

Lauriana Rúbio Sartori

**INFORMAÇÃO POLARIMÉTRICA PALSAR/ALOS APLICADA À
DISCRIMINAÇÃO DE ESPÉCIES E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS
MORFOLÓGICOS DE MACRÓFITAS**

Lauriana Rúbio Sartori

INFORMAÇÃO POLARIMÉTRICA PALSAR/ALOS APLICADA À DISCRIMINAÇÃO DE
ESPÉCIES E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS MORFOLÓGICOS DE MACRÓFITAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, para obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas.

Orientador: Nilton Nobuhiro Imai
Co-orientador: José Cláudio Mura

Presidente Prudente
2011

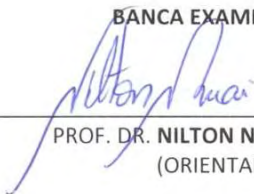
S26i Sartori, Lauriana Rúbio.
Informação polarimétrica PALSAR/ALOS aplicada à discriminação de espécies e estimação de parâmetros morfológicos de macrófitas / Lauriana Rúbio Sartori. - Presidente Prudente : [s.n], 2011
126 f.

Orientador: Nilton Nobuhiro Imai
Co-orientador: José Cláudio Mura (INPE)
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Espécies de macrófitas. 2. Planície de inundação da Amazônia. 3. Radar polarimétrico. 4. Dados PALSAR. 5. Decomposição polarimétrica. 6. Classificação. 7. Regressão linear múltipla. I. Imai, Nilton Nobuhiro. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

CDD 623.71

BANCA EXAMINADORA



PROF. DR. NILTON NOBUHIRO IMAI
(ORIENTADOR)



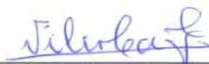
Profa. Dra. EVLYN MARCIA LEÃO DE MORAES NOVO
(INPE)



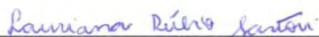
Prof. Dr. THIAGO SANNA FREIRE SILVA
(INPE)



Prof. Dr. JOÃO ROBERTO DOS SANTOS
(INPE)



Profa. Dra. VILMA MAYUMI TACHIBANA
(FCT/UNESP)



LAURIANA RÚBIO SARTORI

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 20 DE ABRIL DE 2011

RESULTADO:



AOS MEUS PAIS E MINHA IRMÃ, PELO APOIO E POR
SEMPRE ACREDITAREM EM MIM.

Ao JU (JULIO CESAR SCALCO), POR SER UMA
PESSOA MARAVILHOSA E POR SEMPRE ME
INCENTIVAR A FAZER O MELHOR.

Agradecimentos

A Deus, pelas bênçãos recebidas e por sempre iluminar minha trajetória.

Ao meu orientador, Professor Dr. Nilton Nobuhiro Imai, por encarar comigo um tema tão desafiador que é a polarimetria, pela confiança depositada em mim e por ser compreensivo.

Ao Dr. José Claudio Mura por aceitar ser meu co-orientador e sempre, tão pacientemente e de forma humilde, me ajudar a encontrar um caminho.

À Dra. Evelyn M. L. M. Novo que, desde o primeiro contato, me orientou e me deu apoio para encarar um doutorado diferente do universo que eu até então conhecia. Obrigada pela prontidão em me ajudar em várias etapas deste doutorado, pela confiança, pelo apoio durante a coleta de campo e, principalmente, pelo olhar carinhoso.

Ao Dr. Thiago S. F. Silva que muito me ajudou, principalmente em escrever o *paper* e com quem compartilhei parte das minhas dificuldades da pesquisa.

À Dra. Vilma Tachibana que, pacientemente, me auxiliou na parte estatística e sempre me recebeu de braços abertos em sua sala.

Aos integrantes da banca pelo tempo dedicado na leitura da tese e por acrescentarem valiosas sugestões.

À Dra. Laura Hess por fornecer a imagem PALSAR através do *ALOS Kyoto & Carbon Initiative*.

À professora Chieno Suemitsu (UFOPA – Universidade Federal do Oeste do Pará) e à sua aluna Ana Sofia S. de Holanda pela ajuda durante a coleta de campo.

Ao professor Dr. Antônio M. G. Tommaselli que, na posição de coordenador do Programa de Pós-Graduação, deu apoio financeiro e se preocupou comigo durante a coleta de campo e durante outros eventos que participei.

À professora Dra. Maria de Lourdes B. T. Galo pela amizade e por, na posição de coordenadora do projeto PROCAD-CAPES, dar suporte financeiro para a coleta de campo e para as minhas atividades no INPE.

A todos os professores do departamento de cartografia, em especial à professora Dr. Mônica Decanini pela amizade e por se preocupar comigo.

Aos amigos do PPGCC e do INPE com quem convivi durante os quatro anos de doutorado. São tantas pessoas que prefiro não citar nomes para não me esquecer de ninguém.

