



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.26.01.47-TDI

DADOS POLARIMÉTRICOS DO RADARSAT-2 (BANDA C) NA DISCRIMINAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA NA REGIÃO DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS

Emerson Luiz Servello

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Tatiana Mora Kuplich, e Yosio Edemir Shimabukuro,
aprovada em 30 de agosto de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38FNABP> >

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLISHED BY:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

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

Membros:

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

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

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

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.26.01.47-TDI

DADOS POLARIMÉTRICOS DO RADARSAT-2 (BANDA C) NA DISCRIMINAÇÃO DE USO E COBERTURA DA TERRA NA REGIÃO DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS

Emerson Luiz Servello

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Tatiana Mora Kuplich, e Yosio Edemir Shimabukuro,
aprovada em 30 de agosto de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38FNABP> >

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Se69d Servello, Emerson Luiz.
Dados polarimétricos do RADARSAT-2 (banda C) na discriminação de uso e cobertura da terra na região da Floresta nacional do Tapajós / Emerson Luiz Servello. – São José dos Campos : INPE, 2010.
xxii+ 71 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.26.01.47-TDI)

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

Orientadores : Drs. Tatiana Mora Kuplich, e Yosio Edemir Shimabukuro.

1. Polarimetria SAR. 2. Banda C. 3. Floresta tropical. 4. Tapajós. 5. Classificação supervisionada. I.Título.

CDU 528.873

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dra. Corina da Costa Freitas



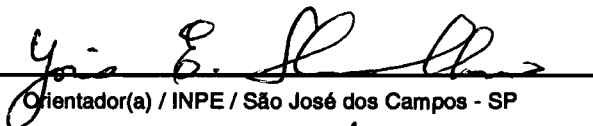
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Tatiana Mora Kuplich



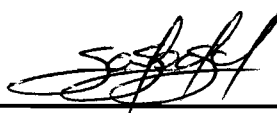
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro



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

Dr. Edson Eyji Sano



Convidado(a) / EMBRAPA / Brasília - DF

Aluno (a): Emerson Luiz Servello

São José dos Campos, 30 de agosto de 2010

"Existem verdades que a gente só pode dizer depois de ter conquistado o direito de dizê-las".

Jean Cocteau

A Deus, familiares, amigos e mestres.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a minha família, e a minha namorada, pelo apoio incondicional em todos os momentos da dissertação.

Ao Dr. Atílio A. Disperati e ao Dr. João Roberto dos Santos pelos primeiros passos na pesquisa.

Aos meus orientadores, Dra. Tatiana Mora Kuplich, pelos ensinamentos transmitidos, apoio e incentivo que nos fizeram inovar e investir em idéias, e ao Dr. Yosio Edemir Shimabukuro, pela instrução e manutenção do trabalho.

Um agradecimento mais que especial a todos os amigos da PG-SERE 2008! Afinal, rimos, choramos, suamos, e enfim conquistamos nossos objetivos. Diante das adversidades, os amigos que fizemos nos brindaram com sorrisos e tornaram a estadia no INPE (SJC/SP e Santa Maria/RS), agradável e satisfatória.

Este trabalho só pode ser conclusivo com a colaboração de parceiros. Dentre eles:

- DSR-INPE, pela oportunidade no mestrado;
- CNPQ por conceder a bolsa ao longo do Curso;
- Embrapa Cerrados, na pessoa do pesquisador Dr. Edson Eyji Sano, por viabilizar o trabalho de campo no ano de 2008;
- RADARSAT-2 por disponibilizar as imagens utilizadas neste estudo;
- SPOT image, em Cayene/Guiana Francesa, por ceder imagens SPOT da Floresta Nacional do Tapajós;
- Funcionários do INPE, sobretudo os funcionários da secretaria PG-SERE, os seguranças e, sem sombra de dúvidas, a moça do cafezinho!
- Centro Regional Sul – CRS – INPE em Santa Maria/RS, minha segunda casa ao longo do mestrado. Lá a família de grandes amigos aumenta.

A todos, um caloroso abraço de agradecimento.

Obrigado!

RESUMO

O Brasil é pioneiro em programas de monitoramento de floresta tropical, tais como o PRODES e DETER. No entanto, estes programas utilizam imagens de sensores ópticos, sujeitos à cobertura de nuvens. Justifica-se assim o interesse em empregar dados de radar no monitoramento de florestas. Portanto, busca-se com esta dissertação estudar o comportamento da radiação, Banda C, proveniente do sensor SAR RADARSAT-2 aplicado ao monitoramento de uso e cobertura do solo na Floresta Nacional do Tapajós e entorno. Para atender este propósito o trabalho foi dividido em três partes: (i) análise preliminar dos dados SAR; (ii) classificação dos dados com mudança de base polarimétrica; e (iii) análise temporal das imagens SAR nos anos de 2008 e 2009. A análise preliminar empregando gráficos de análise de fase, coeficiente de correlação e fração de polarização revelaram o grau de espalhamento da onda e o potencial das imagens no tratamento por mudança de base. As maiores contribuições para a despolarização da onda vieram das classes pastagem e floresta. Esta informação foi validada na segunda etapa da pesquisa, ao se aplicar a estatística kappa nas classificações das seguintes imagens: a) modo normal completa em polarizações conforme adquirida, b) com novos valores de elipticidade (E), e orientação (O) (E45O0, e E30O45); e c) imagens com polarizações HH e HV. A polarização HH apresentou resultado superior às demais classificações. Ao empregar as imagens polarimétricas num contexto temporal, o uso de imagens RADARSAT-2, em primeira instância, foi viável no estudo de mudança no uso e cobertura do solo em escala regional. No entanto apresentou limitações quanto à ocorrência de precipitação no ato da aquisição dos dados bem como em áreas com variações abruptas de relevo. Esta dissertação apresentou avanços na disponibilização de informações e características da banda C, em resposta à vegetação de porte arbóreo, assim como algumas coberturas da terra de ocorrência frequente em floresta tropical. Os resultados mostraram uma metodologia de uso da polarimetria por mudança de base para a identificação de classes de uso e cobertura do solo. Este campo de pesquisa ainda deve ser explorado, com a investigação das demais técnicas e ferramentas para a identificação de classes e variáveis da vegetação a partir de dados polarimétricos em banda C.

**RADARSAT-2 SAR POLARIMETRIC DATA (C BAND) APPLY TO
LANDCOVER AND LAND USE DISCRIMINATION ON FLORESTA
NACIONAL DO TAPAJÓS REGION**

ABSTRACT

Brazil is a pioneer in forest monitoring programs, such as PRODES and DETER. However, these programs use images from optical sensors, subject to cloud cover. Thus, the interest in employing radar data for monitoring forests was justified. This dissertation seeks the study of C-band SAR data, from RADARSAT-2, to monitor land use and land cover in the Tapajos National Forest and surrounding areas. To serve this purpose, the work was divided into three parts: (i) preliminary analysis of SAR data; (ii) classification of data with a change of the polarimetric basis; and (iii) temporal analysis of SAR images from years 2008 and 2009. Preliminary analysis using phase graphical analysis, correlation coefficient and polarization fraction revealed the degree of scattering of the wave and the potential for the treatment of images by changing the base. The results showed that the largest contributions to the depolarized wave came from forest and pasture classes. This information has been validated at the second stage of the research, by applying the Kappa statistics scores for analyzing the classification of the following images: a) Normal mode in complete polarization, b) with new values of ellipticity (E) and orientation (O) (E45O0, and E30O45); and c) images with HH and HV polarizations. The accuracy of the HH polarization was higher than the other classifications. By employing the polarimetric images in a temporal context, the use of Radarsat-2 images was feasible for the study of land use and land cover change at regional scales. However, it has presented limitations regarding the occurrence of precipitation at the time of data acquisition as well as in areas with abrupt changes in relief. This thesis presented advances in providing information and characteristics of C-band in response to the vegetation, as well as in response to some land covers of frequent occurrence in tropical forest areas. The results showed a methodology to use the polarimetry by changing the basis for the identification of classes of land use and cover. This field of research remains to be explored, with research into other techniques and tools for identifying classes and vegetation variables from polarimetric C band data.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 - Localização da área de estudo. Em (a) Brasil, (b) Estado do Pará, (c) composição colorida Landsat-5/TM 3R4G2B, com detalhe das cenas RADARSAT-2 estudadas; e (d) o modelo de elevação da região.	6
Figura 2.2 - Precipitação diária no mês de setembro de 2008 (período de aquisição das cenas no ano de 2008). O destaque indica o dia da aquisição das imagens.	7
Figura 2.3 - Precipitação diária durante o mês de outubro de 2009 (período de aquisição das cenas no ano de 2009). O destaque indica o dia da aquisição da imagem.	8
Figura 3.1 – Cenas RADARSAT-2, em composição colorida, adquiridas em setembro de 2008 e outubro de 2009.	12
Figura 4.1 - Representação dos mecanismos de espalhamento na banda C (~5,6cm), em contraste aos mecanismos apresentados pela banda L (~23cm) e banda X (~3cm).	14
Figura 3.2 - Resposta polarimétrica normalizada em σ^0 co-polarizada de classe pastagem.	17
Figura 4.3 - Elipse de polarização de uma onda plana monocromática que se propaga nos campos x e y, cujos parâmetros variam de acordo com a elipticidade (χ), orientação (ψ) e amplitude (A), em um eixo de propagação z(t).	18
Figura 4.4 - Pontos amostrais para a tomada de assinaturas espectrais e alocação de algumas classes de cobertura do solo em imagem HH.	21
Figura 4.5 - Respostas Polarimétricas co- e cross- polarizadas para os objetos estudados.	24
Figura 4.6 - Fração de polarização para as classes de uso e cobertura da terra.	27
Figura 4.7 - Diferença de fase HH/VV para os pixels amostrados por classe de uso da terra.	29

- Figura 4.8 - Síntese de polarização com mudança de elipse da imagem original para imagens simuladas. (a) imagem original composição R(VV) G(HV+VH/2) B(HH), (b) imagem simulada $\psi = 0^\circ$ com $\chi = 45^\circ$, composição R(VV) G(HV+VH/2) B(HH) representando uma polarização elíptica à direita; e (c) imagem simulada $\psi = 45^\circ$ com $\chi = 30^\circ$, composição R(VV) G(HV+VH/2) B(HH) representando uma polarização linear à 30° de inclinação. 31
- Figura 5.2 - Erro de comissão para a classe desmatamento ocasionado pelo sombreamento do relevo. Em (a), modelo digital de elevação SRTM, (b) imagem RADARSAT-2 2008 indicando os polígonos de não florestados classificados, e, (c) imagem Landsat-5 3R4G5B de agosto de 2008. Os detalhes indicam a ocorrência do erro de omissão. 52
- Figura 6.3 - Delimitação dos polígonos da classe não florestada. Em (a), imagem Radarsat-2 2008, em (b) imagem Radarsat-2 2009, (c) imagem Landsat TM 5. 54
- Figura 6.4 – Classificações de uso do solo. Apresentação dos resultados de classificação empregando multipolarizações e as polarizações individuais HH e VV nos anos de 2008 e 2009. Detalhe do efeito de relevo em imagem 2008. 56

LISTA DE TABELAS

	Pág
Tabela 2.1- Classes de uso do solo.	10
Tabela 4.1 - Intensidades de resposta do sinal observadas para as classes de uso da terra nas respostas polarimétricas. Fração de polarização e coeficiente de variação.	26
Tabela 6.1 - Evolução da cobertura florestal entre os anos de 2008 a 2009. ...	51
Tabela 6.2 - Matriz de classificação.	55
Tabela 6.3 – Índice kappa condicional obtido para as classes de uso do solo. As colunas indicam o valor kappa em um comparativo obtido nas classificações com imagem polarização completa (Full) e as polarizações simples nos anos de 2008 e 2009.....	57
Tabela 6.4 – Índice kappa e acurácia global das classificações.	58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DETER	Detecção de Desmatamento em Tempo Real
ERS	Earth Resouce Sattelite
FNT	Floresta Nacional do Tapajós
IAF	Índice de Área Foliar
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LBA	Large Scale Biosphere Atmosphere
POLSAR	Polarimetric SAR
RADARSAT	Radar Satellite
RP	Resposta Polarimétrica
SAR	Synthetic Aperture Radar

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Hipóteses.....	4
2 ÁREA DE ESTUDOS	5
2.1 Descrição das classes de uso e cobertura do solo.....	8
3 IMAGENS RADARSAT-2.....	11
4. ANÁLISE PRELIMINAR DE IMAGENS SAR POLARIMÉTRICAS E POTENCIAL DE APLICAÇÕES EM FLORESTAS TROPICAIS	13
4.1 Introdução	13
4.2 Breve conceito sobre resposta polarimétrica	15
4.3 Metodologia.....	20
4.4 Resultados.....	22
4.4.1 Respostas polarimétricas co- e cross-polarizadas	22
4.4.2 Informação de fase.....	28
4.4.3 Síntese de imagens SAR	30
4.5 Considerações	32
5 IDENTIFICAÇÃO DE CLASSES DE USO E COBERTURA DO SOLO EM FLORESTA TROPICAL POR MEIO DA TÉCNICA DE MUDANÇA DE BASE POLARIMÉTRICA	35
5.1 Introdução	35
5.2 Síntese de polarização	36
5.3 Modelo de classificação de Wishart.....	38
5.4 Metodologia.....	39
5.5 Resultados e discussão	41
5.6 Considerações	44

6	DETECÇÃO DE MUDANÇA NA COBERTURA DO SOLO EM FLORESTA TROPICAL: UMA ABORDAGEM COM DADOS POLARIMÉTRICOS	47
6.1	Introdução	47
6.1.1	Sistemas SAR em estudos sistemáticos de detecção de mudanças	48
6.2	Metodologia.....	50
6.3	Resultados e Discussão.....	51
6.3.1	Mudança na cobertura do solo entre os anos de 2008 e 2009.....	53
6.3.2	Mudança na cobertura como resposta a polarização.....	55
6.4	Conclusões.....	58
6.5	Considerações	59
7	CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E DIRETRIZES	61
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

Informações sobre as florestas tropicais, suas composições e funcionamento, são importantes objetos de pesquisas científicas na área ambiental. O papel desempenhado pelas florestas tropicais no ciclo do carbono tem sido decifrado com o auxílio de dados de sensoriamento remoto, mesmo que de maneira indireta, tal como a discriminação de diferentes níveis de biomassa florestal (GAMA, 2007). Dados sobre a vegetação tropical são necessários em praticamente todos os estudos que enfocam questões ambientais, desde simples mapas de vegetação, com o tipo de formação (incluindo a sua remoção no desmatamento), até o mapeamento de processos fisiológicos (como respiração e transpiração). O índice de área foliar (IAF), por exemplo, determina a intensidade dos fluxos de água e carbono da planta, sendo um indicador de processos como a produtividade primária da floresta. O mapeamento (ou espacialização) de variáveis florestais com suporte de dados de sensoriamento remoto pode auxiliar os modelos preditivos de produtividade da floresta, em diferentes escalas (ARAGÃO, 2004).

À medida que levantamentos sistemáticos de grandes áreas na superfície terrestre, como florestas tropicais, tornam-se necessários, deve-se considerar o uso de imagens adquiridas por Radares de Abertura Sintética (SAR – Synthetic Aperture Radar). Dados SAR orbitais na banda C, cujo comprimento de onda de 5,3 cm e frequência 5,6 Hz, foram fornecidos na última década, entre outros, por meio de programas espaciais da União Europeia e recentemente com o satélite canadense RADARSAT-2. Imagens SAR na banda C podem fornecer informações adicionais sobre o uso do solo, além do mapeamento de cobertura da terra (KASISCHKE et al, 1997). Na literatura, entretanto, encontram-se registros mais frequentes de uso das bandas L e P em estudos de mapeamento de uso e cobertura do solo (SANTOS et al., 2003; FREITAS et al. 2008).

Apesar dos primeiros estudos com polarização em dados de radar datarem dos anos 1950 (SINCLAIR, 1950, KENNAUGH, 1951, citados por BOERNER, 1998), a disponibilidade de dados SAR orbitais polarimétricos com informações adicionais de fase do sinal nas diferentes polarizações é relativamente recente. Estudos pioneiros com informações polarimétricas na banda C apresentaram bons resultados quando aplicados às áreas agrícolas (MACNAIM e BRISCO, 2004). Quando as classes são florestas, e emprega-se polarizações simples, os resultados apresentaram-se pouco significativos, devido à complexidade dos mecanismos de espalhamento (HOEKMAN e QUIÑONES, 2000). Alvos semelhantes podem apresentar espalhamentos distintos em função da geometria de aquisição no momento do imageamento. A identificação dos mecanismos de espalhamento em uma imagem SAR pode ser feita através de ferramentas de decomposição de alvos, sendo que identificar os mecanismos de espalhamento é um passo inicial na inferência dos alvos que constituem a cena.

No entanto, a complexidade da informação polarimétrica nem sempre torna estes dados operacionais. As metodologias para explorar dados SAR polarimétricos incluem um conjunto de acessórios para seu processamento, e necessitam do conhecimento e emprego adequado da informação fornecida por este tipo de dado. Os materiais de referência para polarimetria foram escritos na perspectiva da engenharia, sendo necessários relatos da experiência dos usuários na descrição dos dados e sua interação com a superfície terrestre (STAPLES e HORNSBY, 2002).

Dada a disponibilidade relativamente recente de dados orbitais SAR polarimétricos na banda C, existe a necessidade de testes para avaliar seu potencial para aplicações em florestas tropicais. Dentre as principais questões a cerca da aplicabilidade de sistemas SAR de banda C polarimétrica está: **Como a dinâmica de uso do solo, em regiões tropicais, influencia a resposta registrada por sensores SAR polarimétricos na banda C?**

Esta dissertação está organizada em 3 capítulos, que apresentam os 3 estudos realizados. A área de estudo e dados utilizados foram detalhados no capítulo 2, apesar de serem igualmente citados nos demais capítulos. O capítulo 3 apresenta a descrição das imagens utilizadas. O capítulo final apresenta as considerações relativas a toda à dissertação e se propõe a sintetizar o conhecimento adquirido neste trabalho.

O capítulo 4 desta dissertação apresenta uma análise quantitativa de mudanças de classes de uso e cobertura da terra por medições radiométricas em dados SAR, com ênfase nas respostas espectrais e análise de composição colorida. As conclusões deste capítulo foram empregadas no capítulo subsequente.

Deste modo, o capítulo 5 apresenta uma abordagem de uso de imagens SAR baseado em ferramentas de decomposição polarimétrica. Por meio da mudança da base polarimétrica da radiação espalhada, realizou-se o mapeamento, otimizando a identificação de classes, na FNT.

O capítulo subsequente (Capítulo 6) apresenta uma análise de detecção de mudança. Neste contexto, o capítulo explora uma perspectiva temporal dos dados polarimétricos de modo a identificar mudanças decorrentes do uso e cobertura do solo na região.

Cada capítulo constitui uma etapa para a resposta a pergunta científica e hipóteses mencionadas. Deste modo, os objetivos específicos foram divididos entre os capítulos, de modo a promover a resposta parcial à pergunta científica. Embora cada capítulo possua um corpo próprio, o foco permanece na resolução do problema fundamental apresentado.

1.1 Objetivos

Este trabalho possui o objetivo de mapear a cobertura da terra na Floresta Nacional do Tapajós e arredores, a partir da utilização de dados RADARSAT-2

polarimétricos, explorando ferramentas polarimétricas de classificação e decomposição de alvos.

