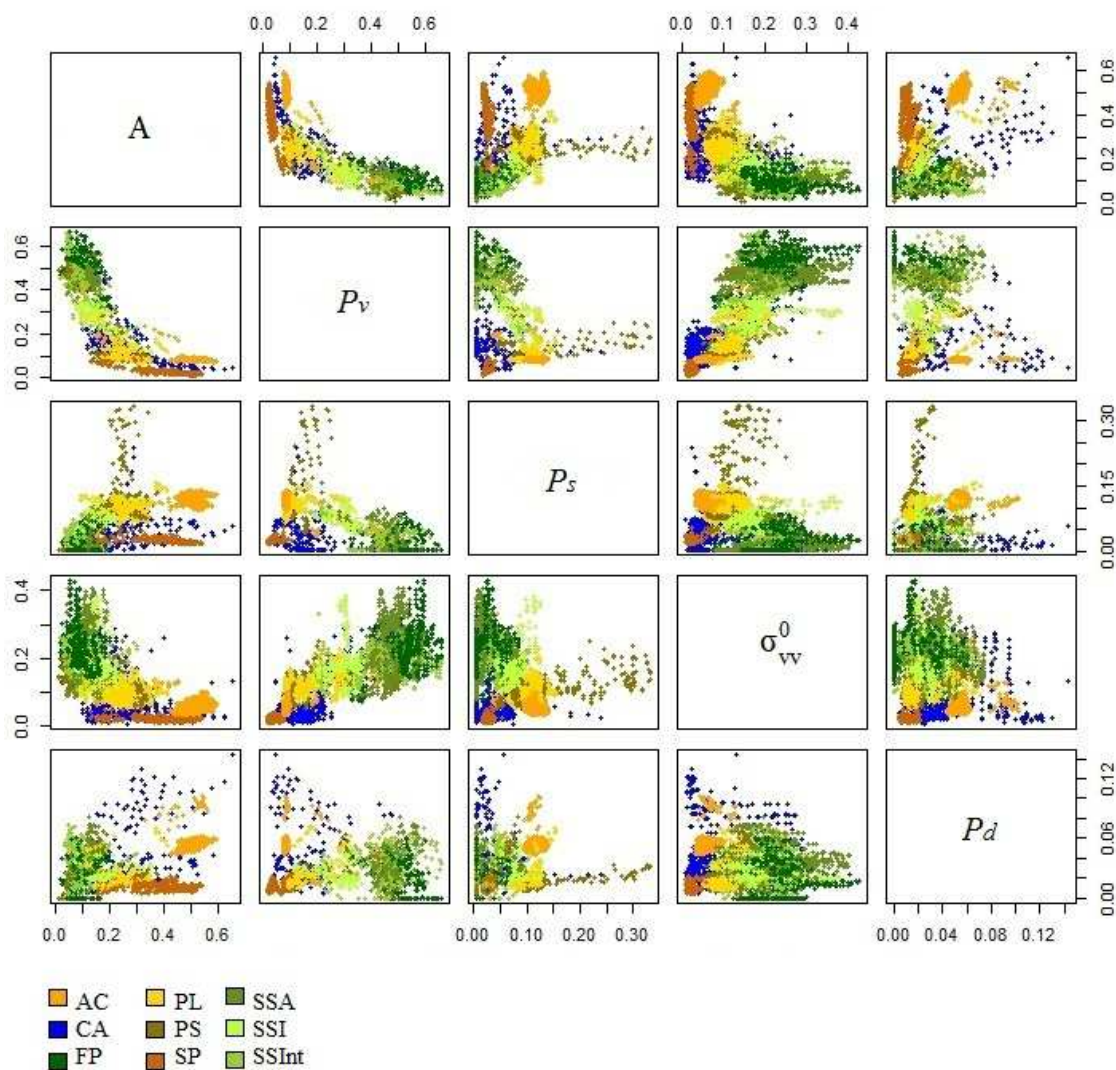


AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

A Figura 4.19 apresenta o espaço de atributos do subconjunto ótimo com o maior valor de *Kappa*. O par de atributos σ_{VV}^0 e P_v exibe um espaço de atributos com potencial discriminatório entre as diferentes sucessões florestais, porém, ainda apresenta confusão entre elas. Neste mesmo par, a classe CA apresenta comportamento radiométrico menos disperso com relação aos outros grupos de atributos, o que condiciona uma melhor classificação deste tipo de cobertura. A classe SP pode ser discriminada pelo par

Anisotropia (A) e Y_d . As classes SP, PL e AC apresentaram-se bem discriminadas neste espaço de atributos.

Figura 4.19 - Espaço de atributos do subconjunto 2 para as classes de uso e cobertura estudadas.



AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Considerando apenas os grupos polarimétricos (sem integração da coerência), o subconjunto ótimo apresentou o segundo melhor resultado depois da classificação a partir do grupo de Cloude-Pottier. A matriz de confusão do subconjunto ótimo (Tabela

4.10) revela bom desempenho classificatório de classes de sucessão florestal, exceto SSI, que apresentou percentual de acerto baixo (8,62%), com 77,59% das amostras classificadas erroneamente como SSInt e 12,07% como AC. A classe FP teve 36,6% de suas amostras classificadas como SSA e SSInt, indicando a similaridade radiométrica entre estas tipologias para este conjunto de atributos. A classe PS não apresentou bom desempenho classificatório, tendo 79,75% de suas amostras classificadas como PL. AC e SP apresentaram percentuais de acerto acima de 90%, alto potencial de discriminação conforme já indicava a análise do espaço de atributos.

Tabela 4.10 - Matriz de confusão da classificação do subconjunto ótimo.