À minha família (pai, mãe, irmã, tios, primas, avôs), ao Ju, à Maria Helena, à Ana Cláudia, à Letícia, à Dani, à Silvia Helena e à Edna que sempre me apoiaram e me incentivaram.

“Se um dia tiver que escolher entre o mundo e o amor... Lembre-se. Se escolher o mundo ficará sem o amor, mas se escolher o amor com ele você conquistará o mundo.”

Albert Einstein

“A paz exige quatro condições essenciais: verdade, justiça, amor e liberdade”.

Papa João Paulo II

Resumo

O propósito deste trabalho foi avaliar o potencial dos dados PALSAR polarimétricos para discriminar e mapear espécies de macrófitas (vegetação aquática) de uma área alagável da Amazônia, a planície de inundação do Lago Grande de Monte Alegre, no estado do Pará. A coleta de dados foi realizada quase simultaneamente à aquisição dos dados de radar. Três principais espécies de macrófitas foram encontradas na área: *Paspalum repens* (PR), *Hymenachne amplexicaulis* (HA) e *Paspalum elephantipes* (PE). Variáveis morfológicas foram medidas em campo e usadas para derivar outras variáveis tais como a biomassa. Atributos foram gerados a partir da matriz de covariância [C] extraída da imagem ALOS/PALSAR em modo SLC (*single look complex*). Os atributos polarimétricos foram analisados para as três espécies e identificados aqueles capazes de discriminar as espécies. Foram aplicadas as seguintes abordagens de classificação: baseada em regras, baseada em modelos de decomposição (Decomposições de Freeman-Durden e Cloude-Pottier), baseada em estatística (Classificação supervisionada baseada na distância Wishart) e híbrida (Classificador Wishart com classes de entrada baseadas na decomposição de Cloude-Pottier). Finalmente, a variável morfológica “volume da haste” foi modelada por regressão múltipla em função de alguns atributos polarimétricos. Os resultados sugerem que a imagem polarimétrica banda L possui potencial para discriminar as espécies de macrófitas, sendo os principais atributos para isso sigma zero HH (σ_{HH}^0), sigma zero HV (σ_{HV}^0) e sigma zero VV (σ_{VV}^0), índice de estrutura da copa (CSI), coerência polarimétrica entre HH e VV (γ), helicidade do terceiro mecanismo de espalhamento (τ_3), ângulo de orientação do primeiro mecanismo de espalhamento (ψ_{t1}) e diferença de fase do tipo de espalhamento do primeiro mecanismo ($\phi_{\alpha s1}$); dentre as diferentes classificações, a supervisionada (Wishart) e a baseada em regras foram as únicas com capacidade para discriminar as espécies, com exatidão global de 75,04% e 87,18%, respectivamente; o volume da haste foi modelado em função dos seguintes atributos: índice de biomassa (BMI), espalhamento volumétrico (P_v), espalhamento superficial (P_s), helicidade do primeiro mecanismo de espalhamento (τ_1) e magnitude do tipo de espalhamento do terceiro mecanismo (α_{s3}). O modelo resultante apresentou um R_{aj}^2 de 44% e um erro médio de 25%.

Palavras chaves: Espécies de macrófitas, Planície de inundação da Amazônia, Radar polarimétrico, Dados PALSAR, Decomposição polarimétrica, Classificação, Regressão linear múltipla

Abstract

The purpose of this work was to evaluate the potential of fully polarimetric PALSAR data to discriminate and map macrophyte species in the Amazon floodplain, more specifically in the Monte Alegre Lake, in the state of Pará, Brazil. Fieldwork was carried out almost simultaneously to the radar acquisition. Three main species were found in the study area: *Paspalum repens* (PR), *Hymenachne amplexicaulis* (HA) and *Paspalum elephantipes* (PE). Macrophyte morphological variables were measured on the field and used to derive others variables, like the biomass. Attributes were calculated from the covariance matrix [C] derived from the SLC (single look complex) data. The polarimetric attributes were analyzed for the three species and it was identified that ones capable of discriminating them. The following classification approaches were applied: a rule-based classification, model-based classifications (Freeman-Durden and Cloude-Pottier), a statistical-based classification (supervised classification using Wishart distance measure) and a hybrid classification (Wishart classifier with the input classes based on the H/a plane). Finally, the morphological variable “stem volume” was modeled using multiple regression. The findings suggest that the fully polarimetric image has potential for discriminating plant species, being the main attributes sigma-nought HH (σ_{HH}^0), sigma-nought HV (σ_{HV}^0) and sigma-nought VV (σ_{VV}^0), canopy structure index (CSI), HH-VV polarimetric coherence (γ), helicity of the third scattering mechanism (τ_3), orientation angle of the first scattering mechanism (ψ_{t1}) and scattering type phase of the first mechanism ($\phi_{\alpha s1}$); among the different classifications, only the supervised (Wishart) and the rule-based discriminated the species, with overall accuracy of 75,04% and 87,18%, respectively; the stem volume was modeled using the following attributes: biomass index (BMI), volumetric scattering (P_v), surface scattering (P_s), helicity of the first scattering mechanism (τ_1) and scattering type magnitude of the third mechanism (α_{s3}). The selected model presented R_{aj}^2 of 44% and a mean error of 25%.