Frente à complexidade de dados polarimétricos na banda C, constitui etapas deste trabalho os seguintes objetivos específicos:

- a) Estudar as assinaturas polarimétricas na banda C frente às diferentes coberturas da terra em área de floresta tropical;
- b) Propor uma metodologia de uso da polarimetria por mudança de base na identificação de coberturas da terra;
- c) Avaliar dados RADARSAT-2 polarimétricos na discriminação de formações vegetais e classes de cobertura da terra na região da Floresta Nacional do Tapajós;
- d) Comparar imagens RADARSAT-2 de anos distintos em abordagem de detecção de mudança;
- e) Entender a informação presente nos dados polarimétricos, como uma etapa anterior à classificação de tipologias florestais e coberturas da terra na região da Floresta Nacional do Tapajós.

1.2 Hipóteses

Este trabalho se baseia nas seguintes hipóteses:

- a) Informações polarimétricas na banda C contribuem com ferramentas de classificação na distinção de classes da vegetação e de coberturas da terra.
- b) A utilização de técnicas de polarimetria torna possível a identificação e discriminação das classes: solo, floresta, pastagem, água e área agrícola; na região de entorno da FNT.

2. ÁREA DE ESTUDOS

O estudo foi realizado na Floresta Nacional do Tapajós (FNT). Uma das mais antigas unidades de conservação no Brasil, cujo entorno sofre grande pressão pelo desenvolvimento da pecuária e agricultura. Assim, a FNT se destaca por sua cobertura contínua e uniforme de floresta tropical em estágio avançado (ESPÍRITO-SANTO et al., 2005a).

A dinâmica na paisagem no local sofre constantes alterações antrópicas. Destacam-se ações ligadas ao furto de madeira, e decorrente das práticas adotadas por uma comunidade tradicional que habita o interior da FNT. Esta comunidade, conhecida como “comunidade São Jorge”, exerce a prática da agricultura de subsistência e o pastoreio bovino, realizando pequenos desmates e exploração seletiva da floresta.

Criada pelo Decreto Federal n. 73.684 de 19 de fevereiro de 1974, a FNT teve como objetivo aprimorar técnicas de extração florestal (IBAMA, 2004). Ao longo de sua existência, concentra cerca de 30 anos de pesquisa contínua em manejo de florestas tropicais e uso do solo. Entre os principais projetos com apoio do sensoriamento remoto, destaca-se o LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*), desenvolvido a partir de 2004 (Roberts et al., 2003).

A formação da vegetação na FNT apresenta regiões de floresta primária e outras já em sucessão secundária, ameaçadas pela ação antrópica. A supressão da vegetação é apontada nos indicadores nacionais de monitoramento PRODES e DETER (PRODES, 2010; DETER, 2010). O entorno da FNT é caracterizado pela agricultura (soja, milho, sorgo e arroz) e pecuária, com extensas pastagens. Em visita a área de estudos foi observada a ocorrência de pontos com predominância de essências como babaçu (*Orbignya phalerata*) e tucum (*Astrocaryum vulgare*).

Os limites da FNT coincidem com a BR-163, a leste, o rio Tapajós, a oeste, e a rodovia transamazônica (BR-230) ao sul. Neste contexto, ressalta-se que o histórico de degradação florestal está associado ao surgimento e modernização da malha viária no país. Sempre que há investimento na construção de rodovias, criam-se novas rotas para o escoamento da madeira proveniente de fontes desmatadas, e bem como favorece o escoamento de produtos agropecuários. Como medida cautelar, o governo brasileiro tem adotado políticas de criação de unidades de conservação ao longo de rodovias. Tal atitude visa desacelerar o dano ambiental causado às formações vegetais nativas. A Figura 2.1 indica a localização da área de estudos em que 2.1 (c) apresenta as cenas estudadas.

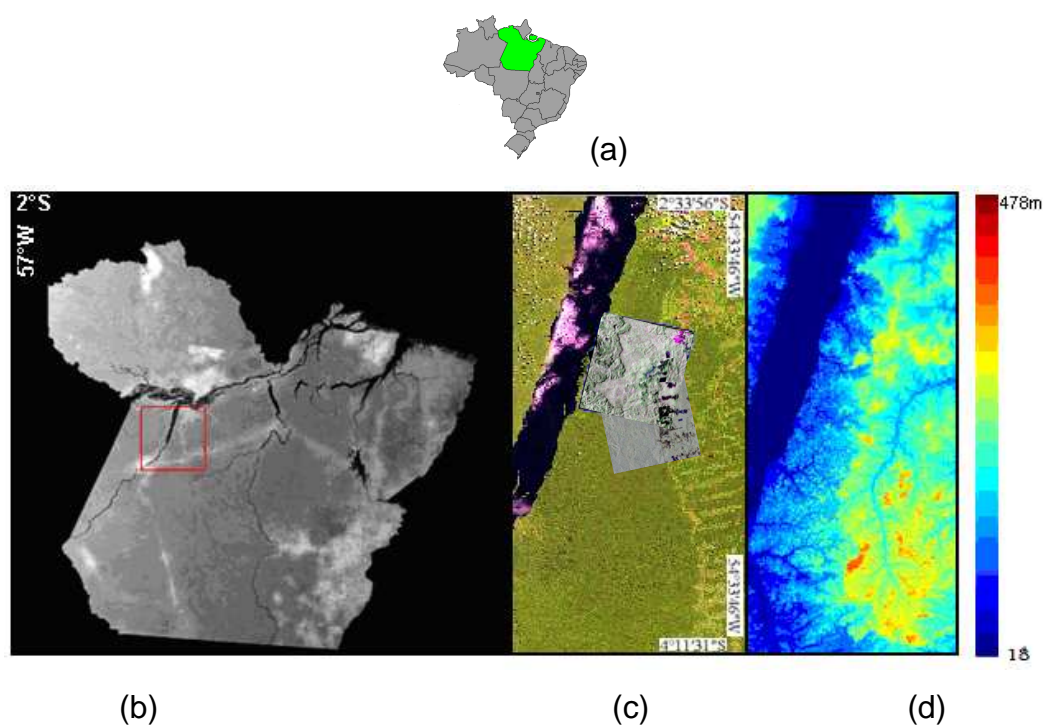


Figura 2.1 - Localização da área de estudo. Em (a) Brasil, (b) Estado do Pará, (c) composição colorida Landsat-5/TM 3R4G2B, com detalhe das cenas RADARSAT-2 estudadas; e (d) o modelo de elevação da região.

A região apresenta um relevo predominante suave ondulado com ocorrência de planícies às margens do rio Tapajós e relevo acidentado ao sul (Figura 2.1 d). O clima é característico de uma floresta tropical chuvosa, com temperatura

média anual de 26°C e chuvas distribuídas ao longo do ano (regime pluviométrico anual de 1700 a 2000 mm). O clima no Bioma da Amazônia divide-se em períodos chuvoso e seco. As imagens foram adquiridas no período de seca, no entanto, durante a aquisição de imagens em 2008 ocorreram precipitações. A Figura 2.2 apresenta a ocorrência de precipitação durante o mês de setembro no ano de 2008. A precipitação ocorrida em outubro de 2009 encontra-se na Figura 2.3.

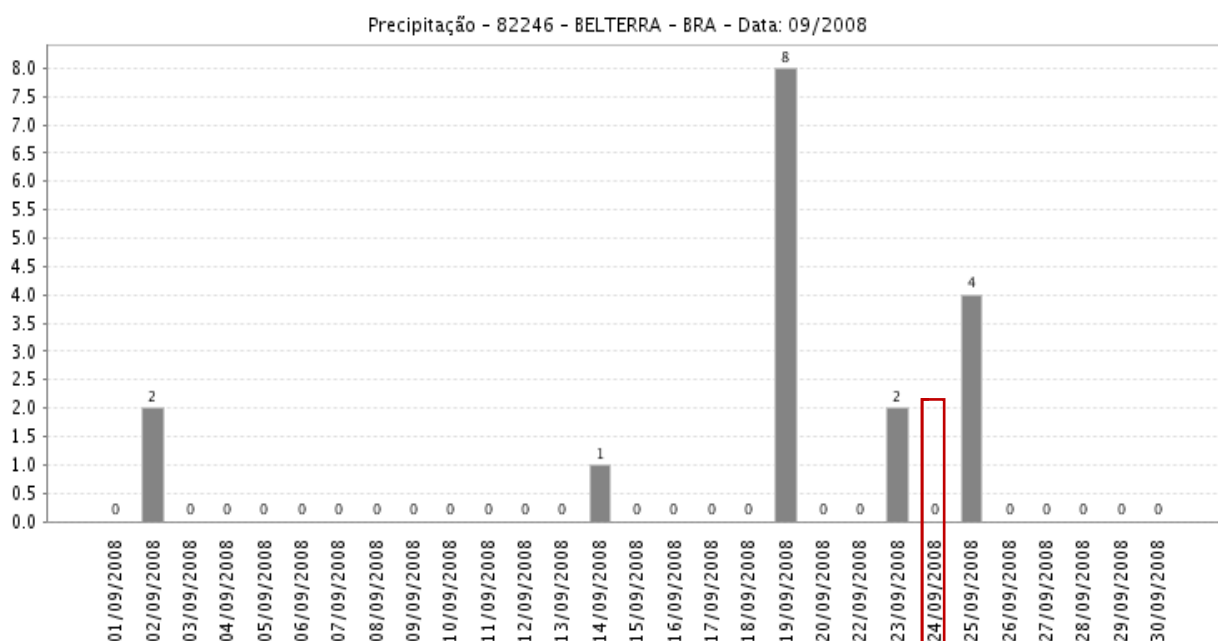


Figura 2.2 - Precipitação diária no mês de setembro de 2008 (período de aquisição das cenas no ano de 2008). O destaque indica o dia da aquisição das imagens.

Fonte: Centro Nacional de Previsão de Tempo e Clima-CPTEC/INPE (2008).

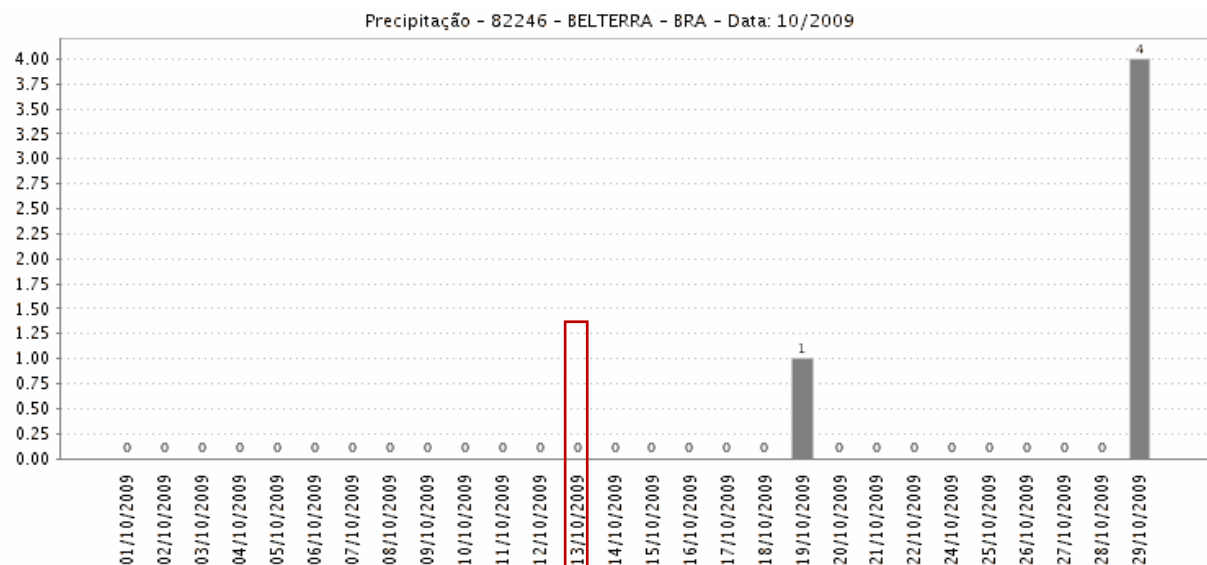


Figura 2.3 - Precipitação diária durante o mês de outubro de 2009 (período de aquisição das cenas no ano de 2009). O destaque indica o dia da aquisição da imagem.

Fonte: CPTEC/INPE (2009).

Dias antes da aquisição da cena no mês de setembro de 2008, foi constatada a ocorrência de precipitação em torno de 8 mm. O mesmo fato não se observa durante a aquisição da cena em 2009.

2.1 Descrição das classes de uso e cobertura do solo

Foram selecionadas cinco classes de uso e cobertura do solo: água, solo exposto, agricultura, floresta e pastagem. Por se tratar de imagens obtidas próximo ao Rio Tapajós, a classe água refere-se a pontos obtidos neste rio ou regiões que apresentem acúmulos consideráveis de água. Assim, destacam-se pequenas barragens e corpos d'água presentes na região. Tais feições possuem superfícies cujo espalhamento é conhecido como "especular", típico de superfícies lisas.

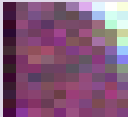
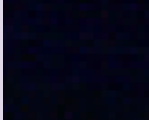

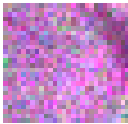


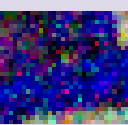



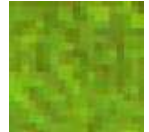

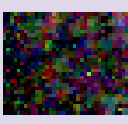

Solo exposto é fase após o desmatamento, colheita e preparo de solo agrícola ou mesmo reforma de pastagens. Esta classe, em análise de mudanças, costuma estar associada ao pousio do solo em culturas agrícolas.

A classe agricultura representa a produção de grãos na região, como arroz e soja. Esta classe é caracterizada por uma cobertura uniforme com espaçamento entre espécimes regular. A pastagem se encontrava com vegetação pouco vigorosa em virtude do período seco. A vegetação caracteriza-se por uma cobertura uniforme de gramíneas, variando de 50 a 120 cm de altura.

A classe floresta é representada pela FNT, que contém espécies arbóreas cujo dossel atinge cerca de 30 metros. As copas são densas e volumosas, e o aspecto rugoso predomina em uma imagem de radar.

A Tabela 2.1 ilustra as classes temáticas de uso e cobertura do solo. Neste quadro, podemos observar uma visão de campo da imagem, sua representação nas imagens de radar (RADARSAT-2), e Landsat TM 5.

Tabela 2.1- Classes de uso do solo.

Classe	Imagem	Imagem RADARSAT- 2 (HHR HVG VVB)	Imagem Landsat- 5/TM (3R 4G 5B)
Água	Não disponível		
Solo exposto			
Agricultura			
Floresta			
Pastagem			

3. IMAGENS RADARSAT-2

O Trabalho trás duas abordagens. Inicialmente, uma cena adquirida no ano de 2008, multipolarizada e polarimétrica a qual realiza-se a análise preliminar dos dados e emprega-se a técnica por mudança de base. Após, para observar mudanças na cobertura do solo, utiliza-se uma imagem multipolarizada e polarimétrica do ano de 2009.

A descrição dos parâmetros das imagens do sensor SAR a bordo do RADARSAT-2, adquiridas em anos distintos, apresenta-se na Tabela 3.1. As imagens foram adquiridas nos dias 24 de setembro de 2008 e 13 de outubro de 2009, correspondentes ao modo ScanSAR. As cenas contemplam uma porção da FNT e parte de seu entorno, ilustradas na Figura 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros do sistema de obtenção de imagens RADARSAT-2.

	2008	2009
Banda/frequência	C/5,3 cm/5,6 Hz	C/5,3 cm/5,6 Hz
Largura da banda	100 MHz	100 MHz
Polarização	Full (HH-HV-VH-VV e fase)	Full (HH-HV-VH-VV e fase)
Resolução	25 x 28 m	25 x 28 m
Largura da cena	25 x 25 Km	25 x 25 Km
Ângulo de incidência	27,07°	33,18°
n° de looks	4	4
Órbita	Descendente	Ascendente

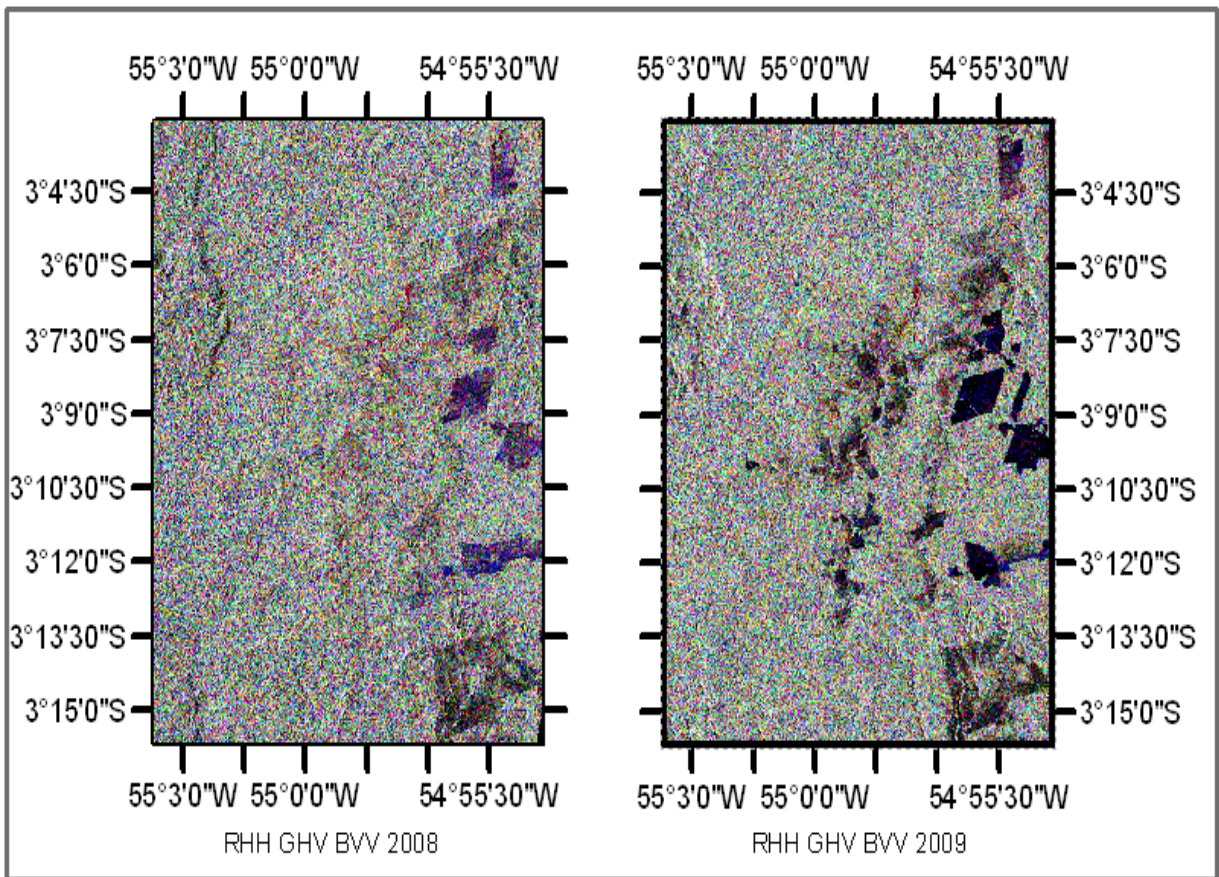


Figura 3.1 – Cenas RADARSAT-2, em composição colorida, adquiridas em setembro de 2008 e outubro de 2009.