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	85,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	FP	0,00	63,40	5,77	0,00	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	21,35	89,42	8,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	15,25	4,81	91,58	77,59	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	0,00	0,00	0,00	8,62	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,25	6,42	2,83	0,00
	PL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	79,75	91,74	3,77	2,35
	AC	14,49	0,00	0,00	0,00	12,07	0,00	1,83	93,40	0,00
	SP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,65

AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

Analisando as nove classes temáticas com relação aos resultados das classificações realizadas neste estudo (Tabela 4.11), observa-se que as classes CA, SSA e SSInt apresentaram melhor discriminação no subconjunto ótimo integrado à coerência. As classes PL, AC e SP foram mais bem discriminadas nos grupos de Freeman-Durden e subconjunto ótimo, ambos integrados à coerência interferométrica. As classes FP e PS exibiram melhor desempenho classificatório no grupo de atributos de Cloude-Pottier. A classe SSI apresentou maior dificuldade de discriminação considerando todas as classificações realizadas no estudo e foi o grupo de atributos de Freeman-Durden (com ou sem a integração da coerência) que exibiu maior capacidade de discriminar essa

classe. A Tabela 4.11 permite ainda analisar o impacto positivo da informação da coerência interferométrica nos grupos de atributos polarimétricos para a discriminação temática da área de estudo. Nota-se, na maioria dos grupos de atributos, melhora na discriminação das classes FP, SSA, SSI e CA com a integração da coerência.

Tabela 4.11 - Porcentagem de acertos de cada classe temática em cada conjunto de atributos.

	CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
σ^0	69,57	30,66	18,27	70,53	34,48	52,53	75,53	92,45	96,47
$\sigma^0 + \gamma$	78,26	61,16	45,19	60,00	37,93	54,43	71,56	100	96,47
CloudePottier	58,70	91,81	25,96	30,53	12,07	86,08	90,83	92,45	91,76
Cloude Pottier + γ	69,57	79,61	92,31	31,58	31,03	84,81	93,58	93,40	92,94
Freeman Durden	78,26	53,29	40,38	45,26	56,90	37,97	93,58	95,28	87,06
Freeman Durden + γ	78,99	58,59	42,31	47,37	56,90	37,97	100	100	100
Touzi	81,88	19,90	25,96	12,63	3,45	79,11	64,22	94,34	47,06
Touzi + γ	57,25	46,23	67,31	4,21	34,48	79,11	63,30	100	44,71
Yamaguchi	62,32	64,37	47,12	64,21	29,31	0,00	89,91	87,74	94,12
Yamaguchi + γ	73,91	72,07	52,88	55,79	32,76	0,00	99,08	89,62	100
Índices Pope	64,49	48,48	18,27	72,63	31,03	62,03	66,97	94,34	91,76
Índices Pope + γ	78,26	75,28	81,73	64,21	46,55	62,03	66,97	92,45	96,47
Subconjunto ótimo	85,51	63,40	89,42	91,58	8,62	20,25	91,74	93,40	97,65
Subconjunto ótimo + γ	89,86	68,86	95,19	100	8,62	18,35	100	100	100

γ = coerência interferométrica; AC = área cultivada; CA = corpo d'água; FP = floresta primária; PL = pasto limpo; PS = pasto sujo; SSA = sucessão secundária avançada; SSInt = sucessão secundária intermediária; SSI = sucessão secundária inicial; SP = solo em pousio ou preparado. Consultar Tabela 3.4 que esclarece sobre quais classes estão agrupadas nestas classes principais.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar a potencialidade de atributos polarimétricos PALSAR e de coerência interferométrica da missão TanDEM-X para caracterização de uso e cobertura da terra no domínio Amazônico.

A análise exploratória dos atributos polarimétricos extraídos da imagem PALSAR indicou que das decomposições os atributos de Touzi apresentaram menor contribuição na discriminação das classes identificadas na área de estudo. As maiores variabilidades entre as respostas das sucessões florestais (SSA, SSInt e SSI) foram encontradas nos atributos correlacionados à interação volumétrica como: P_v , Y_v , VSI e HVVH. Considerando as nove classes abordadas, P_v e Y_v foram os atributos que apresentaram maior potencial discriminatório.

Os procedimentos metodológicos utilizados para selecionar o subconjunto ótimo de atributos descrito na Seção 3.4 mostraram-se eficientes, considerando que este grupo apresentou alta capacidade de discriminação de seis das nove classes investigadas (CA, SSA, SSInt, PL, AC e SP) e o segundo melhor desempenho classificatório a partir dos grupos de atributos polarimétricos (sem integração da coerência interferométrica), considerando o valor de *Kappa* de 0,63. Recomenda-se que o processo de escolha das melhores combinações de atributos seja aplicado em conjunto com medidas de separabilidade entre classes, por meio de distâncias que avaliem o grau de superposição de funções de densidade e probabilidade das classes, indicando o quanto estas estão separadas no espaço de atributos.

Quanto às classificações sem associação da coerência interferométrica, o melhor desempenho de classificação foi obtido a partir do grupo da decomposição de Cloude-Pottier obtendo-se um valor de *Kappa* de 0,70. Este grupo de atributos integrado ao dado de coerência interferométrica resultou num valor de *Kappa* de 0,72, não apresentando diferença estatística significativa. Apesar disso, a análise detalhada da matriz de confusão indicou uma melhora na discriminação de três classes temáticas (SSA, SSI e CA) com a integração.

A coerência interferométrica contribuiu de modo estatisticamente significativo com a informação polarimétrica apresentada pelos grupos dos índices de Pope, coeficientes de retroespalhamento, Touzi, Yamaguchi e subconjunto ótimo para a discriminação temática de uso e cobertura da terra. A integração da coerência interferométrica em banda X aos atributos polarimétricos em banda L apresentou impacto positivo na discriminação de classes referentes floresta primária, sucessões secundárias avançada e inicial e corpos d'água.