Keywords: Macrophyte species, Amazon floodplain, Radar polarimetry, PALSAR data, Polarimetric decomposition, Classification, Multiple linear regression

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Campo E de uma onda eletromagnética plana oscilando em um plano perpendicular à direção de propagação.	23
Figura 2. Elipse de polarização no plano h-v, ângulo de rotação ψ , ângulo de elipticidade χ , e ângulo auxiliar α , para uma onda viajando na direção k (fora do papel).	24
Figura 3. Esfera de Poincaré.	25
Figura 4. Exemplo de representação da resposta de polarização. DD e EE correspondem, respectivamente, às respostas de co-polarização circular direita-direita e esquerda-esquerda.	30
Figura 5. Os três mecanismos de espalhamento usados no modelo de Freeman-Durden.	37
Figura 6. Plano bidimensional entropia (H), ângulo alfa (α).	39
Figura 7. Área de estudo – Imagem Landsat mostrando o Lago Grande de Monte Alegre; Imagem PALSAR (composição colorida das intensidades da matriz de covariância filtrada – HH em R, HV em G e VV em B); Recorte da área de estudos.	58
Figura 8. Representação esquemática da organização espacial da vegetação aquática no (a) lago fluvial e (b) canal fluvial. 1- <i>Paspalum repens</i> ; 2- <i>Hymenachne amplexicaulis</i> ; 3- <i>Paspalum fasciculatum</i> ; 4- <i>Echinochloa polystachya</i>	59
Figura 9. Nível do rio e precipitação na estação de Óbidos.	60
Figura 10. Imagem PALSAR da área de estudos sobreposta ao <i>Google Earth</i> . Aquisição da imagem PALSAR: 25/03/2009. Representação de Sinclair (VV em R, HV em G e HH em B).	64
Figura 11. Diagrama mostrando as variáveis morfológicas medidas.	65
Figura 12. Exemplo de um elemento amostral, mostrando o quadrado usado para delimitar a área de 0,25 m ² para a contagem das hastes.	65
Figura 13. Processamento da imagem PALSAR, extração dos atributos e etapas seguidas para a análise estatística dos elementos amostrais.	67
Figura 14. Geração das classificações e ortorretificação.	69
Figura 15. Níveis temáticos definidos para a classificação baseada em regras. Caixas hachuradas indicam as classes de interesse.	71
Figura 16. Fluxograma seguido para a modelagem da variável morfológica.	74
Figura 17. Representação de Pauli e os pontos transformados para o sistema da imagem em <i>slant range</i> . (a) Pontos de uma estrada; (b) pontos do contorno de bancos de macrófitas.	75
Figura 18. Fotografias das espécies de macrófitas encontradas no Lago Grande de Monte Alegre.	77
Figura 19. Atributos usados para a discriminação entre as espécies.	84
Figura 20. Atributos com potencial para delimitar a área de macrófitas e os respectivos intervalos da delimitação. AR = cobertura arbóreo-arbustiva alagada.	85
Figura 21. Gráficos das funções <i>fuzzy</i> utilizadas para classificar 'Terra firme 1'.	89
Figura 22. Classificação baseada em regras: Nível II (esquerda) e Nível III (direita).	92
Figura 23. Decomposição de Freeman-Durden: RGB, respectivamente, associados aos mecanismos de espalhamento Pd, Pv e Ps.	92
Figura 24. Classificação não-supervisionada baseada no plano H/a da decomposição de Cloude-Pottier.	92
Figura 25. Classificação híbrida: classificação baseada em estatística com amostras de treinamento baseadas no plano H/a.	93