4. ANÁLISE PRELIMINAR DE IMAGENS SAR POLARIMÉTRICAS E POTENCIAL DE APLICAÇÕES EM FLORESTAS TROPICAIS

4.1 Introdução

O estudo da cobertura da terra em regiões tropicais é foco de muito interesse. A riqueza em biodiversidade nas florestas, junto à contribuição no cenário global de mudanças climáticas, atribui importância a este tipo de estudo (SÁNCHEZ-AZOFEIFA et al., 2009). É comum o emprego de imagens ópticas e técnicas como o modelo linear de mistura espectral, segmentação e classificação para avaliar o uso e cobertura do solo nos trópicos (VASCONCELOS e NOVO, 2004; SHIMABUKURO et al., 2009). Sob outra óptica, o uso de imagens advindas de sensores ativos oferece novas informações sobre os objetos terrestres.

O sensoriamento remoto por radar imageador emprega comprimentos de onda que não são sensíveis à cobertura de nuvens (IMHOFF, 1995; KUPLICH et al., 2000), e não depende de radiação solar. A capacidade de penetrar nuvens e imagear na ausência de luz solar permite ao radar fornecer informações que auxiliam no mapeamento da superfície da terra e estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, como altura e biomassa, por exemplo (YANASSE et al., 1997, SANTOS et al., 2003). Isto faz do radar imageador uma importante ferramenta em sistemas de monitoramento e detecção de mudanças para fins de controle do desmatamento e fiscalização ambiental.

A aquisição das imagens ocorre por meio do registro da radiação eletromagnética, na faixa das micro-ondas. Esta é transmitida, interage com os objetos na superfície terrestre e retorna ao radar (o retroespalhamento). Os componentes da cena, ou os objetos na superfície terrestre, têm a capacidade de despolarizar a onda incidente. Desta maneira, o retroespalhamento indica a ocorrência de informações sobre estes elementos. Em estudos da vegetação, por exemplo, o retroespalhamento é influenciado pela orientação dos galhos, teor de umidade e a presença de folhas e suas proporções nas camadas do

dossel (VAN DER SANDEN e HOEKMAN, 1998). A Figura 4.1 exemplifica a interação de alguns comprimentos de onda utilizados na identificação de alvos por sistemas SAR.

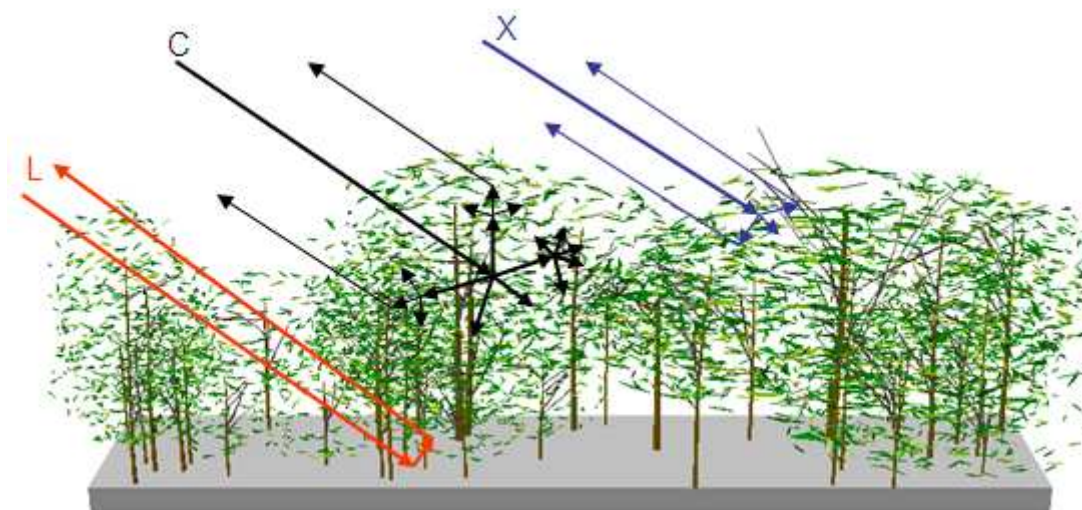


Figura 4.1 - Representação dos mecanismos de espalhamento na banda C (~5,6cm), em contraste aos mecanismos apresentados pela banda L (~23cm) e banda X (~3cm).

Outro fator importante na aquisição de imagens trata do comprimento de onda utilizado. Os sensores radares operam em comprimentos de onda que diferem quanto à penetração no dossel (Figura 4.1). Comprimentos de onda de menor penetração irão responder aos constituintes de camadas superiores, e uma radiação de maior penetração, aos elementos presentes no perfil estrutural da vegetação. Deste modo, a identificação das classes por meio de seu retroespalhamento está ligada à proporção dos elementos presentes na superfície da terra e o comprimento de onda empregado.

Modelar o espalhamento do sinal do radar em florestas tropicais consiste em entender a influência dos elementos presentes na cena, interpretar e extrair parâmetros das imagens (LECKIE, 1998). Em contraste, aplicações qualitativas e quantitativas que empregam uma abordagem SAR, são pouco observadas em ambientes tropicais, devido à limitada disponibilidade de dados e da complexidade de tais ambientes (HAJNSEK et al., 2009). Considerando o

interesse contínuo e quantitativo sobre as florestas, informação sobre suas estruturas verticais e horizontais é essencial para estimar parâmetros florestais com o sinal do radar (QUIÑONES e HOEKMAN, 2004). As abordagens quantitativas, no entanto, requerem um estudo prévio da onda espalhada, proporcionado por técnicas de respostas de polarização e análises polarimétricas.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise quantitativa de mudanças entre classes de cobertura da terra por medições radiométricas, com ênfase nas respostas espectrais e análise de composição colorida, empregando um sistema SAR orbital de banda C, na Floresta Nacional do Tapajós no Pará.

4.2 Breve conceito sobre resposta polarimétrica

O sinal de retorno, chamado retroespalhamento, é registrado na forma de uma matriz [S] 2x2, em uma base, composta de valores complexos, transmitida e recebida nas polarizações: HH, VV, HV e VH (Equação 4.1).

$$\langle S \rangle = \begin{bmatrix} \langle S_{HH} \rangle & \langle S_{HV} \rangle \\ \langle S_{VH} \rangle & \langle S_{VV} \rangle \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

onde S é o espalhamento, HH polarização horizontal para transmissão e recepção, VV polarização vertical para transmissão e recepção, HV para transmissão horizontal e recepção vertical, e VH para transmissão vertical e recepção horizontal.

Em sensoriamento remoto por radar, a representação do espalhamento da onda segue a natureza do sistema de coordenadas da radiação transmitida e/ou recebida. A forma usual foi proposta por Kennaugh (WOODHOUSE, 2006), em que a onda espalhada é descrita no sistema de coordenadas baseado na recepção da antena (BSA), também chamado retroespalhamento. A matriz de Kennaugh [K] é uma derivação da matriz [S], e representa o

espalhamento no sistema BSA (VAN ZYL et al., 1987). Este processo é descrito com detalhes em Touzi et al. (2004a).

O conceito de síntese de polarização está na representação de todos os estados possíveis de polarização da onda espalhada em um gráfico tridimensional. Van Zyl et al. (1987) acrescentou que, independente da técnica de medição empregada para adquirir o dado, o conjunto de respostas do terreno, para uma combinação arbitrária de polarizações transmitida e recebida, pode ser sintetizada pela multiplicação da matriz de Kennaugh [K], por um vetor unitário, correspondente aos estados de polarização da antena (Equação 4.2). O vetor unitário da antena pode ser gerado com uma expressão nos termos de ângulo de orientação (ψ) e ângulo de elipticidade (χ) nos parâmetros de Stokes (Equação 4.3).

$$P(\chi_t, \psi_t, \chi_r, \psi_r) = g_r [K] g_t \quad (4.2)$$

$$\vec{g} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(2\psi) \cos(2\chi) \\ \text{sen}(2\psi) \cos(2\chi) \\ \text{sen}(2\chi) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde, P é a potência do sinal para os ângulos ψ e χ , transmitidos e recebidos, g_t é o vetor de Stokes para a onda transmitida, [K] é a matriz de Kennaugh, que representa o retroespalhamento na antena, e g_r é vetor de Stokes da onda recebida na antena (BSA).

A resposta polarimétrica (RP) será a representação de todas as potências possíveis (P) do sinal espalhado, nos valores de elipticidade e orientação da onda. O modelo de resposta polarimétrica é representado em um gráfico tridimensional (Figura 4.2). Para facilitar a interpretação das respostas, os gráficos são divididos em duas partes: co- e cross- polarizados (correspondentes às polarizações HH, VV e HV, VH, respectivamente).

O interesse na interpretação dos gráficos de RP (ou usualmente o par de respostas co- e cross- polarizadas) está no potencial de identificar e gerar imagens que maximizem, ou minimizem, os retornos polarizados ou despolarizados de áreas individuais (EVANS et al., 1988). As novas imagens poderão realçar feições de classes de interesse, refinando classificações (TOUZI et al., 2004b).

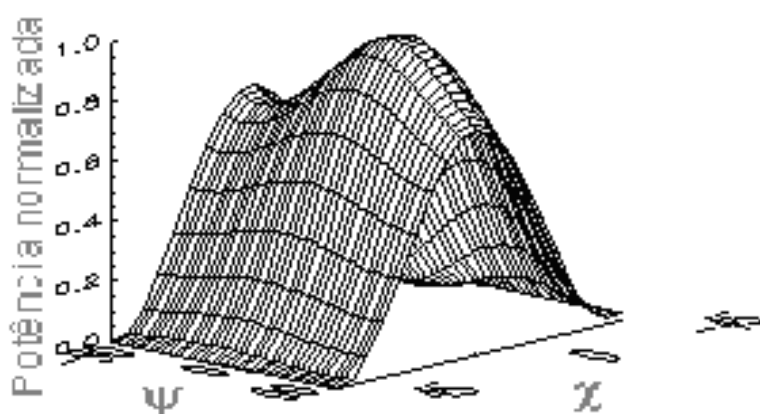


Figura 3.2 - Resposta polarimétrica normalizada em σ_0 co-polarizada de classe pastagem.

A importância em se obter as respostas polarimétricas está em descrever as propriedades de uma área ou objeto como uma função dos ângulos de elipticidade (χ) e orientação (ψ) (Figura 4.3). O ângulo de elipticidade é definido como a razão entre o arco-tangente dos semi-eixos maior e menor da elipse de polarização, com ângulos positivos que representam a polarização à direita e ângulos negativos a polarização à esquerda (ZEBKER e VAN ZYL, 1991). O ângulo de orientação é formado entre a linha do semi-eixo maior e o eixo horizontal.

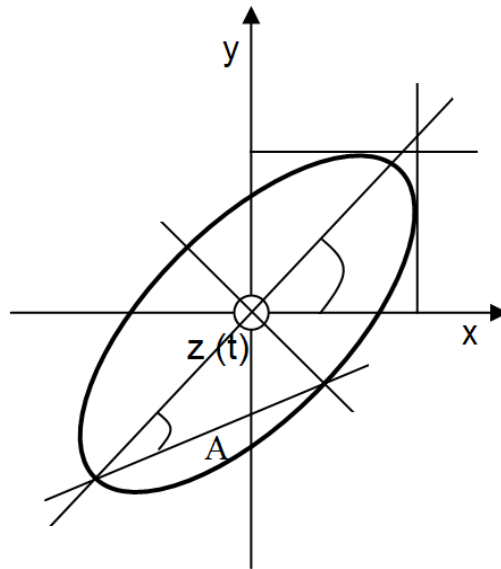


Figura 4.3 - Elipse de polarização de uma onda plana monocromática que se propaga nos campos x e y , cujos parâmetros variam de acordo com a elipticidade (χ), orientação (ψ) e amplitude (A), em um eixo de propagação $z(t)$.

Fonte: Adaptado de Ulaby e Elachi (1990).

Dentre as informações contidas em uma RP, observa-se que para $\chi = 0^\circ$ e $\psi = 90^\circ$ ou -90° , a onda encontra-se com polarização linear horizontal (H), sendo que o eixo z apresenta a potência total refletida nesta polarização. Se $\psi = 0^\circ$, a onda encontra-se polarizada verticalmente (V). Nos ângulos de χ que tendem a -45° ou $+45^\circ$, a onda é dita polarizada elíptica à esquerda ou à direita, respectivamente. A observação das potências nos pontos angulares é um passo à síntese de polarização.

O gráfico da RP apresenta um valor mínimo. Este valor define a “altura do pedestal”, ou seja, a proporção de radiação despolarizada registrada. A altura do pedestal foi associada por Gonçalves (2007), à composição florística de uma floresta tropical, obtidas por meio das RPs de um sensor na banda L. A variação de diversidade florística apresentou influência na altura do pedestal. Evans et al. (1988) descrevem o incremento no pedestal segundo o aumento do conteúdo de vegetação entre as classes agricultura e floresta.

O valor mínimo é igualmente empregado na geração de índices de polarização, como a fração de polarização, f_p . Kwok et al. (1994) citaram a f_p como o descritor do grau de polarização da resposta. A f_p é obtida por meio da razão entre a diferença de respostas mínimas e máximas da resposta co-polarizada ($P_{\maxco} - P_{\minco}$), e, a soma entre os picos e vales da resposta cross-polarizada ($P_{\maxcros} + P_{\mincros}$), como mostra a Equação 4.5. Quando $f_p=1$, a resposta média é polarizada e variações na polarização da antena (receber e transmitir, representados pelo vetor de Stokes) farão com que ocorram grandes mudanças na potência espalhada média. Quando $f_p=0$, o retorno médio é completamente despolarizado e variações na polarização da antena não causarão mudança na potência espalhada (DURDEN et al., 1989). Esta informação permitirá, de antemão, atestar a viabilidade de se gerar imagens em outras possíveis representações de onda, conforme a proposta do conceito de síntese de polarização.

$$f_p = \frac{P_{\maxco} - P_{\minco}}{P_{\maxcros} + P_{\mincros}} \quad (4.5)$$

Outras ferramentas de análise das respostas polarimétricas são citadas por van Zyl et al. (1987), como o coeficiente de variação, v_u . Este, é uma maneira de quantificar a proporção do sinal que é despolarizado no sistema radar. Assume que a potência máxima que chega ao radar é polarizada, e a mínima é despolarizada (Equação 4.6).

$$v_u = \frac{P_{\minCo}}{P_{\maxcros}} \quad (4.6)$$

O coeficiente combina a resposta polarimétrica de espalhadores individuais com a resposta para a classe. A citação da fração de polarização e do coeficiente de variação como parâmetros auxiliares na interpretação de RPs foi abordada por Woodhouse (2006).

Do mesmo modo, a resposta polarimétrica de um elemento de resolução, na imagem de radar, representa as razões de assinaturas de múltiplos objetos (EVANS et al, 1988). Portanto, um mesmo objeto pode apresentar assinaturas diferentes (BOERNER, 1998), assim como objetos diferentes podem apresentar respostas semelhantes. O conhecimento das respostas pode favorecer a discriminação dos alvos, no entanto, não fornecem informações de fase.

4.3 Metodologia

A análise das respostas polarimétricas incluiu: (a) determinação do grau de heterogeneidade do espalhamento; (b) determinação da pureza da polarização do sinal de retorno por classe; e (c) determinação dos estados de polarização potenciais para a distinção de alvos da vegetação. Para tanto, a geração das RPs parte, inicialmente, da identificação das classes de cobertura/uso da terra. Deste modo, realizou-se a alocação de pontos de campo, obtidos por GPS de navegação na área de estudo. A Figura 4.4 apresenta os pontos cujas RPs co- e cross-polarizadas, normalizadas em σ^0 , foram analisadas. Uma descrição detalhada das classes é apresentada no capítulo 4 deste trabalho.

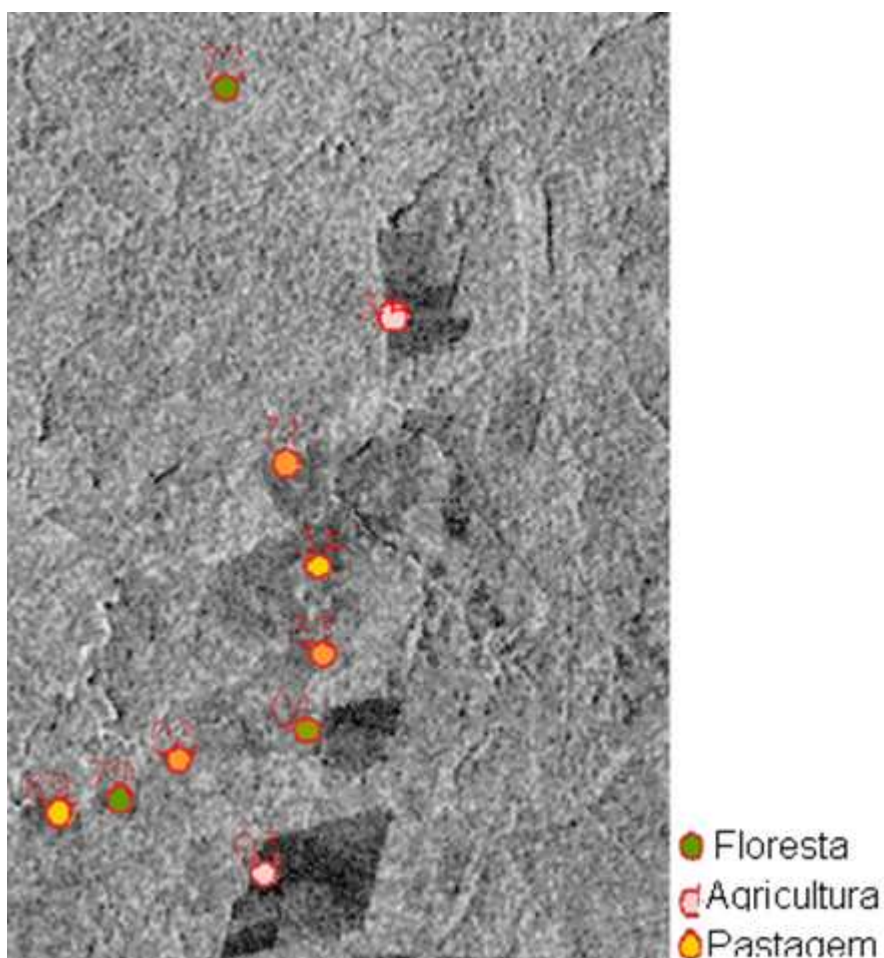


Figura 4.4 - Pontos amostrais para a tomada de assinaturas espectrais e alocação de algumas classes de cobertura do solo em imagem HH.

Posteriormente, realizou-se a seleção dos valores máximos e mínimos apresentados por cada RP. Estes valores são empregados no cálculo da fração de polarização e coeficiente de variação, bem como possibilitam uma análise estatística das classes. Os resultados são apresentados de forma gráfica.

Identificados os valores citados, selecionaram-se os ângulos de elipticidade e orientação correspondentes a cada valor. Isto possibilitou a interpretação dos ângulos posto aos mecanismos de espalhamento e a otimização na identificação de classes por meio de síntese polarimétrica, descrita abaixo.

Para análise de fase, foi identificado o atributo de fase das imagens HH e VV da matriz de espalhamento [S]. Realizou-se a razão de fase das polarizações

HH/VV que, com base em amostras e a correlação entre as bandas, originou um gráfico polar com a representação de fase para cada classe. As amostras corresponderam aos pontos de amostragem para as RPs.