Os atributos advindos dos teoremas de decomposição de alvos de Cloude-Pottier, Freeman-Durden e Yamaguchi para banda L do sensor PALSAR, apresentaram valores de *Kappa* mais altos e estatisticamente diferentes quando comparados ao *Kappa* obtido pelo grupo dos coeficientes de retroespalhamento, indicando a potencialidade dos teoremas de decomposição de alvos para estudos de uso e cobertura na terra na região amazônica. A análise foi realizada a um nível de confiança de 95%.

Para estudos futuros sugere-se que sejam realizados testes e análises dos efeitos das melhoras de engenharia do sensor PALSAR-2 com relação aos dados PALSAR-1 para as aplicações de estudos de uso e cobertura na região amazônica. Além da integração da coerência interferométrica da missão TanDEM-X com dados polarimétricos PALSAR, indica-se que sejam exploradas as medidas de textura deste dado em banda X como contribuição às informações coletadas em banda L e que se explore também coeficientes de correlação polarimétrica e razão de polarizações. Sugere-se ainda, a expansão dos testes utilizando outros teoremas de decomposição de alvos e outros classificadores, sobretudo aqueles baseados em regiões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, A. P.; BOERNER, W. M. Redevelopment of Kennaugh's target characteristic polarization state theory using the polarization transformation ratio for the coherent case. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n.1, p. 2-14, 1988.

ARAGÃO, L. E. O. C. **Modelagem dos padrões temporal e espacial da produtividade primária bruta na região do tapajós: uma análise multi-escala**. 283 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004-06-01 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/07.14.13.33>>. Acesso em: 16 fev. 2015.

ARAÚJO FILHO, M. C.; MENESES, P. R.; SANO, E. E. Sistema de classificação de uso e cobertura da terra com base na análise de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/310>>. Acesso em: 03 fev. 2015.

AZEVEDO, A. R.; SANTOS, J. R.; GAMA, F. F.; GRAÇA, P. M. L.; MURA, J. C. Caracterização de uso e cobertura da terra na Amazônia utilizando imagens duais multitemporais do COSMO-SkyMed. **Acta Amazônica**, v. 44, n. 1, p. 87 – 98, 2014. doi: <10.1590/S0044-59672014000100009>.

BALTZER, H. Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar (InSAR). **Progress in Physical Geography**, v. 25, n. 2, p. 159 - 177, jun. 2001.

BANCO MUNDIAL. Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**- relatório de síntese técnica. Washington D.C, 2010. 292 p.

BOERNER, W. M.; MOTT, H.; LÜNEBURG, E.; LIVINGSTONE, C.; BRISCO, B.; BROWN, R. J.; PATERSON, J. S.; CLOUDE, S. R.; KROGAGER, E.; LEE, J. S.; SCHULER, D. L.; VAN ZYL, J. J.; RANDALL, D.; BUDKEWITSCH, P.; POTTIER, E. Polarimetry in radar remote sensing: basic and applied concepts. In: LEWIS, A. J.; HENDERSON, F. M.; RYERSON, R. A. **Principles and applications of imaging radar**: manual of remote sensing. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, v.2, cap.5, 1998. p. 271-356.

BRASIL. **Decreto-lei nº 1.106, de 16.06.1970**. Cria o Programa de Integração Nacional, altera a legislação do imposto de renda das pessoas jurídicas na parte referente a incentivos fiscais e dá outras providências. Jus Brasil, Legislação, 1970. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/De1106.htm>. Acesso em: 09 nov. 2015.

CLOUDE, S. R. **Polarization**: applications in remote sensing. New York: Oxford University Press. 2009, 453 p.

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

COLTELLI, M.; DUTRA, L.; FORNARO, G.; FRANCESCHETTI, G.; LANARI, L.; MIGLIACCIO, M.; MOREIRA, J.; PAPATHANASSIOU, K.; PUGLISI, G.; RICCIO, D.; SCHWÄBISCH, M. SIR-C/X-SAR interferometry over Mt. Etna: DEM generation, accuracy assessment and data interpretation. **Journal of Geophysical Research: Planets** (1991–2012), v. 101, n. E10, 1996. p. 23127-23148.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 1999. 136 p.

CORREIA, A. H. **Projeto, desenvolvimento e avaliação de classificadores estatísticos pontuais e contextuais para imagens SAR polarimétricas**. 1998. 271 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.

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

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas, SP: Instituto de Geociências/UNICAMP, 1992.

DAMASCENO, B. C. Gipsita do Rio Cupari, região centro-oeste do Estado do Pará. **Série Oportunidades Minerais**. Belém: CPRM, n. 9, v.1, 2001. 27p.

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR). TanDEm X: **The Earth in three dimensions**. DLR: Germany, 2010. Disponível em: < http://www.dlr.de/hr/en/Portaldata/32/Resources/dokumente/broschueren/TanDEm-X_web_Brochure2010.pdf >. Acesso em: 01 dez. 2015.

DOBSON, M. C.; PIERCE, L. E.; ULABY, F. T. Knowledge-based land-cover classification using ERS- 1/JERS- 1 SAR composites. **IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, v. 34, n. 1, p. 83-99, jan. 1996.

DUBOIS, J. **Preliminary forest management guidelines for the National Forest of Tapajós**. Belém: FAO/PRODEPEF Northern Region, 1976. 41p.

ELLIS, E. **Land-use and land-cover change**. [S.l.]: The Encyclopedia of Earth, 2013. Disponível em: < <http://www.eoearth.org/view/article/51cbee4f7896bb431f696e92/> >. Acesso em: 03 fev. 2015.

FERREIRA, A. G. **Meteorologia prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. O. Estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de

imagens do sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5755-5762.

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.