Figura 26. Classificação baseada em estatística (distância Wishart)	93
Figura 27. Coeficiente de determinação ajustado (R_{aj2}) e raiz do erro médio quadrático (MSE) dos subconjuntos das variáveis explicativas que apresentaram o melhor desempenho com o atributo espalhamento volumétrico incluso.....	96
Figura 28. Comportamento da variável morfológica volume considerando 55 observações e as cinco variáveis explicativas selecionadas.....	97
Figura 29. Box-plot da variável dependente (raiz do volume da haste); diagramas de espalhamento e coeficiente de correlação linear entre a variável dependente e cada variável exploratória. (*) ao lado do valor do coeficiente de correlação linear indica correlação ao nível de 0,10.	98
Figura 30. Gráficos de resíduos.	99
Figura 31. Diagrama de dispersão entre os resíduos e cada termo de interação.....	99
Figura 32. Diagrama de espalhamento de Moran para os resíduos do modelo da variável volume.	100
Figura 33. Valores de volume observados e estimados para 6 elementos de <i>P. repens</i> (1 a 6), 2 elementos de <i>P. elephantipes</i> (7 e 8) e 2 elementos de <i>H. amplexicaulis</i> (8 e 10). A barra vertical corresponde ao intervalo de predição com nível de confiança de 95%.....	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Modos default de observação PALSAR.	61
Quadro 2. Níveis de processamento dos dados PALSAR.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Alguns estudos realizados em áreas alagáveis e o tipo de radar utilizado.	19
Tabela 2. Atributos baseados nos dados polarimétricos. ¹ Parâmetros de Pope; ² Parâmetros de Cloude-Pottier; ³ Parâmetros de Freeman-Durden; ⁴ Parâmetros de Touzi.	44
Tabela 3. Planos de entrada e dados de treinamento para as classificações.	70
Tabela 4. Variáveis morfológicas das macrófitas.	77
Tabela 5. Atributos derivados da magnitude do retroespalhamento para as espécies de macrófitas estudadas (PR: <i>P. repens</i> , HA: <i>H. amplexicaulis</i> , PE: <i>P. elephantipes</i>).	80
Tabela 6. Atributos derivados da fase do retroespalhamento para as espécies de macrófitas estudadas: decomposições de Cloude-Pottier e de Freeman-Durden, magnitude e fase da correlação complexa cruzada.	80
Tabela 7. Atributos derivados da fase do retroespalhamento para as espécies de macrófitas estudadas: magnitude (α_s) e fase ($\phi\alpha_s$) da decomposição de Touzi.	80
Tabela 8. Atributos derivados da fase do retroespalhamento para as macrófitas estudadas: helicidade (τ) e ângulo de orientação (ψ_t) da decomposição de Touzi.	80
Tabela 9. Atributos selecionados por ANOVA para a discriminação entre as espécies, melhor λ determinado por Box-Cox para normalizar o atributo, p-valor para os testes de normalidade e homocedasticidade antes e depois da transformação Box-cox.	81
Tabela 10. Atributos selecionados por ANOVA para a discriminação entre as espécies, p-valor do teste Tukey entre as classes, classe que o atributo melhor discrimina.	82
Tabela 11. Atributos sensíveis à discriminação das espécies de macrófitas.	84
Tabela 12. Parâmetros da segmentação multiresolução.	87
Tabela 13. Sequência das classificações e intervalos utilizados para a definição das classes. Sg corresponde à segmentação em que a classificação foi executada.	88
Tabela 14. Classificações de objetos não classificados nas etapas anteriores.	89
Tabela 15. Matriz de confusão para as quatro classificações. As abreviações e seus respectivos significados são: T (Terra firme), P(a) (Planície inundada (cobertura arbóreo-arbustiva), P(m) (Planície inundada (macrófita)), A (Água), P/T (Planície inundada e Terra firme), P(m)/T (Planície inundada (macrófita) e Terra firme), PR (<i>Paspalum repens</i>), HA (<i>Hymenachne amplexicaulis</i>), PE (<i>Panicum elephantipes</i>), O (Outras).	94
Tabela 16. Matriz de correlação das variáveis morfológicas (L_{haste} , V_{haste} , $A_{folha/haste}$, $B(g/m^2)$, N_{folha}/m^2) e atributos gerados a partir do dado de magnitude do retroespalhamento (σ_{HH}^0 , σ_{HV}^0 , BMI, CSI, $\sigma_{linVV0}\sigma_{linHH0}$, $\sigma_{linVV0}\sigma_{linHV0}$, Span). Valores em negrito correspondem a $p < 0,05$	95
Tabela 17. Matriz de correlação das variáveis morfológicas (L_{haste} , V_{haste} , $A_{folha/haste}$, $B(g/m^2)$, N_{folha}/m^2) e atributos gerados a partir do dado de fase do retroespalhamento (α_m , A , P_v , α_{s1}). Valores em negrito correspondem a $p < 0,05$	95
Tabela 18. Fatores de inflação da variância.	100
Tabela 19. Resultado do modelo de regressão para a variável volume da haste.	101