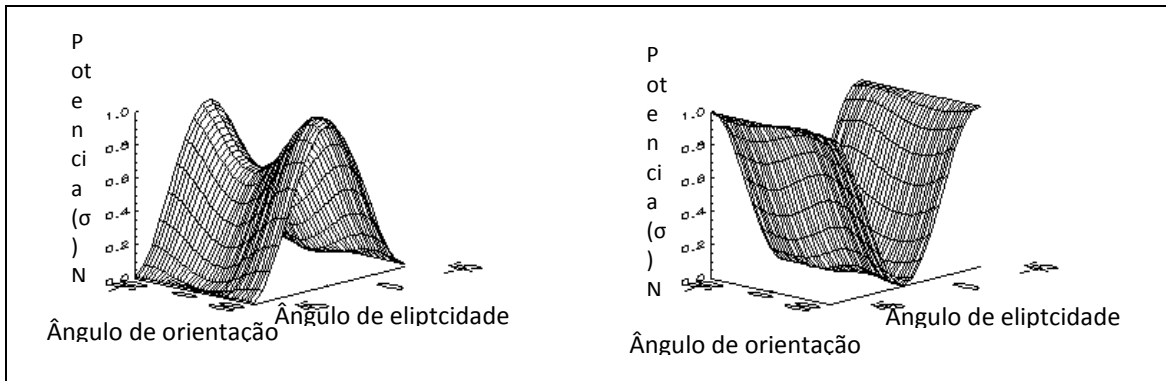
Por fim, realizou-se a síntese de polarização para as imagens completa em polarização, simulando novas imagens e observando a variação das classes em função dos ângulos de elipticidade e orientação.

4.4 Resultados

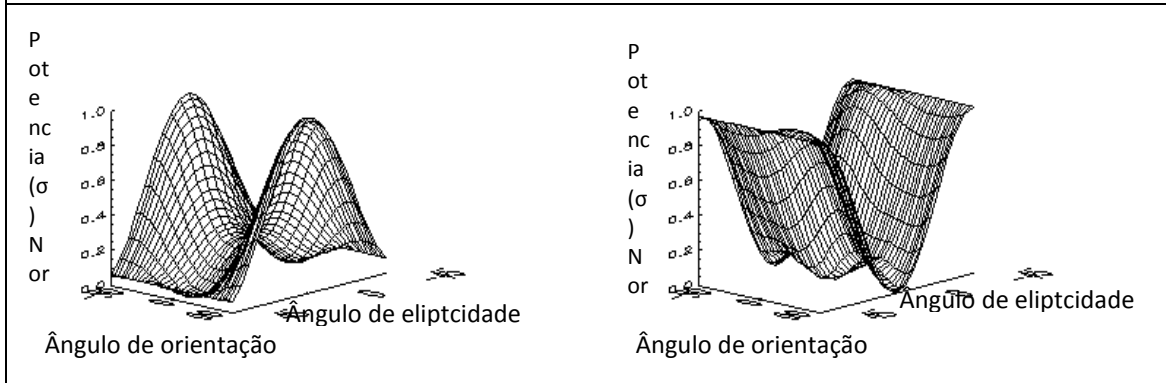
Com base em dados de campo, selecionamos cinco classes de uso e cobertura da terra em área de floresta tropical, para análise. São elas: água, solo exposto arado, pastagem, agricultura e floresta.

4.4.1 Respostas polarimétricas co- e cross-polarizadas

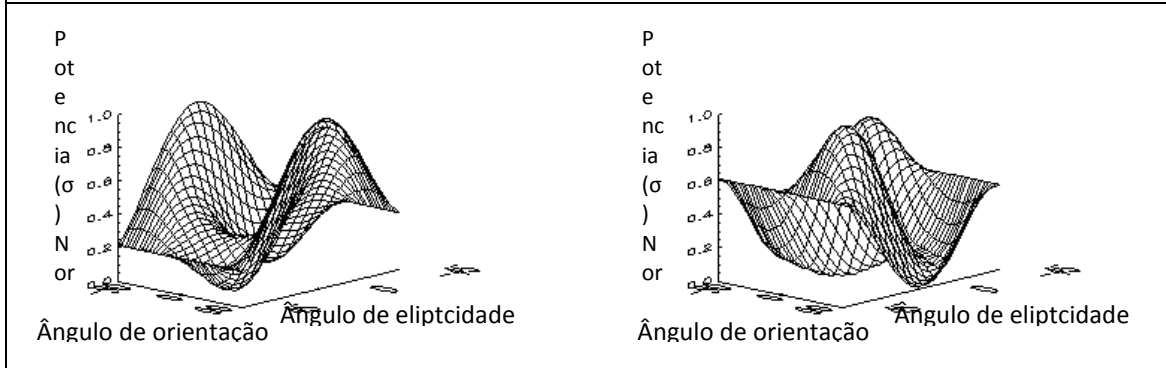
A Figura 4.5 sintetiza as RPs obtidas com o uso das imagens RADARSAT-2. Cada resposta representa um conjunto de espalhadores na célula de resolução (VAN ZYL et al., 1987).



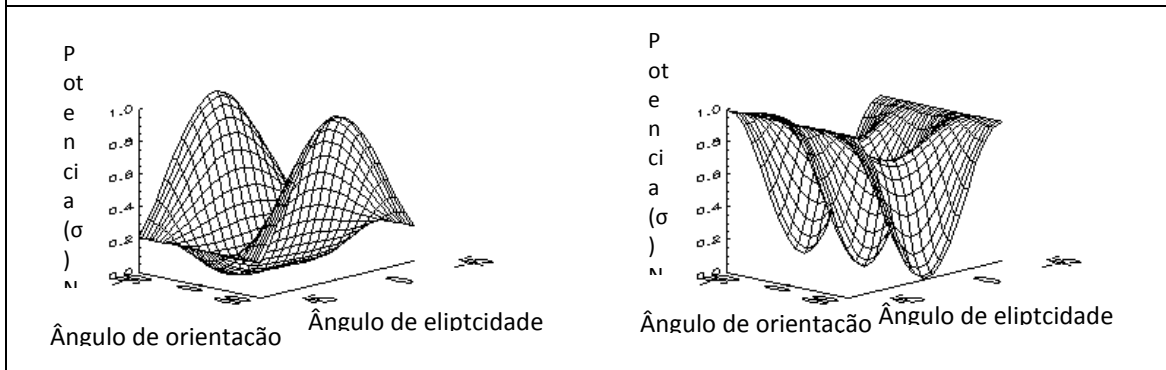
Solo Exposto



Agricultura



Floresta



Água

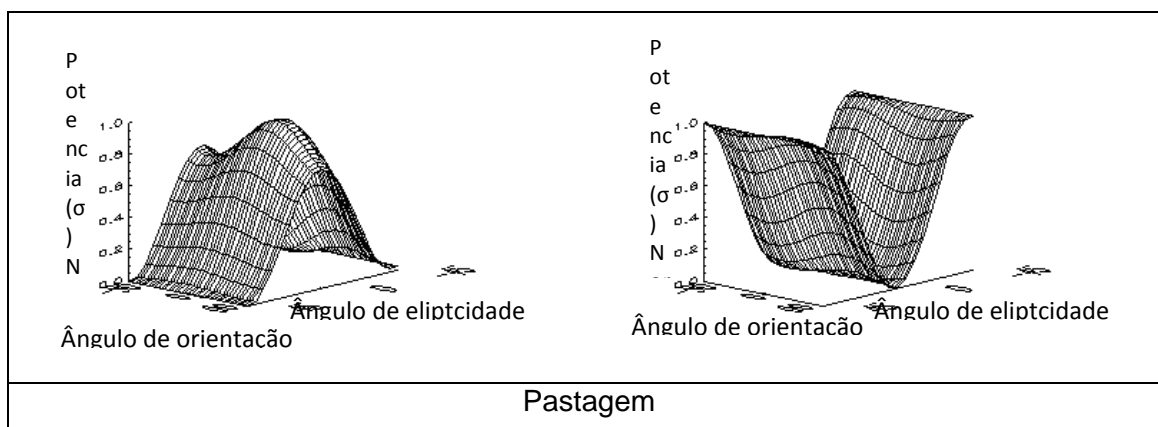


Figura 4.5 - Respostas Polarimétricas co- e cross- polarizadas para os objetos estudados.

A Figura 4.5 ilustra respostas teóricas co- e cross- polarizadas. Nota-se que as RPs dos alvos em estudo apresentam significativas diferenças entre si. A forma gráfica da resposta para alvos naturais pode ser comparada à de alvos canônicos (com comportamento de espalhamento conhecido, como refletores de canto, por exemplo) quando se estuda a interação da onda. No entanto, há outros pontos a serem observados. Os principais pontos de análise correspondem a: (a) altura do pedestal, que define o quanto a radiação foi espalhada; (b) os mínimos e máximos da resposta, junto aos (c) ângulos correspondentes de elipticidade e orientação; e, por fim (d) o coeficiente de variação.

Na Figura 4.5, nota-se para a classe água uma elevação no pedestal, que pode ser associada à despolarização da onda pela presença de ondas superficiais às margens do rio, ou a perda parcial da radiação por reflexão especular. A resposta de água apresenta picos co-polarizados com $\psi = 90^\circ$ e -90° e $\chi = 0^\circ$. Os sinais de mínima estão entre $\psi = 0^\circ$ e $\chi = 45^\circ$ a -45° . A resposta cross-polarizada com valores máximos em $\psi = 90^\circ$ a -90° para $\chi = 45^\circ$ e -45° , ângulos que caracterizam os estados de uma onda polarizada circularmente à esquerda e a direita respectivamente. Quando $\chi = 0^\circ$, as máximas observadas estão em $\psi = -45^\circ$ e 45° . Para uma resposta mínima, há três vales em destaque para $\psi = 90^\circ$, 0° e -90° , com $\chi = 0^\circ$.

A RP do solo exposto não apresenta um pedestal, ou seja, a radiação recebida sofreu pouca despolarização em relação à radiação emitida pela antena. A pouca despolarização na resposta sugere que variações na representação da elipse de polarização (síntese de polarização) apresentarão significativa resposta na imagem resultante. A resposta mínima co-polarizada para a classe é observada nos ângulos $\psi = 90^\circ$ a -90° com $\chi = -45^\circ$ e 45° , no qual a resposta máxima é vista em $\psi = 90^\circ$ e -90° e $\chi = 0^\circ$. Para a resposta cross-polarizada observamos os picos em $\psi = 90^\circ$ a -90° com $\chi = -45^\circ$ e 45° , cujos vales encontram-se em $\psi = 90^\circ$ e -90° em $\chi = 0^\circ$. A resposta cross- apresenta-se inversa a resposta co-polarizada, mostrando semelhança à resposta de um alvo triédrico. A semelhança com a RP de um triedro provavelmente está associada à orientação dos sulcos para plantio, paralelos ao sentido do imageamento, e à rugosidade superficial cujo comprimento de onda da banda C é sensível.

Entre as respostas polarimétricas de solo e agricultura foi notada uma semelhança no formato gráfico e nas respostas máximas e mínimas co- e cross-polarizadas. Entretanto, a resposta para a classe agricultura possui uma elevação no pedestal da assinatura. O fato foi atribuído a uma colheita recente, mantendo, no local, ramos e galhos da cultura. Portanto, associa-se o pedestal a despolarização da onda em função dos restos vegetais.

Quanto às respostas apresentadas pela classe floresta, seus valores de resposta máxima co-polarizados estão contidos nos ângulos de $\psi = 90^\circ$ e -90° para $\chi = 0^\circ$, e mínimos com $\psi = 0^\circ$ e $\chi = 30^\circ$ e -30° . O formato gráfico se assemelha as respostas para classe florestal apresentada por Durden et al. (1989), usando banda L. A resposta cross-polarizada possui máximos e mínimos opostos ao assinalado na resposta co-polarizada, em que $\psi = 0^\circ$ para $\chi = 90^\circ$ e -90° apresenta os mínimos e $\psi = 30^\circ$ e -30° e $\chi = 0^\circ$ os máximos da RP.

Quanto a classe pastagem se observa que a resposta de máxima intensidade em: $\psi = 90^\circ$ a -90° e $\chi = 0^\circ$ com mínima em: $\psi = 0^\circ$ e $\chi = 30^\circ$ e -30° . Os indicadores de máxima e mínima potência na RP cross-polarizada estão em: $\psi = -45^\circ$ e 45° com $\chi = 0^\circ$; e, $\psi = 90^\circ, 0^\circ$ a -90° com $\chi = 0^\circ$, respectivamente.

Ao separar os valores angulares ψ e χ para as respostas mínimas e máximas de um objeto qualquer, estabelece-se a possibilidade para se gerar novas imagens. O intuito do método foi proporcionar um contraste entre duas classes de uso do solo, empregando os parâmetros angulares anteriormente identificados.

Os picos e vales em dB de uma RP, para cada objeto, estão apresentados na Tabela 4.1. A resposta mínima é chamada altura do pedestal em que observamos o efeito da despolarização da onda incidente. Quanto maior a altura do pedestal haverá, do mesmo modo, um incremento na proporção de onda despolarizada no sinal de retorno. Como exemplo, podemos citar a vegetação, que contém um conjunto de elementos orientados, com a propriedade de despolarizar o eixo elétrico (PAIRMAN e MACNEILL, 2003). Observa-se que há um aumento na despolarização da onda em função do incremento em vegetação nas classes. Este fato se destaca entre as classes solo – pastagem - agricultura.

Tabela 4.1 - Intensidades de resposta do sinal observadas para as classes de uso da terra nas respostas polarimétricas. Fração de polarização e coeficiente de variação.

Classe	co-polarizado		cross-polarizado		f_p	V_u
	Máximo(dB)	Mínimo (dB)	Máximo(dB)	Mínimo(dB)		
Água	-20,42706	-30,55162	-18,52322	-31,25344	0,795	1,5300
Solo exposto arado	-3,85265	-12,85446	-1,97468	-13,19857	0,802	3,4258
Agricultura	-5,81537	-12,88572	-3,79453	-13,18828	0,753	2,2678
Floresta	-7,6370	-11,2679	-6,4906	-11,6493	0,704	1,5254
Pastagem	-10,0191	-14,1121	-9,0722	-14,5154	0,752	1,4488

Assim como as informações de intensidade do sinal, estão contidas na Tabela 4.1 as frações de polarização (f_p) obtidas a partir das potências mínimas e máximas das assinaturas co- e cross-polarizadas. A Figura 4.6 complementa os resultados obtidos para a fração de polarização. Pode-se observar que a classe Floresta apresentou uma maior proporção de onda despolarizada, atribuída a interação da radiação com o dossel florestal. Observamos que áreas com a presença de vegetação apresentam um pedestal elevado. No caso de corpos d'água, a despolarização é atribuída ao comprimento de onda da banda C, que é sensível às ondas superficiais, cuja geometria altera as propriedades da onda incidente.

De modo geral, as f_p apresentadas para as classes indicam que a variação da orientação da onda trará um efeito na intensidade do sinal de retorno, haja vista que a maior porção de radiação recebida é de onda polarizada.

No entanto, alguns pontos na imagem poderão ser afetados pela porção de onda despolarizada, mas não se descarta a possibilidade da proporção de onda polarizada na radiação ser suficiente para discriminar objetos de interesse na superfície do solo.

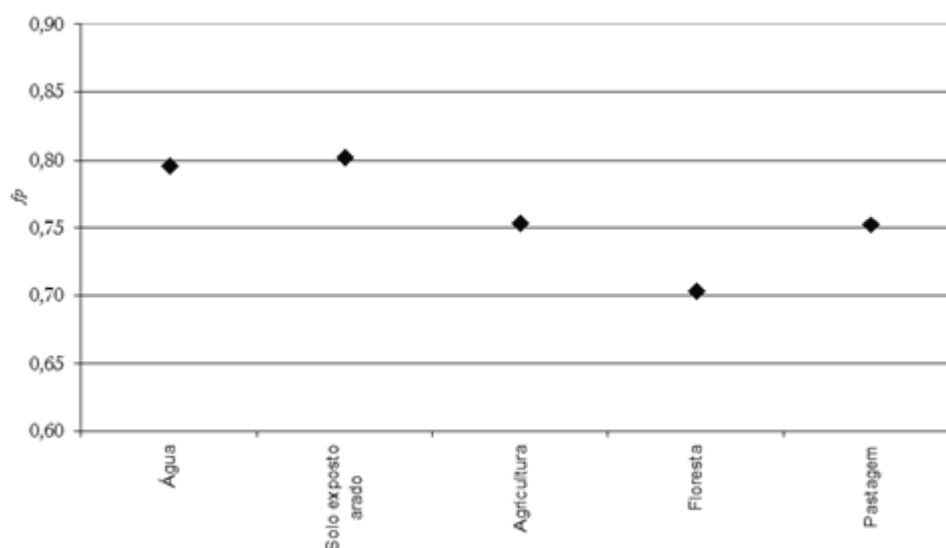


Figura 4.6 - Fração de polarização para as classes de uso e cobertura da terra.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados para o coeficiente de variação (vu) da imagem. Quanto menor o vu mais efetiva se torna a influência dos diferentes espalhadores, no pixel, sobre a polarização da onda. Nos resultados obtidos destacam-se os vu 's para solo exposto e agricultura, com valores de 3,4 e 2,3, respectivamente. Estes resultados sugerem que uma mudança na polarização ocasionaria uma mudança no espalhamento para classes com vegetação. Os resultados para o vu confirmam os apresentados anteriormente na *fp*.

4.4.2 Informação de fase

A distribuição da fase do sinal de retorno é abordada como uma ferramenta complementar na classificação de imagens SAR (HESS et al., 1995). A fase é uma medida angular definida como a diferença entre a onda recebida e a onda emitida do sinal num instante no tempo. A fase está ligada à geometria do objeto e sua capacidade em despolarizar a onda incidente. Cada objeto, ou constituinte da cena em uma floresta tropical responde de maneira única à onda incidente. Neste sentido, a fase contribui na identificação do mecanismo de espalhamento dominante no objeto. Para os objetos/classes estudados podemos observar, na Figura 4.7, a distribuição da diferença de fase HH/VV em relação à correlação de bandas HH/VV.