FREITAS, C. C.; SANT'ANNA, S. J. S.; RENNO, C. D.; CORREIA, A. H. . **Utilização de imagens de radar de abertura sintética na classificação de uso e ocupação do solo.** São José dos Campos: INPE, 2007. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/ofigeo.PDF>> Acesso em: 28 jan. 2015.

FREITAS, M. W. D. ; SANTOS, J. R. ; ALVES, D. S. Land-use and land-cover change processes in the Upper Uruguay Basin: linking environmental and socioeconomic variables. **Landscape Ecology**, v. 28, 2013. p. 311-327.

GABOARDI, C. **Utilização de imagem de coerência SAR para classificação do uso da terra:** Floresta Nacional do Tapajós. 2002. 137 p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/marciana/2003/04.10.08.52>>. Acesso em: 26 fev. 2016.

GARCIA CORTES, C. E. **Análise de imagem polarimétrica TerraSAR-X para classificação de uso e cobertura da terra na porção sudoeste da Amazônia Brasileira.** 2011. 106 p. (sid.inpe.br/mte-m19/2011/02.16.20.25-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3978MU8>>. Acesso em: 26 fev. 2016.

GENS, R. **Quality assessment of SAR interferometric data.** 1998. 119 p. Doctoral Thesis - Technische Universität Hannover, 1998.

GOLDSTEIN, R.M., WERNER, C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications. **Geophysical Research Letters**. 25 (21), p. 4035-4038, 1998.

GOMES, A. R.; SADECK, L. W. R.; BRANDÃO, W. S. Mapping land use cover in Amazon region with COSMO SkyMed data. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM. MUNICH, 2012, Munich. **Proceedings...** Munich, Germany: IEEE Press, 2012. p. 6539-6540.

GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R.; TREAUHAFT, R. N. Stem volume of tropical forests from polarimetric radar. **International Journal of Remote Sensing**, v.32, n.2, 2011. p. 503-522.

HALDAR, D.; PATNAIK, C.; MOHAN, S; CHAKRABORTY, M. Jute and tea discrimination through fusion of sar and optical data. **Progress In Electromagnetics Research B**, v. 39, p. 337-354, 2012.

HELLMANN M. P. **SAR polarimetry tutorial**. Rennes, France: University of Rennes, 2001. 109p. Disponível em: <<http://epsilon.nought.de/>>. Acesso em: 13 jan. 2015.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars**. 3.ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1998.

HERNANDEZ FILHO, P.; SHIMABUKURO, Y. E. MEDEIROS, J.S.; ASSIS, O.R. **Relatório final do projeto de inventário florestal na Floresta Nacional do Tapajós**. São José dos Campos: INPE, 1993. 126p

HESS, L. L.; MELACK, J. M.; SIMONETT, D. S. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 7, 1990. p. 1313 – 1325.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Imagens PALSAR modo fine beam dual ortorretificadas da Amazônia Legal e região nordeste**. 2010. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/imagens_orbitais/ortoimagens/alos_palsar/leiname_palsar_fbd_orto.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de uso da terra**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. 91p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE (IBAMA). **Plano de manejo da Floresta Nacional de Tapajós**. Brasília: IBAMA, 2004. 580 p. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/imagens/stories/imgs-unidades-coservacao/flona_tapajoss.pdf> Acesso em: 25 jan. 2015.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Relatório de pesquisa: caracterização e análise da dinâmica da produção agropecuária na Amazônia - brasileira uma análise a partir do censo agropecuário 2006**. Brasília, 2013. Disponível em: < <http://www.ipea.gov.br/agencia/imagens/stories/PDFs/relatoriopesquisa/>>. Acesso em: 18 maio. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Série de dados de precipitação acumulada**. 2015. Disponível em: < http://www.inmet.gov.br/sim/gera_graficos.php>. Acesso em: 12 fev. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Tutorial de geoprocessamento: classificação de imagens**. São José dos Campos: INPE, 2012. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>> Acesso em: 28 jan. 2015.

JENSEN, J. J. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução José Carlos Neves Epiphany et al.. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JIN H., MOUNTRAKIS G., STEHMAN S.V. Assessing integration of intensity, polarimetric scattering, interferometric coherence and spatial texture metrics in PALSAR-derived land cover classification. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 98, 2014. p.70-84.

KOBAYASHI, S. S. OMURA, Y. ;SANGA-NGOIE, K. ; YAMAGUCHI, Y. ; WIDYORINI, R. ; FUJITA, M.S.; SUPRIADI, B. ; KAWAI, S. Yearly variation of acacia plantation forests obtained by polarimetric analysis of ALOS PALSAR data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 11, p. 5294 -5304, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7307934&newsearch=true&queryText=yamaguchi%20forest>>. Acesso em:01 dez. 2015.

KUPLICH, T.H ; SHIMABUKURO, Y.E.; SERVELLO, E.; SANO, E. Polarimetric signatures and classification of tropical land covers. IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2009, Cape Town. **Proceedings...** Cape Town: IEEE, 2009. P V-118 - V-121.

LAMBIN, E. F.; ROUNSEVELL, M. D. A.; GEIST, H. J. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 82, 2000. p. 321–331.

LAVALLE, M.; WRIGHT, T. **Absolute radiometric and polarimetric calibration of Alos Palsar Products**. 2009. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/sppa/documentation/alos/>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

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

LE TOAN, T.; PICARD, G.; MARTINEZ, J. M.; MELON, P.; DAVIDSON, M. . On the relationships between radar measurements and forest structure and biomass. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RETRIEVAL OF BIO- AND GEOPHYSICAL PARAMETERS FROM SAR DATA FOR LAND APPLICATIONS, 3., 2002, Sheffield, UK. **Proceedings...** Sheffield: ESA, 2002. p. 3-12.

LEE J.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging from basics to applications**. New York: CRC Press, 2009. 398 p.