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	15
Capítulo 2 - Polarimetria e classificação de imagens SAR polarimétricas	21
2.1 Onda eletromagnética e polarização.....	22
2.1.1 Vetor de Stokes	24
2.1.2 Vetor de Jones.....	26
2.2 Descrição polarimétrica do retroespalhamento	27
2.2.1 Matriz de Jones	28
2.2.2 Matriz de Stokes (ou de Mueller)	29
2.2.3 Síntese de polarização e resposta polarimétrica	29
2.2.4 Transformação de base	30
2.2.5 Vetor de espalhamento.....	31
2.2.6 Matriz de covariância e matriz de coerência.....	33
2.3 Ruído <i>Speckle</i>	34
2.4 Decomposição de alvos	35
2.4.1 Decomposição de Freeman-Durden.....	36
2.4.2 Decomposição de Cloude-Pottier	37
2.4.3 Decomposição de Touzi	41
2.5 Atributos gerados a partir do retroespalhamento e da decomposição de alvos	42
2.6 Métodos de classificação de imagens SAR polarimétricas	46
2.6.1 Classificação baseada em modelo de decomposição	46
2.6.2 Classificação baseada em parâmetros estatísticos	46
2.6.3 Classificação híbrida.....	48
Capítulo 3 - Classificação orientada a objetos	50
3.1 Segmentação multiresolução	51
Capítulo 4 - Modelo de regressão linear múltipla.....	53
4.1.1 Análise de variância (ANOVA).....	55
Capítulo 5 - Área de estudo, aquisição de dados e metodologias	57
5.1 Área de estudo	57
5.1.1 Dados hidrológicos do Lago Grande de Monte Alegre	60
5.2 Características dos dados PALSAR e modelo digital de elevação	61
5.2.1 Características dos dados PALSAR	61
5.2.2 Modelo digital de elevação	62

5.3	Planejamento de campo.....	63
5.3.1	Aquisição dos dados da área de estudos	63
5.3.2	Medidas derivadas a partir das medidas morfológicas de campo	65
5.4	Processamento da imagem PALSAR e dos elementos amostrais.....	66
5.5	Classificações aplicadas na imagem SAR	68
5.6	Classificação baseada em regras	70
5.6.1	Segmentação e criação das classes para a classificação baseada em regras	71
5.7	Modelagem de uma variável morfológica em função dos atributos de radar	72
Capítulo 6 - Resultados e discussões		75
6.1	Avaliação do erro de co-registro dos dados de campo	75
6.2	Descrição das espécies de macrófitas	76
6.3	Análise dos atributos polarimétricos.....	78
6.4	Identificação dos atributos e intervalos com potencial para a discriminação entre as macrófitas.....	81
6.5	Classificação baseada em regras: parâmetros da segmentação e classificação.....	84
6.5.1	Separação entre a cobertura de macrófitas e a cobertura arbóreo-arbustiva alagada	85
6.5.2	Parâmetros da segmentação e regras para a classificação	86
6.6	Classificações baseadas em regras, em modelos de decomposição e em estatística.....	90
6.7	Modelagem da variável morfológica.....	94
Capítulo 7 - Conclusões.....		102
Referências bibliográficas		105
Apêndice A – Exemplo de planilha de campo e fotos de um ponto amostral.....		113
Apêndice B – Determinação da média espacial 7x1 pixels aplicada na matriz de covariância		115
Apêndice C – Quantidade de pixels dos elementos amostrais de treinamento e validação para a classificação.....		116
Apêndice D – Valores dos atributos para cada elemento amostral		118

Capítulo 1 - Introdução

RADAR é um sistema ativo que gera sua própria radiação na faixa das microondas e é o acrônimo de '*Radio detection and ranging*' (detecção e localização por meio das microondas). Uma imagem de radar é uma matriz bidimensional de pixels em que cada pixel fornece um número complexo (amplitude e informação de fase) associado à refletividade de todos os espalhadores contidos dentro da célula de resolução do radar (LEE e POTTIER, 2009).

Qualquer sistema de radar observa uma cena conforme a frequência, geometria de iluminação do sinal emitido e polarização. Os radares de sensoriamento remoto geralmente são classificados de acordo com o seu comprimento de onda, o que é suficiente para especificar a frequência. A radiação eletromagnética (EM) de um sistema de radar tem comprimento de onda (1 cm – 100 cm) comparável aos detalhes da estrutura de muitas feições geofísicas de interesse, uma similaridade na escala que eleva a importância das imagens de radar. O comprimento de onda em que opera um radar corresponde a uma das seguintes bandas K, X, C, L, P, entre outras (HENDERSON e LEWIS, 1998).

O radar opera numa geometria de visada lateral com uma varredura na direção perpendicular à linha de vôo da plataforma. A direção de vôo é referida como "azimute" (y) e o eixo radial à linha de visada do radar é chamado "*slant-range*" (x) (HENDERSON e LEWIS, 1998; LEE e POTTIER, 2009).

A antena de transmissão determina a polarização (item 2.1) da onda emitida. A maioria das antenas de radar é construída de modo a transmitir e receber ondas polarizadas linearmente na horizontal e/ou na vertical. Via de regra, somente uma polarização pode ser transmitida de cada vez e, da mesma maneira, a antena de recepção seleciona uma componente de polarização do sinal refletido. Se, por exemplo, o sinal é enviado na horizontal (H) e recebido na vertical (V) a polarização é HV (ULABY e ELACHI, 1990; HENDERSON e LEWIS, 1998).