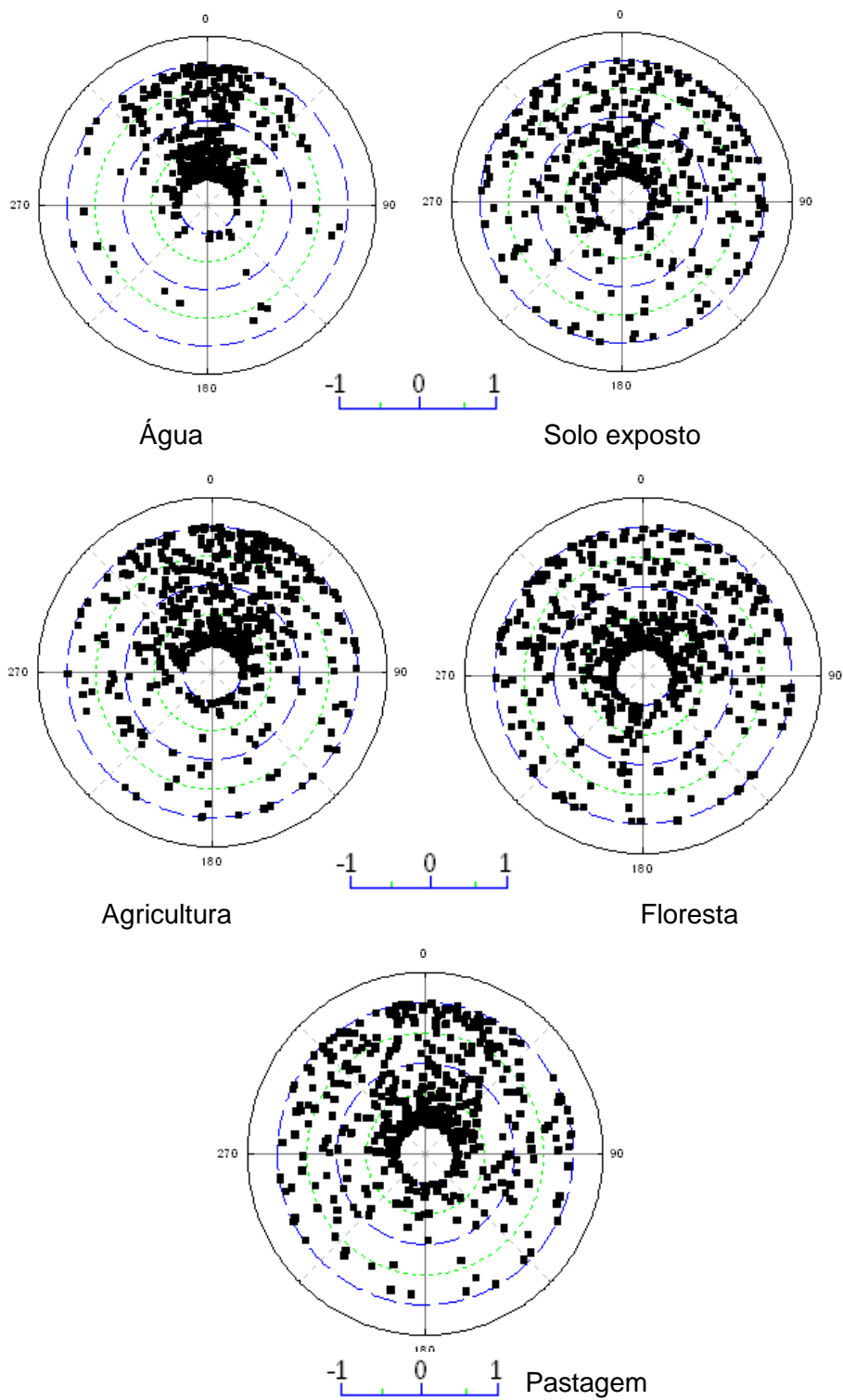


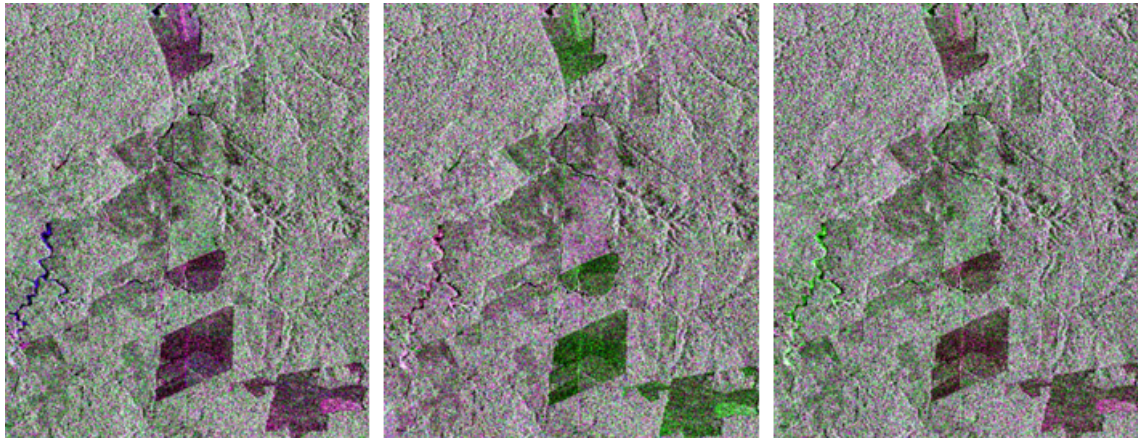
Figura 4.7 - Diferença de fase HH/VV para os pixels amostrados por classe de uso da terra.

Objetos que apresentam alta variabilidade na diferença de fase impõem imprecisão nas classificações (HESS et al., 1995). Observa-se que na classe água a maior concentração de pontos encontra-se próximo a 0° , o que pressupõe o mecanismo de espalhamento superficial. Algumas outras classes apresentam comportamento semelhante, como agricultura e solo. Em contrapartida, classes como floresta não apresentam um comportamento específico, com as diferenças de fase distribuídas ao longo de toda a circunferência.

A diferença de fase média é empregada para descrever os mecanismos de espalhamento predominantes em um determinado objeto. Um exemplo onde a fase média é igual a 0° , caracteriza o mecanismo de espalhamento conhecido como superficial, citado anteriormente para a classe água. Do mesmo modo, quando a fase se encontra distribuída aleatoriamente entre 360° e 0° , o mecanismo de espalhamento predominante é o volumétrico. O espalhamento conhecido como de canto ou *double bounce* apresenta uma fase média concentrada em 90° ou 270° . Este último não foi evidenciado em nenhuma das amostras, no entanto é observado em determinadas regiões da imagem, como florestas próximas a corpos d'água.

4.4.3 Síntese de imagens SAR

As RPs fornecem atributos para discriminação e realce de classes, como os ângulos de elipticidade e orientação. Por meio destes é possível realizar a síntese da polarização da onda, simulando uma imagem (ZEBKER e VAN ZYL, 1991; CLOUDE e POTTIER, 1996; TOUZY et al., 2004a; TOUZY et al., 2004b). A Figura 4.8 (a) apresenta uma composição em falsa cor em que $R(VV)$ $G(HV+VH/2)$ $B(HH)$ para a imagem originalmente adquirida pelo sensor. As demais (Figura 9 (b) e (c)) representam imagens com alteração na polarização da onda incidente.



a) Imagem Original $R(VV)G(HV+VH/2)B(HH)$ b) $\chi = 45^\circ \quad \psi = 0^\circ$ $R(VV)G(HV+VH/2)B(HH)$ c) $\chi = 30^\circ \quad \psi = 45^\circ$ $R(VV)G(HV+VH/2)B(HH)$

Figura 4.8 - Síntese de polarização com mudança de elipse da imagem original para imagens simuladas. (a) imagem original composição $R(VV) G(HV+VH/2) B(HH)$, (b) imagem simulada $\psi = 0^\circ$ com $\chi = 45^\circ$, composição $R(VV) G(HV+VH/2) B(HH)$ representando uma polarização elíptica à direita; e (c) imagem simulada $\psi = 45^\circ$ com $\chi = 30^\circ$, composição $R(VV) G(HV+VH/2) B(HH)$ representando uma polarização linear à 30° de inclinação.

Nota-se, por uma análise comparativa, que certas áreas apresentaram mudança na intensidade do sinal de resposta ao variar a elipse da onda espalhada (através da mudança dos ângulos de elipticidade e orientação). A formação de cores empregando imagens de radar, neste trabalho, supõe um modelo aditivo, em que o espaço de atributos RGB sofre combinações para gerar outras cores. Os vetores do espaço de atributos são os elementos da matriz de espalhamento. Esta composição colorida, da forma como foi apresentada, é conhecida como decomposição de Pauli (LEE e POTTIER, 2009). Os elementos correspondentes são:

R: VV

G: $(HV+VH)/2$

B: HH

sendo: VV, VH, HV e HH a fração linear em uma resposta circular ou elíptica registrada segundo uma antena receptora de radar.

A contribuição de cada componente na definição da cor está relacionada aos espalhadores nas classes em estudo. Os efeitos ocasionados por meio da mudança de sistema, ou no mecanismo do espalhamento, podem ter fácil identificação empregando composições em falsa cor (LEWIS e HENDERSON, 1998). Kasischke et al. (1997) apresentaram o potencial das polarizações na classificação de uso e cobertura da terra, destacando, por exemplo, a identificação de áreas com floresta alagada na polarização HH. A vegetação florestal de área seca, em geral, destaca-se na polarização HV. Isto sugere a aplicação de um filtro de coloração verde à polarização HV, com o intuito de facilitar a identificação visual. Ou seja, na Figura 4.8, a variação na resposta da vegetação florestal em função da mudança de base é observada nas variações de tons de verde. No entanto, na Figura 4.8 (b), que apresenta uma polarização circular, a vegetação florestal responde com maior intensidade as polarizações paralelas, atribuindo uma coloração magenta. A vegetação agrícola apresenta uma maior resposta nas polarizações cruzadas, nesta representação. Na Figura 4.8 (c), com polarização elíptica, a floresta se confunde nos tons de magenta e verde conforme os picos de sinal apresentado na RP. Áreas agrícolas se alternam no mesmo verde e magenta, no entanto em níveis de cinza escuros, cujo sinal mínimo para esta representação da onda foi evidenciado na RP anteriormente.

4.5 Considerações

Foram apresentadas as respostas polarimétricas para diferentes usos e coberturas da terra em floresta tropical amazônica no Brasil, usando banda C orbital. As RP gráficas foram comparadas e permitiram a extração de informações quantitativas de valores máximos, mínimos e ângulos de elipticidade e orientação. Os valores mínimos e máximos foram empregados na fração de polarização, o qual permitiu observar o efeito da proporção da onda despolarizada na assinatura. O efeito de cada componente das áreas amostradas sobre a despolarização da onda pôde ser observado no coeficiente

de variação das RPs, em que se destacaram as classes solo exposto e agricultura. As informações de fase descreveram, para algumas classes, os mecanismos de espalhamento, e sua possível influência em uma classificação de imagens. De uma maneira geral, não foram observados comportamentos específicos para cada classe, apesar de tendências terem sido detectadas.

Este conjunto preliminar de análises foi empregado no entendimento das imagens sintéticas. A interpretação, empregando as variações de cor, permitiu a identificação de mudanças na intensidade do sinal. Os resultados antecipam a baixa discriminação entre as classes de estudo em abordagens de classificação automática. Entretanto, sugere-se a associação de técnicas de classificação polarimétrica a uso da síntese de polarização. Os próximos capítulos incluem a classificações e o potencial dos métodos utilizados aqui na identificação de classes.

5. IDENTIFICAÇÃO DE CLASSES DE USO E COBERTURA DO SOLO EM FLORESTA TROPICAL POR MEIO DA TÉCNICA DE MUDANÇA DE BASE POLARIMÉTRICA

5.1 Introdução

A classificação do uso e cobertura do solo é uma das mais importantes aplicações do sensoriamento remoto por radar polarimétrico – PolSAR (QUEGAN et al., 2000). Esta afirmação deve-se ao maior conjunto de informação sobre os objetos que o dado polarimétrico proporciona em relação às imagens convencionais (KASISCHKE et al., 1997). O conjunto complexo de informações SAR, associado às necessidades em monitorar, com rigor, as florestas tropicais, torna-se um campo amplo de estudo.

O desmatamento em florestas tropicais, substituindo a cobertura natural por agricultura, pecuária extensiva, expansão dos núcleos urbanos, entre outros usos, revela-se preocupante, quando desordenado (COHENCA, 2007). Foley et al. (2005) apresentaram as consequências do desequilíbrio ambiental no desenvolvimento agrícola. Dentre suas conclusões, para um cenário pouco sustentável, apesar do fortalecimento agrícola e disponibilidade de alimentos, nota-se: a) aumento na disseminação de doenças; b) redução da disponibilidade de recursos naturais; c) comprometimento da qualidade da água, ar e clima; e d) redução da biodiversidade / habitats.

O mapeamento da Amazônia brasileira é realizado desde 1988, através de programas de monitoramento do INPE, empregando dados do sensor *Thematic Mapper* (TM) dos satélites Landsat (INPE, 2001). O uso de sistemas SAR supri a indisponibilidade de dados ópticos em programas operacionais para monitorar o desmatamento na Amazônia (ALMEIDA FILHO et al., 2005), assim como, contribui no incremento de informações acerca de objetos, fornecendo dados como biomassa, volume e estrutura vegetal, entre outros.

Apesar da banda C não ser a mais adequada na estimativa de parâmetros florestais, seu emprego no monitoramento do uso do solo pode ser bem sucedido (DOBSON et al., 1996). Um exemplo disto é o trabalho de Quegan et al. (2000) que fizeram o monitoramento da expansão de áreas de pastagem e florestas secundárias com dados SAR na banda C (satélite ERS – *Earth Resources Satellite*) em áreas teste na Polônia, Finlândia e Reino Unido. Devido ao baixo grau de penetração da banda C na vegetação, interagindo nas camadas superiores dos dosséis vegetais, o retroespalhamento em dosséis de menor densidade e estrutura simples facilita a interpretação de resultados.

Embora as imagens PolSAR contribuam com a identificação de classes de cobertura do solo e feições da vegetação, a aplicação da informação polarimétrica é ainda um novo campo de estudos. A alta precisão na extração automática de informações, a partir de imagens SAR polarimétricas, é um dos requisitos para aplicações bem sucedidas destes dados em florestas tropicais.

Neste capítulo, o principal objetivo é empregar a técnica de mudança de base polarimétrica como ferramenta na identificação dos usos e coberturas do solo em floresta tropical. Deste modo, pretende-se verificar a contribuição da mudança de base polarimétrica na precisão de identificação de classes da vegetação em relação às polarizações convencionais.

5.2 Síntese de polarização

Radares polarimétricos convencionais operam com uma antena de polarização fixa para ambos os sinais refletido e transmitido (VAN ZYL et al., 1987). Assim sendo, a combinação dos sinais transmitido e recebido, para todos os elementos da célula de resolução de uma imagem, são sintetizados em uma matriz de espalhamento. Ao ocorrer esse processo, inúmeras informações sobre a superfície do terreno, contidas na onda retroespalhada, são perdidas.

Embora a representação da resposta dos objetos seja em um único estado de polarização, havendo perda de informação, este não constitui barreira ao

reproduzir qualquer outro estado (LEE e POTTIER, 2009). O principal benefício desta informação, ao comparar com sistemas de aquisição de imagens simplificados, é o conteúdo de informação associado a um espalhador. A síntese de polarização tende a explorar o conteúdo de informação acerca de um objeto desconhecido nas polarizações convencionais (BOERNER et al., 1999).

Deste modo, a síntese de polarização oferece um mecanismo para encontrar a máxima separação de classes. Segundo Boerner et al. (1999) maximizar o contraste entre duas classes de cobertura do solo tal que elas possam ser distinguidas corretamente figura entre os problemas em se classificar dados multi-dimensionais.

Um exemplo do uso da síntese de polarização, para distinguir classes de uso do solo, está o trabalho de Touzi et al. (2004b). Seu trabalho procurou distinguir seis tipos florestais sob condições climáticas de inverno e primavera. Touzi et al. (2004b) observaram que, ao utilizar a síntese de polarização para simular imagens com polarização circular, a classe com dominância de determinada conífera obteve realce perante as demais classes. O mesmo realce foi observado ao comparar com as polarizações tradicionais HH e HV.

Anterior a Touzi et al. (2004b), Kwok et al. (1994) realizaram a análise de respostas polarimétricas para identificar povoamentos de três essências florestais distintas. A resposta polarimétrica de um objeto é a primeira aproximação da síntese de polarização e indica o grau de espalhamento da onda provocado pelos elementos da célula de resolução.

Portanto, entender a resposta polarimétrica torna possível a seleção dos parâmetros da elipse a ser sintetizada (SERVELLO et al., 2009). Os ângulos de elipticidade (χ) e orientação (ψ) foram obtidos conforme estudos no capítulo anterior, sendo: $\psi = 0^\circ$ com $\chi = 45^\circ$ e $\psi = 45^\circ$ com $\chi = 30^\circ$. Estes valores são indicados como ângulos propícios ao realce de classes como pastagem e floresta. Assim sendo, serão estes os ângulos utilizados na mudança de base

polarimétrica. Na prática, pouco se sabe se o realce de diferenças é suficiente para tornar operacional esta técnica.

Haja vista que o retroespalhamento na banda C ocorre com maior intensidade nas camadas superiores da vegetação, espera-se alta confusão na discriminação de alvos vegetais (WANG et al., 1994). Esta confusão pode se agravar com o efeito da chuva, que aumenta o retroespalhamento de áreas florestais e de solo nu, por exemplo. Dependendo do grau de espalhamento, o conflito entre as classes torna-se evidente, impossibilitando distinguir regiões florestais, ou desflorestadas, das demais classes de maneira automatizada.

5.3 Modelo de classificação de Wishart

Este trabalho emprega o modelo de classificação baseado na distância de Wishart. Nesta classificação supervisionada, os pixels são classificados nas categorias de uso do solo, de acordo com as amostras de treinamento, por um classificador de máxima verossimilhança. Desta forma, o classificador segue três fases:

- 1) Treinamento do classificador, com a seleção de amostras, separando-as em grupos ou classes que serão inseridos no algoritmo de segmentação;
- 2) O algoritmo de segmentação estabelece, para as amostras, ferramentas de decisão para inclusão em uma classe. A decisão é definida por meio da máxima verossimilhança da matriz de coerência (ou covariância) do pixel ser semelhante à amostra;
- 3) O classificador analisa pixel a pixel, estabelecendo a inclusão com base em 1 e 2.

A ferramenta de decisão para dados complexos aplica o algoritmo de Wishart, a matriz de coerência complexa (\mathbf{T}), para o pixel a ser classificado \mathbf{P} , em que a base de representação é uma matriz de Pauli, será usado para computar sua distância em cada classe m (Equação 5.1). A distância é então definida por:

$$d(T, V_m) = \ln |V_m| + \text{Tr}(V_m^{-1} T) \quad (5.1)$$

onde V_m é a matriz de coerência média para a classe objeto m . Atribui-se ao pixel P a classe com menor distância mensurada (LEE e POTTIER, 2009; LEE et al, 2004; CLOUDE e POTTIER, 1996).

Este classificador foi selecionado para a classificação do uso do solo por Raimadoya e Trisasongo (2007). Estes autores analisaram este modelo de classificação, disponível no programa PolSARpro 4.1, no monitoramento de plantio e extração florestal. Os melhores resultados mostraram 87% de acerto na identificação de área recém desmatada, e em torno de 60% de acerto para áreas com uso diverso. As classes com cobertura florestal, em diferentes idades, apresentaram acertos entre 40 e 47%. Este classificador é empregado no trabalho de Ainsworth et al. (2007), ao comparar imagens polarimétricas e polarizações simples no estudo do uso e cobertura do solo. Neste caso, o foco não foi o classificador, e sim em verificar a informação que é perdida ao empregar polarizações simples ao invés de imagens completas em polarização.

5.4 Metodologia

Ao realizar o processo de mudança de base, visando favorecer a distinção entre classes, espera-se que o objeto em foco apresente atenuação ou realce no sinal espalhado. Deste modo, o contraste entre dois objetos torna-se maior, alterando as propriedades do retroespalhamento para a classe de interesse. Este passo constitui a fase inicial ao reconhecimento de padrões ao classificador.

A base convencional, linear, expressa nas polarizações HH, HV, VH e VV, é empregada na síntese das bases polarimétricas elíptica ou circular. Estas novas bases apresentam ângulos de elipticidade e orientação definidos. Neste trabalho, utilizou-se a base polarimétrica elíptica, como apresentado nos resultados do Capítulo 4, em que: $\psi = 0^\circ$ com $\chi = 45^\circ$ e $\psi = 45^\circ$ com $\chi = 30^\circ$.

As operações empregando dados polarimétricos foram geradas no aplicativo PolSARPro 4.3.1. Trata-se de uma ferramenta gratuita para processamento de dados de radar, a qual possui implementado o algoritmo de classificação de Wishart e ferramentas de mudança de base polarimétrica (POTTIER et al., 2006).

Aplicando um programa de análise polarimétrica, é possível obter as pseudo-imagens polarimétricas que contenham as informações segundo a elipse que se deseja representar (AINSWORTH et al., 2007). Deste modo, emprega-se o classificador supervisionado, baseado na distância de Wishart, para classificação dos dados polarimétricos, a fim de estudar as variações obtidas ao realizar a síntese da polarização e o incremento em informação na identificação de classes de uso e cobertura do solo.