LEE J., S. Refined filtering of image noise using local statistics. **Computer Graphics and Image Processing**, v.15, p. 380-389, 1981.

LEWIS, A. J.; HENDERSON, F. M. Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In: LEWIS, A. J.; HENDERSON, F. M.; RYERSON, R. A. **Principles and applications of imaging radar: manual of remote sensing**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998. v.2, cap.5, p. 271-356.

LIESENBERG, V.; GLOAGUEN, R. Evaluating SAR polarization modes at L-band for forest classification purposes in Eastern Amazon, Brazil. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 21, 2013. p. 122–135

LU, Z. Synthetic aperture radar interferometry coherence analysis over Katmai volcano group, Alaska. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 12, 1998. p. 887-894.

Disponível em:

<https://volcanoes.usgs.gov/activity/methods/insar/public_files/98JB02410.pdf>.

Acesso em: 10 nov. 2015.

LUCKMAN, A.; BAKER, J. WEGMÜLLER, U. Repeat-Pass Interferometric Coherence Measurements of Disturbed Tropical Forest from JERS and ERS Satellites. **Remote Sensing of Environment**, v. 73, set. 2000. p. 350-360.

MADSEN, S. N.; ZEBKER, H.A. Imaging radar interferometry. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars**. 3.ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1998.

MAHMOUD, A.; BUCHROITHNER, M. TerraSAR-X and ALOS/PALSAR data application to land cover classification. **EARSeL**, 2011. Disponível em: <<http://kartographie.geo.tu-dresden.de/aigaion/attachments/EarselAliMahmoud.pdf-e9ceb2d605a7f345fd3d8124d828e01a.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2015.

MATHER, P.; TSO, B. **Classification methods for remotely sensed data**. Boca Raton, Florida: CRC press, 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Fundo Amazônia**. 2008. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/_arquivos/fundo_amazonia_2008_95.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2016.

NARVAES, I. S. **Avaliação de dados SAR polarimétricos para estimativa de biomassa em diferentes fitofisionomias de florestas tropicais**. 2010. 190 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. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3837N9S>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

NASA. **Landsat File Formats**. [S.l.]: NASA, 2014. Disponível em: <<https://imagineer.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 19 jan. 2015.

NEGRI, R. G. **Avaliação de dados polarimétricos do sensor ALOS PALSAR para classificação da cobertura da terra da Amazônia**. 2009. 170 p. (INPE-16220-

TDI/1541). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos : INPE, 2009. 170p. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35AKRR5>>. Acesso em: 26 fev. 2016.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São José dos Campos: Editora Edgar Blücher, 1989. 308p.

PARÁ. **Boletim agropecuário do Estado do Pará 2015**. Belém: Fapespa, 2015. Disponível em: < <http://www.fapespa.pa.gov.br/> > Acesso em: 25 jan. 2015.

PAPATHANASSIOU, K. P. **Polarimetric SAR interferometry.Oberpfaffenhofen..** Doctoral Thesis - Technische Universität Graz, 1999. 131 p.

PEREIRA, L. O.; SILVA, A. E. P.; NEGRI, R. G.; SANT'ANNA, J. S.; DUTRA, L. V.; FREITAS, C. C. ERTHAL, G. J. Análise comparativa dos métodos de classificação SVM e Maxver-ICMPolarimétrico em imagem de radar ALOS PALSAR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 15., 2011, Curitiba, PR, maio de 2011. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0975.pdf>> Acesso em: 28 jan. 2015.

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, 1994. p. 205 - 219.

RADAMBRASIL. **Folha SA.21-Santarém: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1976. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv24027.pdf>> Acesso em: 25 jan. 2015.

RANEY, R. K. Radar fundamentals: technical perspective. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. (Eds.). **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars**. 3.ed. New York, NY: John Wiley & Sons, pp 09 - 130, 1998.

REIGBER, A. **SAR interferometry: an introduction**. Rennes, France: University of Rennes, 2001. Disponível em: <<http://epsilon.nought.de/>>. Acesso em: 13 jan. 2015.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing with Imaging Radar**. Berlim: Springer, 2009. 361 p.

ROCCA, F.; PRATI, C.; FERRETTI, A. **An overview of SAR interferometry**.2014. Disponível em: <<https://earth.esa.int/workshops/ers97/program-details/speeches/rocca-et-al/>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

ROSA, R. G. S. **Filtragem de ruído speckle em imagens clínicas de ecografia**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Médica) - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, 2012. Disponível em: < <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/8012>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

SAATCHI, S.; MARLIER, M.; CHAZDON, R. L.; CLARK, D. B.; RUSSEL, A. E. Impact of sáial variability of tropical forest structure on radar estimation of aboveground biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 11, p. 2836 - 2849, 2011.

SANT'ANNA, S. J. S. **Avaliação do desempenho de filtros redutores de speckle em imagens e radar de abertura sintética**. 1995. 210p. (INPE-6125-TDI/586).Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YD6/GPczH>>. Acesso em: 26 fev. 2016.

SANTITAMNONT, P. **Interferometric SAR processing for topographic mapping**. Hannover. Doctoral Thesis - Technische Universität Hannover, 1998. 105 p. Disponível em: <<http://www.opengrey.eu/item/display/10068/256396>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

SARMAP. **SARscape tutorial page**. Switzerland: sarmap SA, 2009. Disponível em: <<http://www.sarmap.ch/pdf/SARscapeTechnical.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

SARTORI, L. R.; IMAI, N. N.; MURA, J. C.; NOVO, E. M. L. M.; SILVA, T. S. F. Mapping macrophyte species in the Amazon floodplain wetlands using fully polarimetric ALOS/PALSAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 12, p. 4717 – 4728, 2011.

SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR radiometric and geometric calibration. **IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing**, v. 47, n. 12, Dec., 2009.

SILVA, C. V. J. **Caracterização florístico-estrutural e modelagem de biomassa na floresta amazônica a partir de dados ALOS/PALSAR e TERRASAR/TANDEM-X**. 2014. 157 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.17.19.53-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G66UN5>>. Acesso em: 26 fev. 2016.

SILVA, D. L. A.; SCOFIELD, G. B.; NETA, S. R. A.; NEGRI, R. G.; DUTRA, L. V.; FREITAS, C. C. Utilização de imagens de coerência interferométrica em banda L para classificação de cobertura da terra na região de Tapajós-PA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, Brasil, 25-30 abril **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7489-7496.

SILVA, R. D.; GALVAO, L. S.; SANTOS, J. R.; SILVA, C. V. J.; MOURA, Y. M. Spectral/textural attributes from ALI/EO-1 for mapping primary and secondary tropical forests and studying the relationships with biophysical parameters. **GIScience and Remote Sensing**, v. 1, 2014. p. 1-18.

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.

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

ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. **Microwave remote sensing: active and passive**. v. I - Microwave remote sensing fundamentals and radiometry. Norwood, MA: Artech House, 1981. 376 p.

ULABY, F.T.; ELACHI, C. **Radar polarimetry for geoscience applications**. Norwood: Artech house, 1990. 364p.

VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management**. 1997. 330p. Doctoral Thesis - Wageningen Agricultural University, The Netherlands (Wageningen Agricultural University), Tropenbos-Guyana Series 5, 1997. 330 p. Disponível em: <<http://www.tropenbos.org/publications/>>. Acesso em: 13 nov. 2015.

VIEIRA, P. R. **Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR**. São José dos Campos. 1996. 251p. 1996.(INPE-6124-TDI/585). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: INPE, 1996. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YD6/GPcvt>>. Acesso em: 26 fev. 2016.

VIEIRA, P.R.; YANASSE, C.C.F.; FRERY, A.C.; SANT' ANNA, S.J.S. Um sistema de análise e classificação estatísticas para imagens SAR. In: IMAGE PROCESSING TECHNIQUES, FIRST LATINO-AMERICAN SEMINAR ON RADAR REMOTE SENSING, 1., 1996, Buenos Aires. **Proceedings...** Paris, ESA, 1997, p. 170–185.

WATANABE, M.; MOTOHKA, T.; SHIRAIISHI, T.; THAPA, R. B.; YONEZAWA, C.; NAKAMURA, K.; SHIMADA, M. Multitemporal Fluctuations In L-Band Backscatter From A Japanese Forest. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 53, n. 11, 2015.

WEGMÜLLER, U.; WERNER, C. Retrieval of vegetation parameters with SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 1, Jan. 1997, p. 18- 24.

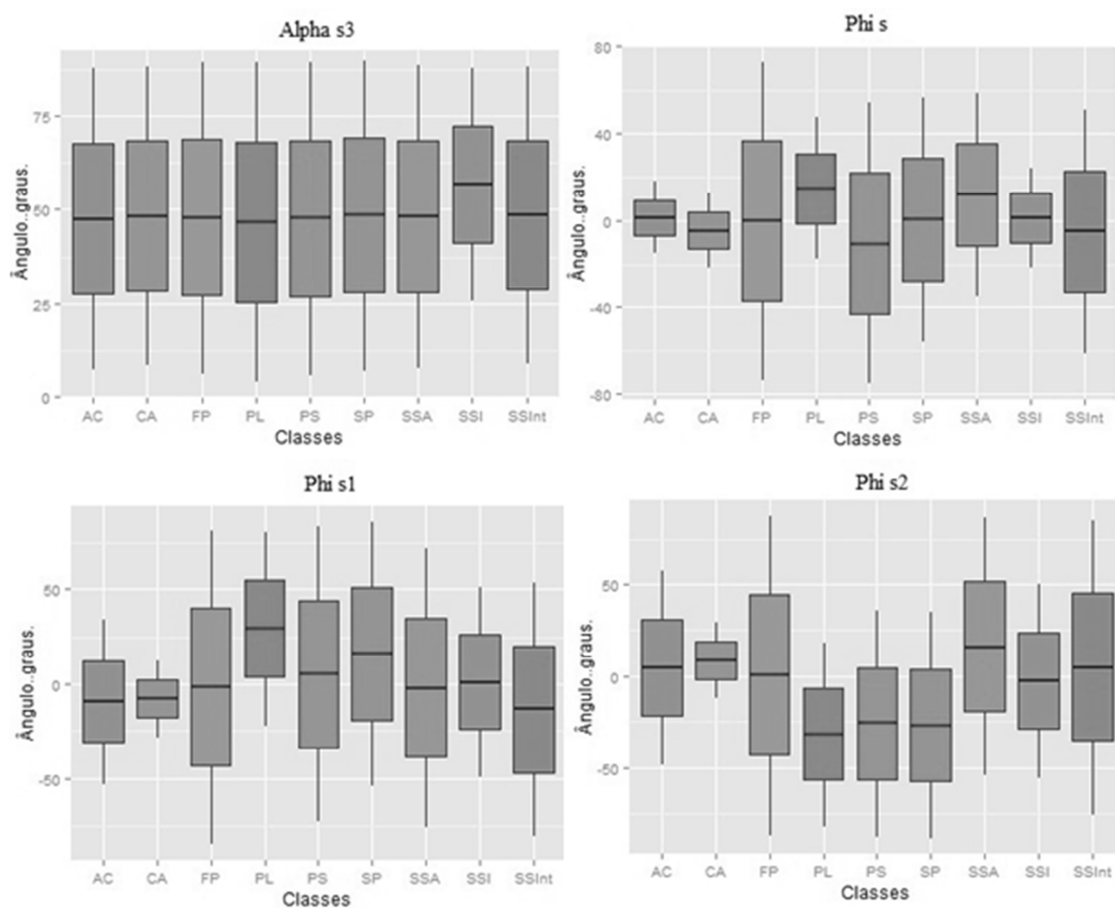
WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing**. Boca Raton: Taylor & Francis Group CRC Press, 2006. 370 p.