Dados que registram a informação completa do espalhamento do radar, incluindo tanto a amplitude quanto a informação de fase dos quatro canais de polarização (HH, HV, VH e VV) são chamados polarimétricos. A partir destes dados, o padrão de espalhamento do alvo pode ser analisado com uma quantidade maior

de atributos do que permitiam os radares convencionais que operavam, geralmente, com uma única polarização e a representação apenas da informação de amplitude.

Nos últimos anos, as pesquisas com dados de radar polarimétrico têm se intensificado com o lançamento dos satélites ALOS-PALSAR (2006), RADARSAT-2 (2007) e TerraSAR-X (2007), respectivamente operando nas bandas L, C e X. A introdução de dados polarimétricos aumentou o potencial do sensoriamento remoto por radar para estudos ecológicos (POPE et al., 1994; TOUZI et al., 2007; TOUZI et al., 2009). Antes do lançamento destes dados orbitais, pesquisas com dados de radar polarimétrico em áreas alagáveis foram realizadas com sensores no nível aéreo (POPE et al., 1994; HESS et al., 1995; POPE et al., 1997; TOUZI et al., 2007). Outros estudos de área alagável usaram radar com apenas uma polarização (COSTA et al., 2002; HESS et al. 2003; NOVO et al., 2002).

Na literatura, são encontrados muitos atributos derivados dos dados de radar polarimétrico, ou seja, dados gerados a partir do retroespalhamento de radar e da decomposição de alvos, sendo muitos deles usados para caracterizar vegetação de áreas alagáveis (POPE et al., 1994; POPE et al., 1997; FREEMAN e DURDEN, 1998; CLOUDE e POTTIER, 1996; TOUZI, 2007; TOUZI et al., 2007; TOUZI et al., 2009). Dentre estes atributos, durante a década de 1990, a diferença de fase entre as polarizações HH e VV foi muito utilizada (POPE et al., 1994, TOUZI, et al., 2009). Mais tarde, as decomposições de alvos de Cloude-Pottier (CLOUDE e POTTIER, 1996) e Freeman-Durden (FREEMAN e DURDEN, 1998) tornaram-se abordagens populares. Mais recentemente, tornou-se disponível uma técnica chamada decomposição de Touzi, a qual fornece uma melhor descrição do tipo de espalhamento do alvo, devido à geração da entidade complexa do tipo de espalhamento do alvo, detalhada no item 2.4.3 (TOUZI, 2007).

Os atributos citados no parágrafo anterior e outras técnicas aplicadas em dados SAR polarimétricos precisam ser investigados para que se possa avaliar o real potencial destes dados. Esse potencial torna-se mais importante quando os dados são aplicados em áreas que possuem um papel crucial para o equilíbrio do meio físico, como as áreas alagáveis da região amazônica. Nestas áreas, é fundamental a utilização de dados de sensoriamento remoto por radar por serem áreas de difícil acesso e devido à alta frequência de nuvens, o que dificultaria o uso de sensores ópticos (POPE et al., 1994).

Universalmente conhecidas como “*wetlands*”, as áreas alagáveis são regiões que oscilam periodicamente entre fases terrestres e aquáticas. Elas compreendem aproximadamente 4 a 6% da superfície terrestre, ocorrendo em todos os climas e continentes (MITSCH e GOSSELINK, 2000). Ecologicamente, caracterizam-se pela alta biodiversidade, servindo como habitat e procriação de espécies de plantas, peixes, animais selvagens e outros animais; biogeoquimicamente, essas áreas transformam diversos materiais orgânicos e inorgânicos, reciclando nutrientes essenciais. As áreas alagáveis tropicais são importantes no ciclo global do carbono, agindo como recicladores do dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e como uma das maiores fontes naturais de metano (MELACK et al., 2004).

A planície de inundação do Rio Amazonas é uma das maiores áreas alagáveis tropicais do mundo, cobrindo aproximadamente 350000 km² (MELACK e HESS, 2010). A dinâmica ecológica e biogeoquímica é, principalmente, determinada pelo conceito de “pulso de inundação” (JUNK et al, 1989; TOCKNER et al., 2000), o qual é a principal variável que direciona o sistema rio-planície de inundação. Esse pulso conduz às variações das condições ambientais, às mudanças periódicas na biota e às interações entre as fases terrestres e aquáticas. Esse conceito é baseado nas considerações hidrológicas do rio, sua bacia hidrográfica e sua planície de inundação. A partir do ponto de vista hidrológico, o rio e a planície de inundação são considerados uma unidade indivisível por causa da água comum e do balanço de sedimento. O mesmo vale para muitos aspectos biológicos, tal como troca de organismos, biomassa e energia. O grau de conexão entre o rio e sua planície de inundação depende do nível da água do rio (JUNK et al., 1989).