Também se realizou a classificação supervisionada das imagens de amplitude HH e HV. Neste caso, empregou-se um classificador de máxima verossimilhança. A partir das amostras de treinamento, define-se uma ferramenta de decisão com base na probabilidade de ocorrência do pixel na classe. A seleção para as amostras de treinamento dos classificadores consideraram os dados de campo como referência (Apêndice A). As amostras foram selecionadas em áreas homogêneas com características visuais semelhantes às apresentadas nos dados de campo.

Embora o princípio estatístico (distribuição estatística das amostras) para os classificadores utilizados aqui apresente diferenças, a análise em questão considera o produto final do classificador (KASISCHKE et al., 1997; LU et al., 2004). Ou seja, a qualidade da classificação, assegurada na escolha de amostras de treinamento, associa como fonte principal de variação o tipo de dado inserido no classificador.

Ao selecionar o mesmo classificador, que trabalhe com dados polarimétricos em sua totalidade (HH+HV+VH+VV+ fase), para as transformações de base polarimétrica, bem como a seleção de amostras de treinamento que se

repetem para as classificações, assegura que as diferenças apresentadas na classificação provêm das imagens utilizadas. A cena RADARSAT-2 foi submetida igualmente ao mesmo tratamento inicial, onde se emprega o filtro Gamma com janela 5x5, como redutor de ruído *speckle*. Tal configuração de filtro foi selecionada em virtude de experimentos em trabalhos análogos tais como: Prado (2009); Santos et al. (2008); e Dutra et al. (2007).

Após a geração das imagens em nova base polarimétrica e classificações, distribuiu-se amostras de teste para validação das imagens. As amostras de teste seguem as informações obtidas em campo, conforme descrição das classes no Capítulo 4, simultâneas ao processo de aquisição das cenas. Mantiveram-se as mesmas amostras de teste para as diferentes classificações. Sendo assim, as variações provenientes da mudança na base polarimétrica refletem-se nos indicadores de acurácia de classificação.

As classificações, quando comparadas com os dados de teste geram matrizes indicando os pontos classificados errônea e corretamente. Neste trabalho, empregou-se o índice kappa, como medida de concordância entre as matrizes de classificação (PRADO, 2009).

5.5 Resultados e discussão

A partir das amostras de treinamento, para as imagens utilizadas, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 5.1.

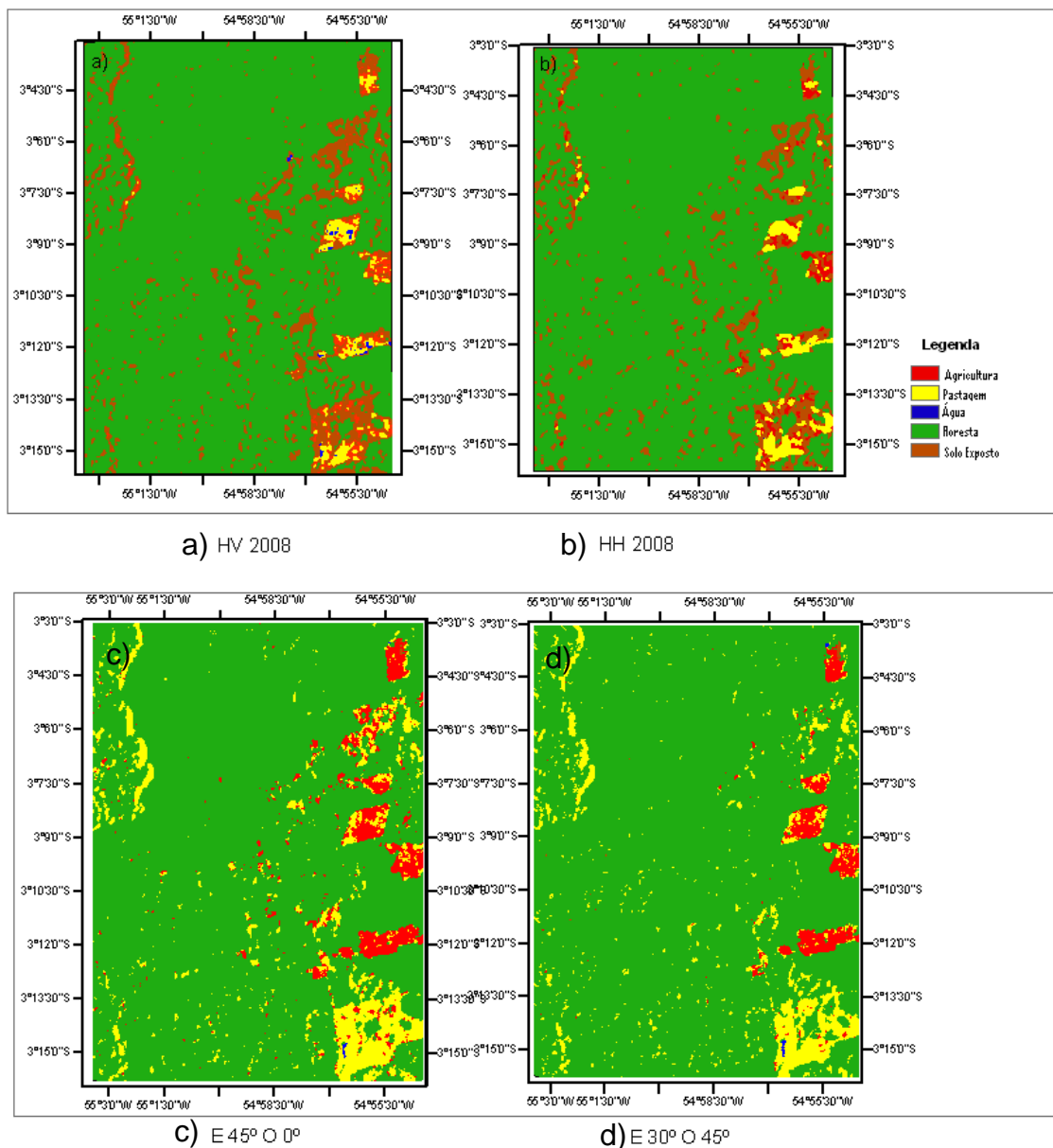


Figura 5.1 – Classificações de uso do solo em cena adquirida em 2008. Os resultados de classificação empregam polarizações simples (a) HH e (b)VV, mudança da base polarimétrica (c) elipticidade 45° e orientação 0°; e; (d) elipticidade 30° e orientação 45°).

Ao visualizar as classificações na Figura 5.1, observa-se que as polarizações simples (HH e VV) realçam a classe de solo exposto. Nas imagens polarimétricas, a classe de ocorrência comum é a pastagem. Tal situação está

associada ao conjunto de espalhadores contido na matriz de espalhamento e nem sempre presente nas imagens com polarização simples.

O desempenho do classificador em identificar corretamente um objeto pode ser quantificado por meio de ferramentas estatísticas. Neste sentido empregamos o índice kappa, consolidado em diversos trabalhos. O índice kappa é uma medida de concordância entre as informações prestadas na classificação e uma verdade de campo. Pode ser gerado para cada classe ou mesmo para a classificação geral. A Figura 5.2 apresenta o índice kappa obtido para cada classe de uso do solo.

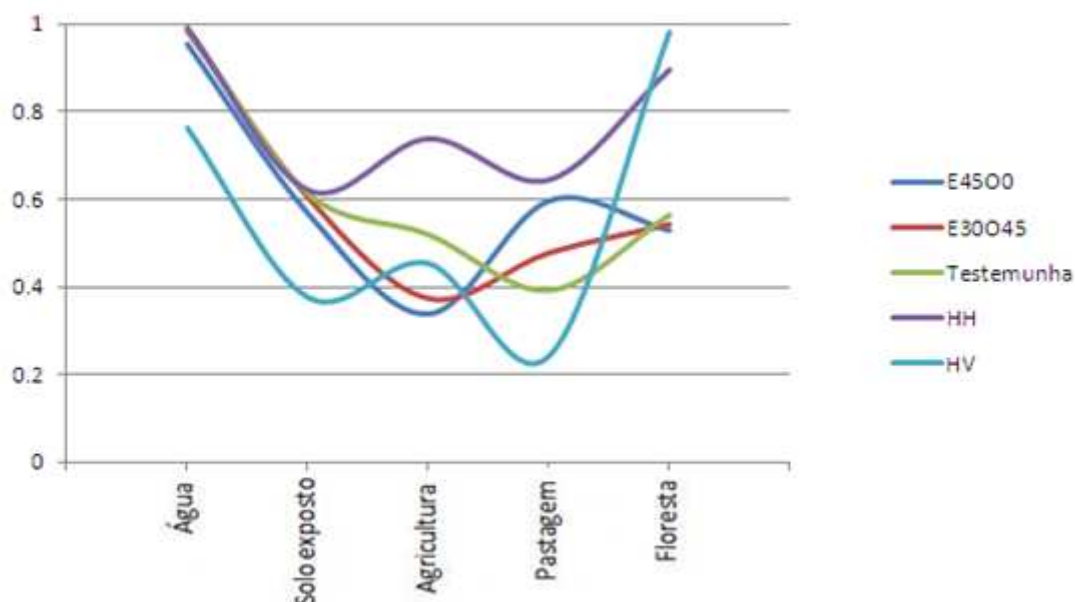


Figura 5.2 – Índice kappa por classe de uso do solo e classificação empregada. Observa-se E45O0 indica os resultados para a classificação da imagem de base elíptica cujos parâmetros foram $\psi = 0^\circ$ com $\chi = 45^\circ$. E30O45 indica para a classificação da imagem simulada com parâmetros $\psi = 45^\circ$ com $\chi = 30^\circ$. Testemunha é a classificação da imagem completa em polarizações em base linear, matriz de T. HH e HV as classificações obtidas para as imagens em amplitude de polarização HH e HV respectivamente.

Ao empregar o índice kappa por classe, observa-se na Figura 5.2 que a classificação da imagem na polarização HH demonstra ligeira melhora em relação às demais. A polarização cruzada HV, entretanto, destaca-se na classificação de áreas florestais. Tal observação se explica com a interação da radiação de banda C no interior da copa das árvores, que torna maior o efeito da despolarização, pois o retroespalhamento carrega informações da estrutura geométrica dos objetos imageados. As variadas estruturas no interior da copa ressaltam essa informação na polarização cruzada.

A classificação de áreas de pastagem apresenta intervalo significativo ao se empregar a mudança de base, em relação aos dados polarimétricos convencionais. Tal fato fora previsto no Capítulo 4 deste trabalho. Áreas de solo exposto, embora com índices satisfatórios, apresentam-se confusas na visualização (Figura 5.1). Deste modo, asseguram a necessidade de novas amostras de campo. A discriminação da classe água foi elevada em ambas as classificações. Atribui-se este fato ao baixo grau de despolarização da onda nesta classe bem como nas respostas polarimétricas e índices de caracterização da onda apresentados no Capítulo 4.

5.6 Considerações

O sucesso do emprego de imagens de radar polarimétricas no mapeamento de uso do solo está sujeito às classes consideradas. Características dos objetos na superfície afetam de maneira significativa a qualidade das classificações. Dentre as principais influências na qualidade da classificação destacam-se: a) o teor de umidade na vegetação; b) a orientação do sensor durante a aquisição da cena (descendente); c) a polarização da onda; e e) os efeitos do espalhamento.

A ocorrência de precipitação em data próxima à aquisição das cenas acarretou em um aumento no espalhamento da onda. Embora esta influência não tenha sido quantificada neste trabalho, atribui-se aos efeitos de umidade o conflito

ocasionado em áreas de florestas identificadas como pertencente a outras classes (DOBSON et al., 1994). A influência da umidade foi realçada por meio da orientação do sensor durante a obtenção da imagem. A visada descendente realçou feições de relevo, acarretando omissão da classe floresta em alguns pontos.

O grau de despolarização da onda da Banda C apresenta forte relação com as camadas superiores da vegetação. À medida que as camadas superiores tornam-se densas ou sofrem variações em seus constituintes (com a presença de chuva, variações de biomassa, entre outros), o grau de despolarização da onda aumenta. Este fato causa um aumento no ruído da imagem e dificulta a interpretação dos dados.

A radiação despolarizada em cada classe de uso do solo influenciou os resultados de mudança de base polarimétrica. Estes se apresentaram satisfatórios somente para as classes em que se evidencia pouca despolarização da radiação.

Os classificadores ou mesmo as amostras não se apresentaram sensíveis ao incremento em informação associado aos dados polarimétricos. Desta maneira a polarização HH apresentou índices kappa superiores aos obtidos com dados polarimétricos. Sugere-se o aprimoramento de classificadores que abordem em sua totalidade os dados polarimétricos, assim como a realização de classificações que considerem novas amostras de treinamento e teste.

6. DETECÇÃO DE MUDANÇA NA COBERTURA DO SOLO EM FLORESTA TROPICAL: UMA ABORDAGEM COM DADOS POLARIMÉTRICOS

6.1 Introdução

A expansão da agricultura e pecuária figura entre os principais agentes propulsores da degradação ambiental no Estado do Pará. Estudos da dinâmica de uso e cobertura do solo na Amazônia revelam a substituição da floresta por culturas agrícolas e pastagem (MURA et al., 2009). Esta mudança na paisagem tem influência direta sobre a estrutura socioeconômica e ambiental de uma região (SÖNMEZ et al., 2009).

À medida que o monitoramento sistemático de uma área torna-se necessário, deve-se considerar o uso de imagens SAR (QUEGAN et al., 2000), especialmente em regiões cuja nebulosidade limita o uso de sensores ópticos, a exemplo da região da Floresta Nacional do Tapajós (COHENCA, 2007).

A evolução dos sistemas SAR trouxe mecanismos polarimétricos de aquisição de imagens, proporcionando um maior conteúdo de informação a cerca dos objetos na superfície terrestre. Assim, atribui-se a classificação do terreno como a principal aplicação do sensoriamento remoto por dados polarimétricos (ZOU et al., 2010).

Outros dados SAR já utilizados no estudo da dinâmica da paisagem, como os do JERS-1 (CURRAN e KUPLICH, 1999), MAPSAR (MURA et al., 2009), ALOS PALSAR (LEE et al., 1999; ALMEIDA FILHO et al., 2005), e R99B SAR (GUERRA et al., 2009), apresentaram resultados potenciais para detecção de objetos. O uso da banda C já apresenta um histórico de utilização, pois está disponível nos sistemas ERS-1 e ERS-2, ENVISAT, SIR-C, RADARSAT 1 e 2 (QUEGAN et al., 2000; RIGNOT e Van ZYL, 1993; PARK e CHI, 2008),

sistematicamente disponíveis, mesmo na presença de nuvens (RIGNOT e VAN ZYL, 1993, 1999).

O RADARSAT-2 é um sensor que foi lançado em dezembro de 2007 e se encontra em fase experimental, com um campo de aplicação em florestas tropicais ainda pouco explorados. Os resultados encontrados para a banda C polarimétrica em nível orbital muitas vezes limitam-se ao campo teórico, o que por vezes torna abstrata a aplicabilidade do sensor para detecção de mudanças em florestas tropicais.

Com isto, este trabalho visa detectar as mudanças ocorridas na Floresta Nacional do Tapajós entre os anos de 2008 e 2009 por meio de imagens RADARSAT-2.

6.1.1 Sistemas SAR em estudos sistemáticos de detecção de mudanças

Detectar mudanças trata do processo de identificar diferenças no estado de um objeto ou fenômeno por observação em diferentes instantes (SINGH, 1989). À medida que se aprimora a detecção de mudanças na superfície da Terra, aprimora-se o entendimento entre as relações do homem com o ambiente (SANTOS e GONÇALVES, 2009), a compreensão dos atores que impulsionam mudanças (pecuária, agricultura, oferta de madeira, etc.) e a gestão dos recursos naturais (LU et al., 2004).

Quando os processos de uso e ocupação ocorrem de forma acelerada, o levantamento sistemático de uma área torna-se necessário. A partir de então, deve-se considerar o uso de imagens adquiridas por Radares de Abertura Sintética (SAR).

De fato, as potencialidades da banda C adquiridas por radar orbital aparecem em diferentes estudos. Contudo, ao inserir imagens SAR no contexto de detecção de mudanças há a necessidade de avanços. Isto se deve ao fato que detectar mudanças requer a aplicação de metodologias específicas. Assim, visando reduzir os efeitos provocados por desconformidades ocasionadas pela

defasagem temporal entre as imagens, Lu et al. (2004) sintetizaram as metodologias de amplo uso para identificar mudanças em duas imagens adquiridas em tempos distintos, mas nem todas foram aplicadas ou se enquadraram às imagens SAR.

Dentre as citações sobre sistemas SAR no contexto temporal, Rignot (1993), propôs metodologias para análise de imagens do satélite ERS-1 por meio das diferenças detectadas entre as classificações. De outra maneira, Park e Chi, 2008, utilizaram o método de componentes principais em séries temporais RADARSAT-1 e ENVISAT na identificação de usos do solo.

As experiências com análise temporal de dados SAR, assim como nos trabalhos publicados no parágrafo anterior, apresentam resultados gráficos obtidos em amostras pontuais. Usualmente empregam como imagens para análise produtos contendo informação sobre: a) os efeitos do retroespalhamento em relação à biomassa, b) idade do povoamento, c) entropia, d) ângulo alfa, e) estrutura da vegetação, e, de maneira mais recente, f) a fase, como variáveis explicativas do comportamento dos objetos.

As imagens SAR podem fornecer informações adicionais para o mapeamento de detecção de mudanças (KASISCHKE et al., 1997). No entanto, a complexidade de análise da informação em imagens polarimétricas nem sempre torna seu uso operacional como alternativa a imagens ópticas. Neste sentido, uma alternativa para reduzir os problemas intrínsecos às imagens em sistemas de detecção de mudança é adotar as respectivas classificações de imagens SAR.

Ao utilizar as classificações como base para a detecção de mudanças a principal desvantagem estará na qualidade da identificação de classes, quando esta for baixa. Este erro pode ser minimizado quando se realiza uma amostragem significativa de pontos de verdade em campo, associado ao conhecimento local. Para o caso de classificações acuradas, a análise de

detecção de mudança é realizada com facilidade e aponta os locais e extensão das mudanças.

A influência da sazonalidade nos dados de radar foi observada no trabalho de Ahern et al. (1993). O trabalho apresenta as diferenças fisiológicas da vegetação nas estações outono/inverno e primavera/verão, sobre as polarizações HH, HV, VH e VV. Da mesma forma, Dobson et al., (1995) descreveram a influência do conteúdo hídrico, associado ao tipo de vegetação, na radiação espalhada.

6.2 Metodologia

A partir das imagens descritas no Capítulo 4 realizou-se a classificação, que considerou as classes de floresta e não-floresta como as principais classes empregadas nos sistemas de monitoramento da supressão da vegetação florestal no Brasil (QUEGAN et al., 2000; GUERRA et al., 2008, PRODES, 2009). Este mapa de classes foi gerado com o uso de um método de classificação supervisionada, que utiliza a distância de Wishart (LEE et al., 1999), com uma janela 7x7, de modo a ampliar as amostras do classificador e corrigir os efeitos causados pelo ruído. As amostras foram selecionadas com base nos dados de campo, e utilizadas como treinamento e teste do classificador.

A verdade de campo, utilizada nas amostras de treinamento e teste, foi obtida no período de 29 de setembro a 01 de outubro de 2008 e do dia 8 ao dia 28 de setembro de 2009, próximo à aquisição das cenas RADARSAT-2 (dados do trabalho de campo no Apêndice A). Para verificar a acurácia das classificações, empregou-se o índice Kappa.

A mudança na cobertura do solo foi analisada por meio do cruzamento entre as classificações de 2008 e 2009, o que gerou a identificação de áreas que sofreram supressão ou incremento de vegetação.