YAMAGUCHI, Y.; MORIYAMA, T.; ISHIDO, M.; YAMADA, H. Four-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Image Decomposition. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 43, n. 8, 2005. p. 1699-1706.

APÊNDICE A - *BOXPLOTS* DOS ATRIBUTOS POLARIMÉTRICOS

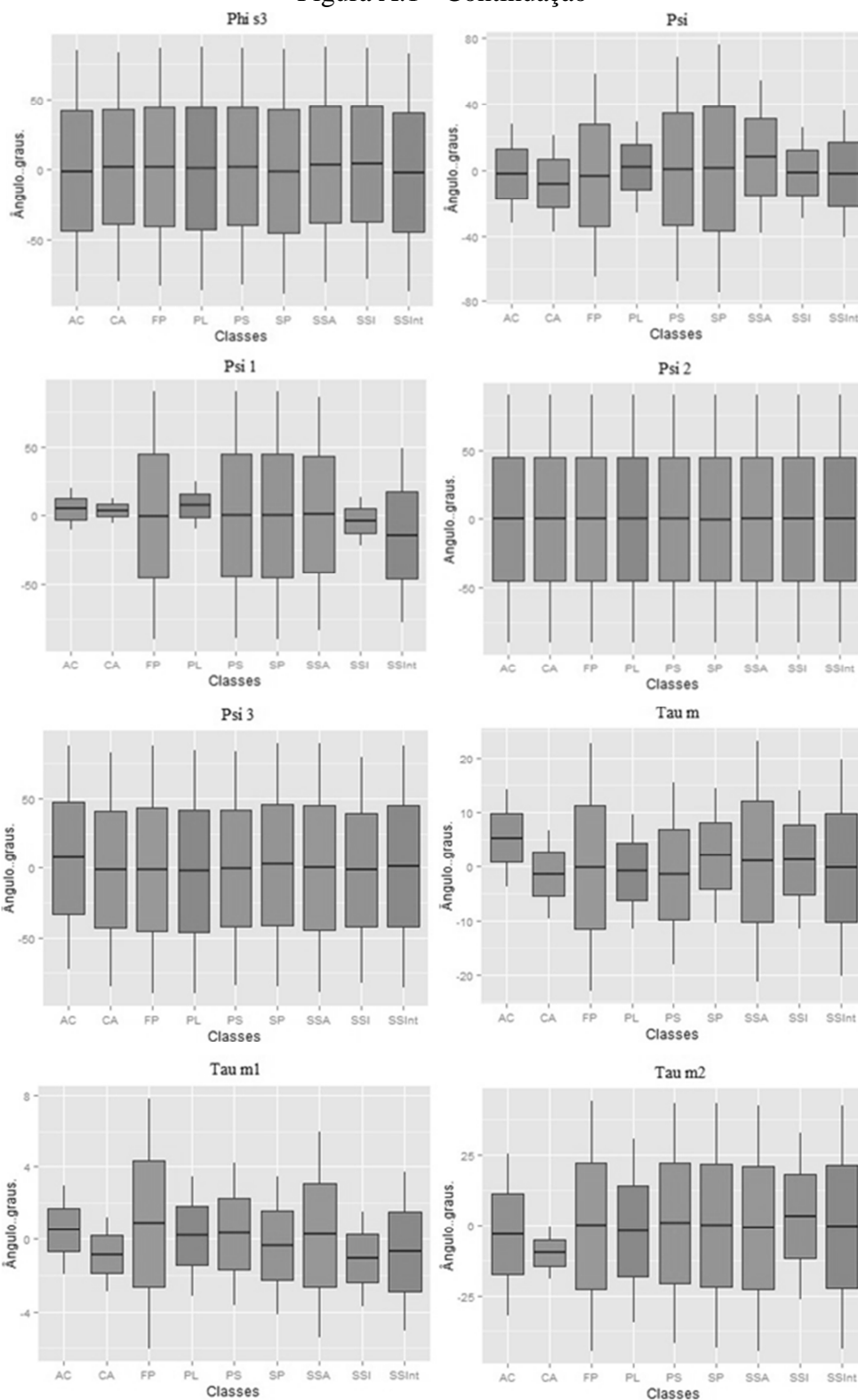
Abaixo são apresentados os gráficos *boxplots* dos atributos que foram previamente excluídos segundo metodologia descrita na Seção 3.4, sendo eles: o atributo de espalhamento superficial da decomposição de Yamaguchi (Y_s); e da decomposição de Touzi, o ângulo α do terceiro autovetor (α_{s3}), fase do tipo de espalhamento médio Φ e dos autovetores Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , helicidade média τ_s e dos autovetores τ_{s1} , τ_{s2} , τ_3 e ângulo de orientação médio Ψ_s dos autovetores Ψ_{s1} , Ψ_{s2} , Ψ_{s3} .