O pulso de inundação controla a fenologia e distribuição da vegetação (florestas inundáveis, arbustos/savana inundáveis, e vegetação aquática herbácea – macrófitas), a qual é a principal fonte de entrada de carbono na planície de inundação, modifica a disponibilidade de oxigênio e provoca, entre outros processos biogeoquímicos, a formação de gás sulfídrico e metano (JUNK e PIEDADE, 1997). Isso porque, a grande quantidade de material orgânico em decomposição provoca a ausência de oxigênio no solo inundado e na água. A planície de inundação é um importante componente no balanço global de carbono da Amazônia, mas ainda há muita incerteza a respeito da magnitude desta contribuição no ciclo do carbono da Amazônia (RICHEY et al., 2002).

Entre os alvos presentes nas áreas alagáveis, o papel da vegetação aquática herbácea (macrófita) é único e importante. As macrófitas são plantas que ocupam as fases alagada e terrestre e, portanto, se adaptam à zona de transição entre estas duas fases. Por causa do ciclo de vida relativamente curto e das altas taxas de reprodução, as macrófitas colonizam rapidamente os habitats que se apresentam (JUNK e PIEDADE, 1997). Elas são responsáveis por grande parte da biodiversidade das áreas alagáveis (MITSCH e GOSSELINK, 2000) e desempenham diferentes funções ecológicas (THOMAZ e BINI, 2003). Em contrapartida, são habitats favoráveis à reprodução de vetores de doenças de veiculação hídrica (malária, dengue, febre amarela, esquistossomose) com sérias conseqüências para a saúde pública (PEDRALLI, 2003; VASCONCELOS et al., 2006) e respondem pelas maiores taxas de emissão de metano¹ quando comparadas às áreas de floresta inundada ou águas abertas (DEVOL et al., 1988; BARTLET et al., 1990), pois todo ano entram em decomposição.

Os estudos das macrófitas utilizando-se dados de sensoriamento remoto por radar foram feitos, até o momento, no sentido de se investigar suas propriedades biofísicas, sua distribuição e sua produtividade (HESS, et al., 1995; HESS et al., 2003; COSTA, 2004; COSTA, 2005; SILVA, et al., 2010b -

Tabela 1). Com a recente disponibilidade de dados SAR polarimétricos orbitais, os quais possuem além da amplitude a informação da fase, torna-se oportuna a investigação a respeito da discriminação entre as espécies, procurando responder às seguintes questões: “é possível discriminar macrófitas ao nível de espécie usando dados SAR polarimétricos?”, “a informação de fase, disponível nos dados polarimétricos, contribui para a discriminação?”. A discriminação entre as espécies é importante, pois o crescimento e produtividade das macrófitas dependem do tipo da espécie (SILVA, et al., 2010a) possuindo, assim, diferentes contribuições no ciclo global do carbono. Também, determinadas espécies de macrófitas servem de habitat para insetos transmissores de doenças, como malária, dengue e febre amarela (APARICIO, 2007).

¹ O metano (CH₄), um dos principais gases responsáveis pelo aquecimento global, tem um potencial de aquecimento 25 vezes maior que o CO₂ (IPCC, 2007). A estimativa de emissão de metano total (fontes naturais e antropogênicas) é de 503 TgCH₄/ano, sendo desse total quase 20% proveniente de áreas alagáveis. Dentre as fontes naturais, o total representado pelas áreas alagáveis é de 69% (WUEBBLES e HAYHOE, 2002).

Tabela 1. Alguns estudos realizados em áreas alagáveis e o tipo de radar utilizado.

Estudo	SAR	Referência
Propriedades biofísicas da vegetação aquática herbácea (macrófita)	SAR polarimétrico aerotransportado bandas C, L e P	Pope et al. (1994)
	SAR polarimétrico aerotransportado bandas C e L (SIR-C)	Pope et al. (1997)
Mapeamento da planície de inundação e vegetação ao longo do Rio Negro e do Rio Amazonas. Classes mapeadas: água, pasto, macrófita aquática, floresta não inundada, floresta inundada	SAR polarimétrico aerotransportado bandas C e L (SIR-C)	Hess et al. (1995)
Propriedades biofísicas e mapeamento de macrófitas	JERS-1 (Banda L/polarização HH); RADARSAT-1 (Banda C/polarização HH)	Costa et al. (2002)
Relacionamento das propriedades biofísicas ao sigma zero HH de diferentes espécies (' <i>scirpus</i> ', ' <i>typha</i> ', ' <i>eicchornia</i> '), além das classes 'floresta de terra firme' e 'água aberta+paspalum'	JERS-1 (Banda L, polarização HH); RADARSAT-1 (Banda C, polarização HH)	Novo et al. (2002)
Mapeamento da extensão da inundação e vegetação sob condições de água baixa e alta com 100 m de resolução espacial	JERS-1 (Banda L/polarização HH);	Hess et al. (2003)
Caracterização de espécies de vegetação de áreas alagáveis, como a discriminação entre " <i>shrub bog</i> " de " <i>sedge fen</i> " ²	SAR polarimétrico aerotransportado banda C (Convair-580)	Touzi et al. (2007)

Neste contexto, a discriminação entre as espécies é uma das principais motivações desta tese. Supondo-se que o retroespalhamento do radar seja sensível à geometria e biomassa das macrófitas que ocorrem nas áreas alagáveis da Amazônia, deve ser possível discriminar diferentes espécies de macrófitas devido à variação morfológica entre tais espécies.