6.3 Resultados e Discussão

Segundo Guerra et al. (2008), o estudo do desmatamento em floresta tropical sofre variações nas dimensões de classes detectadas ao se empregar as diferentes polarizações. Neste trabalho, as imagens, no contexto que foram adquiridas, apresentaram diferenças que refletiram na classificação. Dentre estas, nota-se: a órbita, o ângulo de incidência e a ocorrência de precipitação na cena de 2008.

A cena de 2008 foi adquirida com visada descendente, ao passo que a imagem de 2009 foi adquirida em visada ascendente. Tais diferenças causam realce ou mascaramento das feições de relevo. O mesmo efeito é causado quando há variações no ângulo de incidência.

A Tabela 6.1 apresenta um panorama da mudança na cobertura do solo na FNT e entorno. A tabela trata da evolução da cobertura florestal onde há uma redução da área floresta, com incremento em desmatamento. A presença do relevo propicia a ocorrências de distorções ocasionadas na visada descendente. Nesta situação, notamos a ocorrência de distorções do tipo sombreamento.

Tabela 6.1 - Evolução da cobertura florestal entre os anos de 2008 a 2009.

Ano/Classe	Floresta	Não - Floresta
2009 (ha)	35667	3340
2008 (ha)	35148	3860

O incremento em área desmatada apresentado na Tabela 6.1 foi de 2%. Tal indicador demonstrou que houve uma conversão de 520 ha de áreas florestadas em áreas de uso diversificado. Segundo o Programa de Monitoramento da Amazônia - PRODES, para o mesmo período (2008-2009) e para a mesma área, foram identificados 100 ha de área desmatada (PRODES,

2010). Vale ressaltar que o PRODES possui atuação limitada, no qual foi identificada uma área total acima de 1600 ha com cobertura de nuvens.

Ao passo que a imagem óptica apresenta cobertura de nuvem, a imagem SAR de 2008 sofreu influência do relevo na classificação de uso do solo. Como podemos observar na Figura 6.1, o classificador associou áreas sombreadas pelo relevo em áreas de floresta à classe não floresta. Atentos para tal fato faz-se necessário a correção por edição manual das feições de relevo.

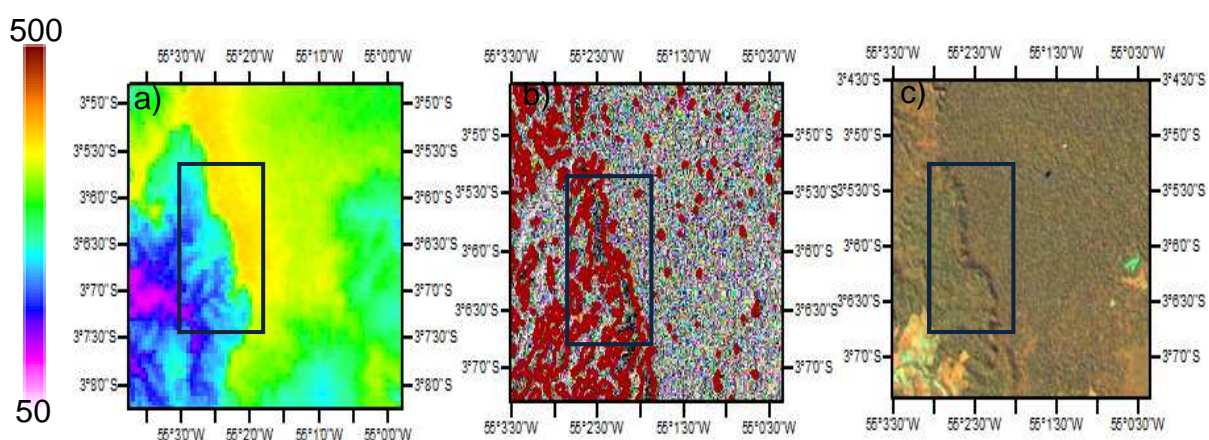


Figura 5.2 - Erro de comissão para a classe desmatamento ocasionado pelo sombreamento do relevo. Em (a), modelo digital de elevação SRTM, (b) imagem RADARSAT-2 2008 indicando os polígonos de não florestados classificados, e, (c) imagem Landsat-5 3R4G5B de agosto de 2008. Os detalhes indicam a ocorrência do erro de omissão.

O erro de omissão de classe floresta pode ser resolvido ao empregar o Modelo Digital de Elevação como ferramenta para a edição das classes utilizadas. Como se desconhece um classificador que emprega o uso de dados de elevação, a edição de regiões foi feita manualmente. Neste contexto, cabe ao intérprete refinar os resultados das classificações. Tal metodologia é usualmente empregada nos atuais sistemas de monitoramento de uso e cobertura no Brasil como PRODES e DETER, eliminando significativamente erros de classificação.

6.3.1 Mudança na cobertura do solo entre os anos de 2008 e 2009.

Ao se tratar de imagens de radar, a variabilidade temporal também exibe características dependentes da idade ou biomassa (QUEGAN et al., 2000). Tais parâmetros determinam a exatidão na classificação de diferentes estádios da vegetação em relação à floresta. A Figura 6.2 apresenta as classificações entre os anos 2008 e 2009 na qual se destaca diferenças pouco significativas, depois de corrigidos os efeitos decorrentes do relevo por meio de edição manual.

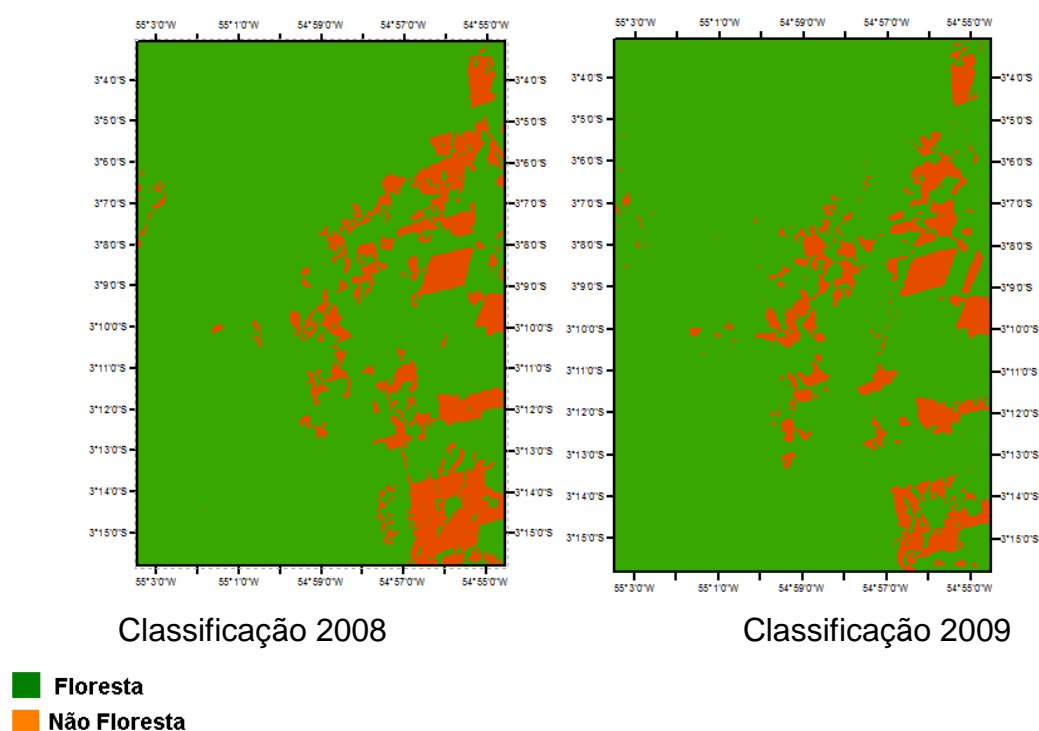


Figura 6.2 - Imagens RADARSAT-2 classificadas para os anos de 2008 e 2009.

Ao analisar as imagens separadamente, observamos o desempenho do classificador na delimitação dos polígonos das classes. A Figura 6.3 apresenta as variações entre os limites de classes para 2008 e 2009. Em primeira instância (figura 6.3(a)), observa-se a classificação para 2008, em destaque os limites da classe não florestada, seguido da imagem de 2009 (figura 6.3(b)). A figura 6.3(c) contém a sobreposição entre os limites de classes não floresta, tendo uma imagem Landsat-5/TM obtida em agosto de 2008 ao fundo.

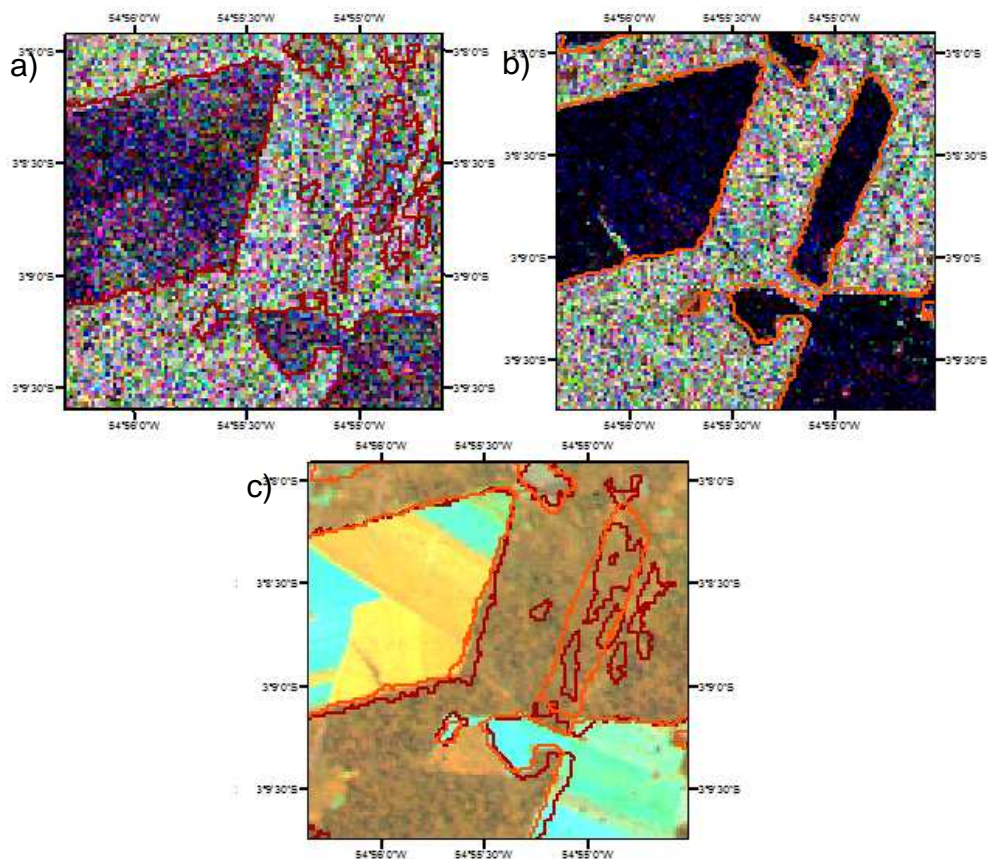


Figura 6.3 - Delimitação dos polígonos da classe não florestada. Em (a), imagem Radarsat-2 2008, em (b) imagem Radarsat-2 2009, (c) imagem Landsat TM 5.

Nota-se uma redução na acurácia da classificação de áreas não floresta em pontos da imagem. Esta redução pode ser proveniente da confusão observada entre os estágios de sucessão floresta e capoeira ou mesmo em virtude da ocorrência de precipitação durante a aquisição de 2008, como contribuintes na geração de ruídos na imagem. A quantificação das classes é apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Matriz de classificação.

Classe	2008		2009	
	Não Floresta	Floresta	Não Floresta	Floresta
Não Floresta	92,29	7,71	96,78	3,22
Floresta	49,92	50,08	19,27	80,73

A matriz de classificação resultante do processamento supervisionado apresenta a relação entre os pontos amostrados e os valores reais em campo. Observa-se que a classificação obtida em 2008 apresenta confusão para a classe floresta em relação as amostras em campo para o período. A acurácia global para a classificação de 2008 foi de 71,19%.

Ao passo que a classificação de 2008 apresentou conflito entre as amostras de campo verificadas, a imagem de 2009 aprimora o resultado, cuja acurácia global foi de 88,76%, reduzindo o conflito, sobretudo na identificação de áreas com floresta. Tal fato representa a estabilidade na aquisição da informação, sem que haja forte influência de umidade, proveniente de chuvas e em função do modo de imageamento ascendente, em que as variações de relevo anteriormente sombreadas, passaram a estar iluminadas.

6.3.2 Mudança na cobertura como resposta a polarização

A viabilidade no uso de informações polarimétricas requer estudo prévio e detalhado em sistemas de monitoramento. Após o estudo temporal, com uso puramente dos dados polarimétricos de 2008 e 2009, esta sessão analisa o efeito ao empregar apenas a informação contida em polarizações simples, como HH e HV.

O classificador empregado nas cenas simples (HH-2008, HV-2008, HH-2009 e HV-2009), foi o classificador supervisionado baseado nas mínimas distâncias entre as amostras. Tal como fundamentado por Lu et al. (2004), a avaliação de mudança se detecta nas diferenças apresentadas pelas classificações.

Sendo assim, as classificações polarimétricas (nos anos de 2008 e 2009) bem como as classificações provenientes de polarização simples HH e HV são apresentadas na Figura 6.4. O efeito do relevo, bem como do dossel florestal permanece em destaque nas imagens de 2008. Nota-se uma amenização destes efeitos na classificação obtida da polarização HV – 2008.

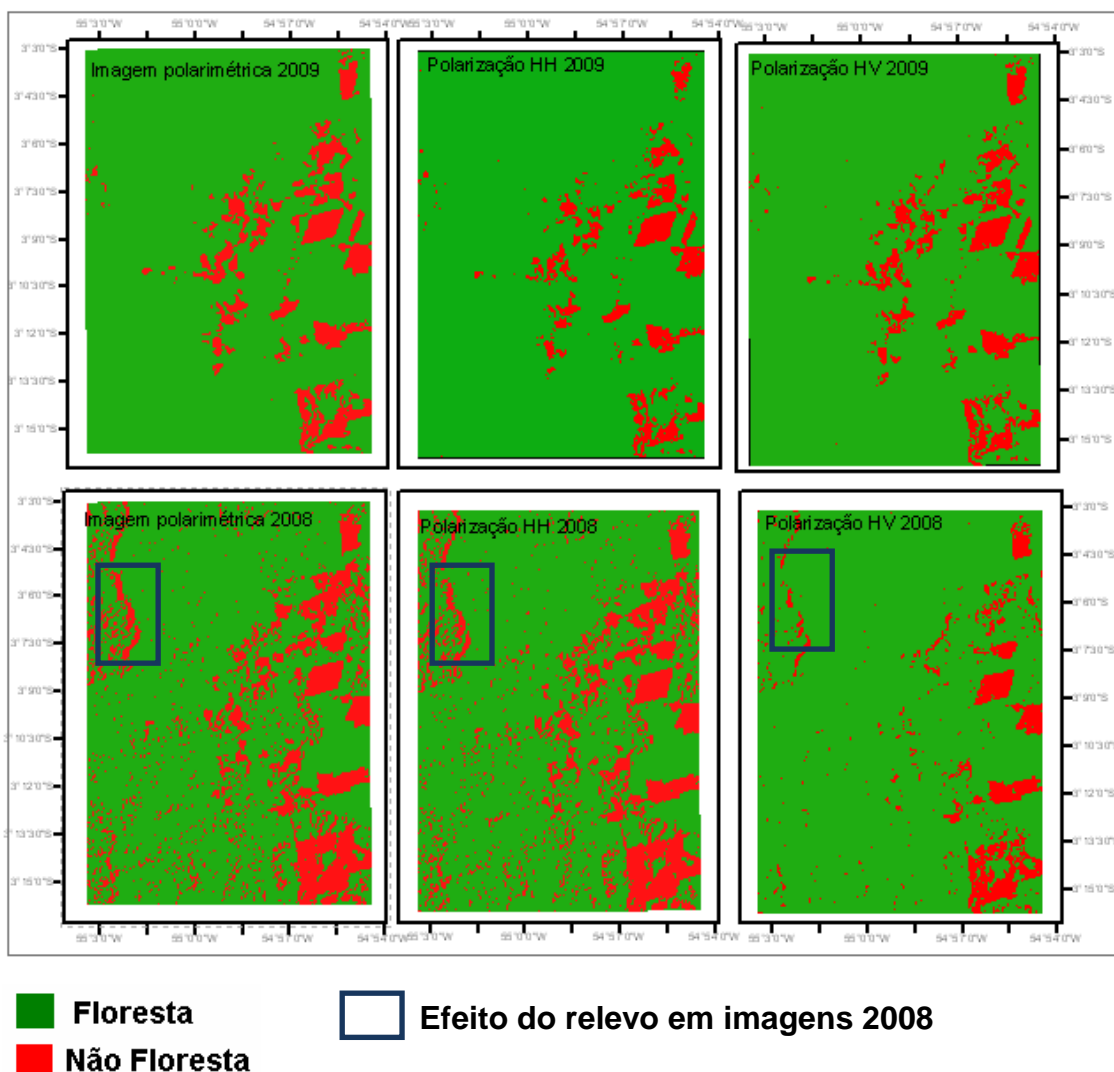


Figura 6.4 – Classificações de uso do solo. Apresentação dos resultados de classificação empregando multipolarizações e as polarizações individuais HH e VV nos anos de 2008 e 2009. Detalhe do efeito de relevo em imagem 2008.

Foi possível observar que a polarização HV para o ano de 2008 apresentou pouca influência de variações no dossel ou relevo. Apesar disto, regiões com agricultura e pastagem consolidados ao centro da imagem não foram identificados.

A análise das imagens, tais como estão, apresentaram uma redução na área de não floresta. A fim de verificar a validade desta afirmativa, por meio de amostras de campo, obteve-se a matriz de classificação. Esta por sua vez permite o cálculo do índice kappa, o qual indica a concordância entre as classificações em relação aos dados de campo. A Tabela 6.3 apresenta a variação de kappa em função da classe de uso do solo e as diferentes polarizações da onda empregada.

Tabela 6.3 – Índice kappa condicional obtido para as classes de uso do solo. As colunas indicam o valor kappa em um comparativo obtido nas classificações com imagem polarização completa (Full) e as polarizações simples nos anos de 2008 e 2009.

	Full 2008	Full 2009	HV - 2008	HH - 2008	HV - 2009	HH - 2009
Não Floresta	0.7332	0.9233	0.9299	0.7584	0.9662	0.9520
Floresta	0.2979	0.6679	0.6754	0.5485	0.9994	0.9992

Não se observou diferença significativa na identificação de classes ao empregar dados polarimétricos ou polarizações simples. Para a detecção de classes individuais, a imagem de 2009 apresentou melhor desempenho. O reduzido desempenho da cena de 2008 refletem as condições de aquisição da mesma. Tal fato implica em edição manual para corrigir as imperfeições de classificação, tornando pouco viável a automação do processo. A Tabela 6.4 indica a acurácia global e o kappa global para as classificações.

Tabela 6.4 – Índice kappa e acurácia global das classificações.

	<i>kappa</i>	Acurácia Global
Full 2008	0.4237	0.7119
Full 2009	0.7751	0.8876
HV - 2008	0.7825	0.8913
HH - 2008	0.6366	0.8183
HV - 2009	0.9825	0.9913
HH - 2009	0.9750	0.9875

A análise global da acurácia da classificação e do índice kappa refletiram as problemáticas de classificação abordada anteriormente (Tabela 6.4). Em contrapartida, as classificações para o ano de 2009 apresentaram-se com acurácia temática elevada.