Figura A.1 - Gráficos *boxplots* dos atributos com baixo potencial discriminatório



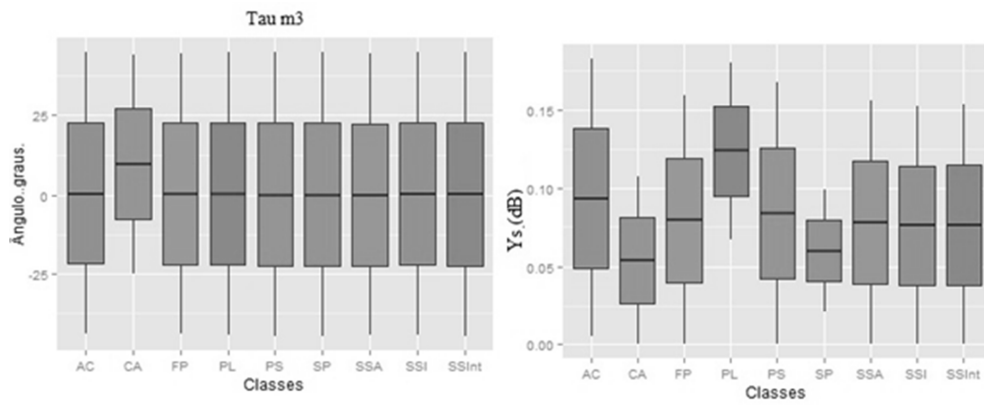
(Continua)

Figura A.1 - Continuação



(Continua)

Figura A.1 - Conclusão



APÊNDICE B - MATRIZES DE CONFUSÃO DAS CLASSIFICAÇÕES

Neste apêndice são apresentadas as matrizes de confusão das classificações dos conjuntos de atributos de decomposição e retroespalhamento.

Tabela B.1 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Freeman-Durden

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	78,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	FP	0,00	53,29	29,81	15,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	29,53	40,38	24,21	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	11,72	29,81	45,26	41,38	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	5,46	0,00	14,74	56,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,97	0,00	0,00	0,00
	PL	2,90	0,00	0,00	0,00	0,00	62,03	93,58	4,72	7,06
	AC	18,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,42	95,28	5,88
	SP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,06

Tabela B.2 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Freeman-Durden integrado à coerência interferométrica

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	78,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	FP	0,00	58,59	17,31	10,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	23,27	42,31	28,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	18,14	40,38	47,37	43,10	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	0,00	0,00	13,68	56,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	37,97	0,00	0,00	0,00
	PL	6,52	0,00	0,00	0,00	0,00	62,03	100,00	0,00	0,00
	AC	13,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
	SP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Tabela B.3 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Yamaguchi

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	62,32	0,00	0,00	0,00	1,72	0,00	0,00	12,26	0,00
	FP	0,00	64,37	4,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	14,93	47,12	35,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	20,71	38,46	64,21	67,24	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	0,00	9,62	0,00	29,31	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,26	0,00	0,00
	PL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	89,91	0,00	5,88
	AC	37,68	0,00	0,00	0,00	1,72	0,00	1,83	87,74	0,00
	SP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	94,12

Tabela B.4 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Yamaguchi integrado à coerência interferométrica.

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	73,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,38	0,00
	FP	0,00	72,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	11,72	52,88	44,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	16,21	31,73	55,79	67,24	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	0,00	15,38	0,00	32,76	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	0,00	0,00
	PL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	99,08	0,00	0,00
	AC	25,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89,62	0,00
	SP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

Tabela B.5 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Touzi.

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	81,88	6,42	20,19	26,32	29,31	0,00	0,00	0,00	0,00
	FP	0,00	19,90	26,92	18,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	13,00	25,96	33,68	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	26,97	4,81	12,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	7,70	5,77	4,21	3,45	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,00	5,46	0,00	4,21	0,00	79,11	34,86	0,00	0,00
	PL	0,00	2,41	1,92	0,00	0,00	20,89	64,22	5,66	0,00
	AC	6,52	8,19	7,69	0,00	17,24	0,00	0,00	94,34	52,94
	SP	11,59	9,95	6,73	0,00	48,28	0,00	0,92	0,00	47,06

Tabela B.6 - Matriz de confusão da classificação do grupo de atributos da Decomposição de Touzi integrado à coerência interferométrica.

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	57,25	11,40	2,88	0,00	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00
	FP	0,00	46,23	0,96	6,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	9,79	67,31	46,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	12,68	0,00	4,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	5,07	4,98	10,58	30,53	34,48	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,00	3,37	0,00	12,63	0,00	79,11	35,78	0,00	0,00
	PL	0,00	1,44	2,88	0,00	0,00	20,89	63,30	0,00	0,00
	AC	18,12	2,73	6,73	0,00	17,24	0,00	0,00	100,00	55,29
	SP	19,57	7,38	8,65	0,00	46,55	0,00	0,92	0,00	44,71

Tabela B.7 - Matriz de confusão da classificação do grupo dos coeficientes de retroespalhamento σ_{HH} , σ_{HV} e σ_{VV}

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	69,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	FP	0,00	30,66	50,96	13,68	6,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	11,08	18,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	53,77	30,77	70,53	22,41	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	4,49	0,00	15,79	34,48	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	1,45	0,00	0,00	0,00	36,21	52,53	24,77	0,00	0,00
	PL	20,29	0,00	0,00	0,00	0,00	47,47	75,23	0,00	0,00
	AC	8,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,45	3,53
	SP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,47

Tabela B.8 - Matriz de confusão da classificação do grupo dos coeficientes de retroespalhamento σ_{HH} , σ_{HV} e σ_{VV} integrado à coerência interferométrica.

		REFERÊNCIA (%)								
		CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CLASSIFICAÇÃO (%)	CA	78,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	FP	0,00	61,16	1,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSA	0,00	18,46	45,19	9,47	6,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSInt	0,00	20,39	52,88	60,00	20,69	0,00	0,00	0,00	0,00
	SSI	0,00	0,00	0,00	30,53	37,93	0,00	0,00	0,00	0,00
	PS	0,72	0,00	0,00	0,00	34,48	54,43	28,44	0,00	0,00
	PL	20,29	0,00	0,00	0,00	0,00	45,57	71,56	0,00	0,00
	AC	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	3,53
	SP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,47