Vale ressaltar que o conflito ocasionado em área florestais no ano de 2008 certamente possui influência da precipitação que ocorreu na área. A vegetação umedecida amplia o sinal espalhado, concorrendo à causa de efeitos nas imagens.

6.4 Conclusões

Com relação às principais observações no modelo de análise temporal de imagens empregado, conclui-se:

- As informações polarimétricas, embora agreguem informação adicional ao mapeamento de uso do solo, não foram significativas na melhoria da acurácia de classificações;
- As informações de amplitude HH e HV forneceram informação suficiente para a detecção de mudanças de uso do solo;
- O relevo constitui uma fonte de erro na identificação correta de classes, onde se observa boa qualidade na classificação em regiões de relevo plano, e conflito decorrente do sombreamento em regiões de relevo acidentado;
- Os principais efeitos do relevo foram observados na classe não floresta, e com maior ocorrência na imagem de 2008, cuja visada ascendente do sensor proporcionou realce;

- Para a classe floresta, na cena de 2008, a rugosidade da cobertura florestal e a ocorrência de precipitação ocasionam o surgimento de confusão de classes;

6.5 Considerações

O uso de imagens RADARSAT-2, em primeira instância, é viável no estudo de mudança no uso e cobertura do solo. No entanto, apresenta limitações quanto à ocorrência de precipitação no ato da aquisição dos dados e limitação na identificação de classes empregando o classificador supervisionado de Wishart.

Outra problemática enfrentada foi o relevo. Em imagens de visada descendente, causou sombreamento do relevo em regiões acidentadas. O sombreamento causa a ausência da informação do solo e conflito entre classes. Deste modo, a interferência direta do usuário deve ser constante, a fim de corrigir os erros.

Na metodologia baseada em classificação supervisionada, o sistema de identificação de alvos poderá ser melhorado ao aprimorar uma nova seleção de amostras. Neste sentido, sugerem-se testes e análises baseados em princípios físicos dos alvos que busquem entender o espalhamento como fundamento à classificação e identificação de amostras de teste. Assim como se sugere o emprego de novas técnicas de classificação, e estudos avançados que visem explorar os dados polarimétricos no mapeamento de uso e cobertura do solo.

A ausência de informação por sombreamento, comparado à perda de informação da superfície por cobertura de nuvens, em sistemas ópticos, ainda é vantajosa em sistemas de monitoramento. Tal fato deve-se à possibilidade em identificar, com apoio de informações de relevo, os pontos potenciais a ocorrência da distorção, corrigindo-os.

7. CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E DIRETRIZES

A partir da análise preliminar dos dados se pode antever a aplicabilidade das informações polarimétricas em banda C. Do mesmo modo, identificou-se os principais limitantes dos dados em relação aos mecanismos de interpretação que podem ser empregados.

Nesta etapa que se discute a contribuição dos mecanismos de espalhamento e variações de fase para o conhecimento polarimétrico dos objetos, ressalta-se a construção de respostas polarimétricas. Quando observadas na literatura, em condições análogas, as respostas polarimétricas apresentam contradições, mesmo se tratando de um mesmo tipo de classe. Sendo assim, não se nota um padrão definido para estes tipos de assinatura ao empregar a Banda-C para o estudo de florestas tropicais. Avanços neste campo são necessários para entender os mecanismos e propriedades físicas que ocasionam tais divergências.

A compreensão obtida com a interpretação preliminar resultou na seleção de classes específicas de uso e cobertura do solo, voltado ao mapeamento temático com a utilização de ferramentas polarimétricas. Propomos o uso da técnica por mudança de base polarimétrica, obtendo resultados significativos quando ao agregar informações a determinadas classes de interesse.

O emprego da metodologia de mudança de base polarimétrica à interpretação do uso e cobertura do solo constitui uma nova abordagem para dados polarimétricos. Houve incremento em informação na identificação de classes em relação à imagem polarimétrica convencional. Evoluir neste campo tende a garantir o melhor uso das imagens polarimétricas.

No estudo da vegetação, a imagem polarimétrica mostra-se limitada para a distinção de classes. Observa-se conflito na discriminação entre florestas e outras classes. Como alternativa, observou-se que o uso de polarização simples traz resultados de qualidade ao se comparar com imagens

polarimétricas. Sendo assim, a utilização de imagens polarimétricas, em Banda C, pode ter seu uso limitado para aplicações em mapeamento de uso e cobertura da terra, sendo necessário considerar diversos fatores, principalmente o relevo e ocorrência de chuva nos dias que antecedem a passagem do satélite. Estudos com imagens polarimétricas em anos distintos, no campo da detecção de mudança, apresentam um amplo campo de análise, sendo necessário testar mais técnicas que possam se revelar adequadas ao monitoramento. Entretanto o uso de imagens RADARSAT-2 requer o apoio de demais sensores ópticos ou de radares como fonte complementar de informação, observando atentamente os parâmetros de aquisição de imagens. Neste contexto o programa PolSARpro consiste em uma poderosa ferramenta gratuita na exploração de dados polarimétricos.

Esta dissertação apresenta avanços na disponibilização de informações e características da Banda C, em resposta a vegetação de porte arbóreo, assim como algumas coberturas da terra de ocorrência frequente em floresta tropical. Os resultados mostram uma metodologia de uso da polarimetria por mudança de base para a identificação de classes de uso e cobertura do solo. Este campo de pesquisa ainda deve ser explorado, com a investigação das demais técnicas e ferramentas para a identificação de classes e variáveis da vegetação a partir de dados polarimétricos em banda C.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHERN, F.J.; LECKIE, D.J.; DRIEMAN, J.A.; Seasonal changes in relative C-band backscatter of northern forest cover types. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 3, p. 668-680, 1993.

AINSWORTH, T. L.; LEE, J-S.; CHANG, J. W. Classification Comparisons Between Dual-Pol and Quad-Pol SAR Imagery. INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Jul 2007, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: [s.n], CD-ROM, p.164-167, 2007.

ALMEIDA FILHO, R.; ROSENQVIST, A.; SHIMABUKURO, Y.; SANTOS, J. R. Evaluation and perspectives of using multitemporal L-band SAR data to monitor deforestation in Brazilian Amazonia. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 2, n. 4, p. 409-412, 2005.

ARAGÃO, L. E. O. E C. DE. **Modelagem dos padrões temporal e espacial da produtividade primária bruta na região do Tapajós: uma análise multi-escala.** 2004. 283 p. (INPE-11423-TDI/951). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Disponível em: <sid.inpe.br/jeferson/2004/07.14.13.33>. Acesso em: 20 fev. 2009.

BOERNER, W. M. Polarimetry in Radar remote sensing: Basic and applied concepts. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. (Eds.). **Principles and applications of imaging radar** - Manual of Remote Sensing. Nova York: John Wiley & Sons, 3. ed., v. 2, Cap. 11, p. 567-629, 1998.

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, p. 498-518, 1996.

COHENCA, D. Evolução anual de desmatamentos na Floresta Nacional do Tapajós de 1997 a 2005. SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6653-6660.

CURRAN, P. J.; KUPLICH; T. M. **Temporal analysis of JERS-1/SAR images over regenerating forests in Brazilian Amazonia.** 2009. Disponível em: <ftp://ftp.eorc.nasda.go.jp/cdroms/EORC-036/pi/4paulcur.pdf> Acesso em 15 de dez de 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS . COORDENAÇÃO GERAL DE OBSERVAÇÃO DA TERRA (INPE.OBT). **Sistema DETER** – detecção de desmatamento em tempo real. São José dos Campos, (2009) Disponível em:

<<http://www.obt.inpe.br/deter/>> Acesso em maio de 2009.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T. E PIERCE, L. E. Land-cover classification and of terrain attributes using synthetic aperture radar. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 199-214, 1995.

DOBSON, M. C.; PIERCE, L. E. 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, 1996.

DURDEN, S. L.; VAN ZYL, J. J.; ZEBKER, H. A. Modeling and observation of the radar polarization signature of forest areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n. 3, p. 290-301, 1989.

DUTRA, L. V.; CORREIA, A. H.; MURA, J. C.; SANTOS, J. R.; ELMIRO, M. T.; FREITAS, C. C. Avaliação das imagens polarimétricas da simulação MAPSAR para classificação de uso/ocupação do solo na região da Floresta Nacional do Tapajós. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 7051-7056. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. (INPE-16344-PRE/10923). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.22.36>>. Acesso em jun 2010.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. E C. DE; MACHADO, E. L. M. Análise da composição florística e fitossociológica da Floresta Nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. **Acta Amazônica**, v.35, n. 2, p. 155-173, 2005a.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; Kuplich, T. M. Mapping forest successional stages following deforestation in Brazilian Amazonia using multi-temporal Landsat images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 3, p. 635 – 642, 2005b.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E. Validação do mapeamento de uma área de floresta tropical com o uso imagens de videografia aérea e dados de levantamento de campo. Viçosa-MG. **Revista Árvore**. v. 29, n. 2, p. 227 – 239, 2005.

EVANS, D. L.; FARR, T. G.; VAN ZYL, J. J.; ZEBKER, H. A. Radar polarimetry: Analysis tools and applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 6, p. 774-789, 1988.

FREITAS, C ; SOLER, L. S. ; SANT´ANNA, S. J. S.; DUTRA, L. V.; SANTOS J. R. ; MURA, J. C. ; CORREIA, A. H. Land use and land cover mapping in the Brazilian Amazon using polarimetric airborne P-Band SAR data. **IEEE**

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 46, p. 2956-2970, 2008.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; VARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M.T.; DAILY, G. C.; GIBBIS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J.A.; PRETICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, v. 39, p. 570-574, 2005.

GAMA, F. F. **Estudo da interferometria e polarimetria SAR em povoamentos florestais de Eucalyptus sp.** 2007. 243 p. (INPE-14778-TDI/1231). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.04.12.36>>. Acesso em: 10 fev. 2009.

GIMENO, M.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J. Evaluation of RADARSAT-1 data for identification of burned areas in Southern Europe. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p. 370–375, 2004.

GONÇALVES, F. G. **Avaliação de dados SAR polarimétricos para estimativa volumétrica de florestas tropicais.** 2007. 110 p. (INPE-14777-TDI/1230). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Available from: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.07.18.38>> Acesso em julho de 2010.

GUERRA, J. B.; FREITAS, C. C.; MURA, J. C. Evaluating the potential of L band PolSAR data to discriminate deforestation increment areas in Amazon Rain Forest. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 4, p. 45-48, 2008.

HAJNSEK, I.; KUGLER, F.; LEE, S. K. e PAPATHANASSIOU, K. P. Tropical-forest-parameter estimation by means of Pol-InSAR: The INDREX-II campaign. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 2, 2009.

HESS, L. L.; MELACK, J. M.; FILOSO, S.; WANG, Y. Delineation of inundated area and vegetation along the amazon floodplain with the SIR-C synthetic Aperture Radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 4, p. 896 – 904, 1995.

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

IMHOFF, M. L. A theoretical analysis of the effect of structure on synthetic aperture radar backscatter and the remote sensing biomass. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, p. 341-352, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSO NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Plano de manejo florestal da Floresta Nacional do Tapajós**: Informações Gerais. Brasília, 2004. v. 1, p. 66.

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

KUPLICH, T. M.; SALVATORI, V.; CURRAN, P. J. JERS-1/SAR backscatter and its relationship with biomass of regenerating forests. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 12, p. 2513 – 2518, 2000.

KWOK, R.; RIGNOT, E. J. M.; WAY, J.; FREEMAN, A.; HOLT, J. Polarization signatures of frozen and thawed forests of varying environmental state. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 2, p. 371-381, 1994.

LECKIE, D. G. Forestry applications using imaging radar. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. (Eds.). **Principles and applications of imaging Radar - Manual of Remote Sensing**. Nova York: John Wiley & Sons, 3. ed., v. 2, Cap. 11, p. 567-629, 1998.

LEE, J. S.; GRUNES, M. R.; AINSWORTH, T. L.; DU, L. J.; SCHULER, D. L.; CLOUDE, S. R. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 2249-2258, 1999.

LEE, J. S.; POTTIER, E. E FERRO-FAMIL, L. Unsupervised terrain classification preserving polarimetric scattering characteristics. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 4, p. 722-731, 2004.

LEE, J. S.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**. Ed. Taylor & Francis, p. 438, 2009.

LEWIS, A. J.; HENDERSON, M. F. **Manual of remote sensing**. 3. ed. Nova York: Ed Wiley e Sons, 1998. v. 2, p 435 - 509.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIOS, E.; MORAN, E. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 12, p. 2365-2407, 2004.

MCNAIRN, H. E BRISCO, B. The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: a review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 525–542, 2004.

MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; DUTRA, L.V.; SANTOS, J. R. DOS; RUDORFF, B. F. T.; MIRANDA, F. P. DE; SILVA, M. M. Q. DA; E; SILVA, W. F. DA. MAPSAR Image Simulation Based on L-band Polarimetric Data from the SAR-R99B Airborne Sensor (SIVAM System). **Sensors**, n.9, p. 102-117, 2009.

PARK, N. W.; CHI, K. H. Integration of multitemporal/polarization C-band SAR data sets for land-cover classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29 , n. 16, p. 4667-4688, 2008.

PAIRMAN, D.; MCNEILL, S. J. Improved polarimetric SAR classification by application of terrain azimuth slope corrections. **IEEE Transactions on Remote Sensing**, p. 4468-4470, 2003.

PRADO, B. R. DO. **Análise dos dados ALOS/PALSAR (modo de imageamento FBD) para identificação dos tipos de cobertura da terra na região norte do Estado do Mato Grosso**. 2009. p. 175. INPE-16619-TDI/1595. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos-SP, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.25.12.50>>. Acesso em: 25 de jan de 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS . COORDENAÇÃO GERAL DE OBSERVAÇÃO DA TERRA (INPE.OBT). **Projeto PRODES** - monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite. São José dos Campos, (2010)
Disponível em:
<<http://www.obt.inpe.br/prodes/>> Acesso em maio de 2010.

QUEGAN, S.; LE TOAN, T.; YU, J. J.; RIBBES, F. E FLOURY, N. Multitemporal ERS SAR analysis applied to forest mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 2, p. 741-753, 2000.

QUIÑONES, M. E HOEKMAN, D. H. Exploration of factors limiting biomass estimation by polarimetric radar in tropical forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 1, p. 86-104, 2004.

RAIMADOYA, M.; TRISASONGKO, Application of PolSAR for tropical timber plantation in indonesia. POLARIMETRIC AND INTERFEROMETRIC SYMPOSIUM – PolInSAR. **Proceedings...**, Frascati, Italy, 2007.

RIGNOT, E. J. M. e VAN ZYL, J. Change detection techniques for ERS-1 SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 4, p. 896-906, 1993.

RIGNOT, E.; CHELLAPPA, R.; DUBOIS, P. Unsupervised Segmentation of Polarimetric SAR data using the covariance matrix. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 4, p. 697-705, 1992.

ROBERTS, D. A.; KELLER, M.; SOARES, J. V. Studies of land-cover, land-use, and biophysical properties of vegetation in large scale biosphere atmosphere experiment in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 377-388, 2003.

SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; CASTRO-ESAU, K. L.; KURZ, W. A.; JOYCE, A. Monitoring carbon stocks in the tropics and the remote sensing operational limitations: from local to regional projects. **Ecological Applications**, v. 19, n.2, p. 480-494, 2009.

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

SANTOS, J. R.; MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; DUTRA, L. V.; GONÇALVES, F.G. Mapping recente deforestation in the Brazilian Amazon using simulated L-band MAPSAR images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 16, p. 4879-4884, 2008.

SANTOS, J. R.; GONÇALVES, F. G. Polarimetric Responses Patterns and scattering mechanisms of Forest targets from L-Band Radar. **Revista brasileira de Cartografia**, v. 4, n. 61, p. 391-397, 2009.

SERVELLO, E. L.; KUPLICH, T. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANO, E. E. Imagens polarimétricas RADARSAT-2 na discriminação de coberturas da terra na Floresta Nacional do Tapajós. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7465-7472. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-16027-PRE/10636). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.40.55>. Acesso em abril de 2009.

SHIMABUKURO, Y. E.; MIURA, T.; HUETE, A.; ARAI, E.; ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; LATORRE, M. L. Análise dos dados hyperespectrais do EO-1 obtidos sobre a Floresta Nacional de Tapajós no estado do Pará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR), 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1099-1106. CD-

ROM. ISBN 85-17-00017-X. (INPE-16176-PRE/10779). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.17.13.39>>. Acesso em jul de 2010.

SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; ARAI, E.; FREITAS, R. M.; LIMA, A.; VALERIANO, D. M.; BROWN, I. F.; MALDONADO, M..L..R. Fraction images derived from Terra MODIS data for mapping burnt areas in Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 1537-1546, 2009.

SIGNH, A. Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 989-1003, 1989.

SOARES, J. V.; RENNÓ, C. D.; FORMAGGIO, A. R.; YANASSE, C. DA C. F.; FRERY, A. C. Na investigation of the selection of texture features for crop discrimination using SAR imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 234–247, 1997.

SÖNMEZ, N. K.; ONUR, I.; SARI, M.; MAKTAV, D. Monitoring changes in land cover/use by CORINE methodology using aerial photographs and IKONOS satellite images: a case study for Kemer, Antalya, Turkey. **Source International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 7, p. 1771-1778, 2009.

STAPLES, G. e HORNSBY, J. Turning the scientifically possible into the operationally practical: RADARSAT-2 Polarimetry applications”, International Geoscience And Remote Sensing Symposium, 24 -28 de Jun 2002, **Proceedings CD-ROM...**, p. 1474-1476, 2002.

TOUZI, R.; BOERNER, W. M.; LEE, J. S.; LUENEBURG, E. A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: concepts and information extraction. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 380–407, 2004a.

TOUZI, R.; LANDRY, R.; CHARBONNEAU, F. Forest type discrimination using SAR polarization information. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n.3, p. 543-551, 2004b.

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

VAN DER SANDEN, J. J.; HOEKMAN, D. H. Potential of airborne radar to support the assessment of land cover in a tropical rain forest environment. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, p. 26-40, 1999.

VAN ZYL, J. J.; ZEBKER H. A.; ELACHI, C. Imaging radar polarimetric signatures: theory and observation. **Radio Science**, v. 22, n. 4, p. 529-543, 1987.

VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. M. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens – fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí - PA. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 3, p. 487 – 493, 2004.

WANG, Y.; HESS, L. L.; FILOSO, S.; MELACK, J. M. Canopy penetration studies: modeled radar backscatter from amazon floodplain forests at C-, L-, and P-band. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**. v. 2, p.1060 – 1062, 1994.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to active microwave remote sensing**. Ed. Taylor and Francis, p. 370, 2006.

YANASSE, C. C. F.; SANT'ANNA, S. J. S.; FRERY, A. C.; RENNO, C. D.; SOARES, J. V.; LUCKMAN, A. J. Exploratory study of relationship between tropical forest regeneration stages and SIR C-L and C data. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 180 – 190, 1997.

ZEBKER, H. A.; VAN ZYL, J. J. Imaging radar polarimetry: a review. **Proceedings of the IEEE**, v. 79, n. 11, p. 1583-1606, 1991.

ZOU, T.; YANG, W.; DAI, D.; SUN, H. Polarimetric SAR image classification using multifeatures combination and extremely randomized clustering forests. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, v. 2010, n. 2, p. 9, 2010.

Disponível em: < <http://www.hindawi.com/journals/asp/2010/465612.html>>
Acesso em: junho de 2010.

APÊNDICE A – PONTOS DE VALIDAÇÃO IMAGEM 2008