Sendo sensível à geometria desses alvos, supõe-se uma segunda hipótese: a de que seja possível inferir uma ou mais variáveis morfológicas da planta em função de alguns atributos de radar.

Assim sendo, o objetivo principal foi avaliar o potencial da imagem SAR polarimétrica banda L (ALOS/PALSAR) para a discriminação de espécies, o

² Existem vários tipos distintos de áreas alagáveis. Por exemplo, *swamps*, *marshes*, *bog* e *fens*. As árvores são a vegetação predominante em *swamps*, as quais se formam ao longo dos rios. *Marshes* são áreas normalmente mais rasas que *swamps* com menor água aberta e pior drenagem, mantendo plantas menores sem madeira, como as macrófitas. *Bog* é uma área rasa e parada coberta por turfa (material esponjoso formado pela decomposição parcial de musgo), sendo sua água ácida e é principalmente alimentada pela precipitação. *Fen* também acumula turfa, mas há uma maior troca de água com rios e águas subterrâneas, resultando em mais rico em nutrientes e água com pH de neutro a alcalino (<http://www.knewance.com/comparisons/swamp-v-marsh-v-bog-v-fen.html>).

mapeamento e a estimativa de variáveis morfológicas de macrófitas encontradas numa área alagável da Amazônia, a planície de inundação do Lago Grande de Monte Alegre. Os objetivos específicos foram:

- 1) Identificar os atributos polarimétricos sensíveis às espécies de macrófitas amazônicas encontradas na área de estudo e com potencial de discriminação entre essas espécies;
- 2) Avaliar o desempenho de diferentes abordagens de classificação a fim de mapear as diferentes espécies de macrófitas: classificação baseada em regras, classificação baseada em modelos (Decomposições de Freeman-Durden e Cloude-Pottier), classificação baseada em estatística (Classificação supervisionada baseada na distância Wishart) e classificação híbrida (Classificador Wishart com classes de entrada baseadas na decomposição de Cloude-Pottier);
- 3) Ajustar um modelo de regressão múltipla para estimativa de uma ou mais variáveis morfológicas da planta em função dos atributos de radar.

Capítulo 2 - Polarimetria e classificação de imagens SAR polarimétricas

Em sensoriamento remoto por radar, a onda eletromagnética transmitida por uma antena interage com o alvo e retorna para o receptor em forma de eco. A onda eletromagnética pode ser expressa na forma vetorial (item 2.1 - Onda eletromagnética e polarização). A transformação entre o vetor de onda transmitido e o vetor de onda recebido é expressa por uma transformação linear, representada por uma matriz. Esta matriz contém toda a informação sobre o processo de espalhamento. Se as influências da atmosfera forem omitidas ou corrigidas, esta matriz descreve o espalhador (item 2.2 - Descrição polarimétrica do retroespalhamento). Portanto, esta matriz é utilizada para analisar os dados e extrair informações (HELLMANN, 2001).

Antes da extração de informação, é importante reduzir o *speckle* inerente aos dados de radar. No item 2.3 (Ruído *Speckle*) são apresentadas algumas maneiras para a redução desse ruído, como por exemplo, a aplicação de filtros. A filtragem não pode ser realizada na matriz de espalhamento, devendo ser aplicada na matriz de covariância ou coerência.

Para a extração de informações, a partir da matriz de covariância e coerência, podem ser aplicadas técnicas estatísticas e polarimétricas. Uma das principais vantagens das técnicas polarimétricas (item 2.4 - Decomposição de alvos) é a possibilidade em separar contribuições de espalhamento de diferentes naturezas. A decomposição de alvos fornece uma interpretação física do sinal espalhado, considerando que estes sinais sejam formados pela superposição de muitos contribuintes ou espalhadores.

Entre outras técnicas para a extração de informações, ainda podem ser aplicadas diversas abordagens de classificações (item 2.6 - Métodos de classificação de imagens SAR polarimétricas) desenvolvidas especificamente para dados de radar, como: classificação baseada em modelos da decomposição dos alvos; classificação baseada em estatística, que considera a estatística do dado SAR; e a classificação híbrida, que integra as duas abordagens anteriores.

2.1 Onda eletromagnética e polarização

Neste item, é descrita a onda eletromagnética incidente e espalhada pelo alvo conforme a propriedade de polarização e a sua representação através do vetor de Jones ou vetor de Stokes (ULABY e ELACHI, 1990).

Uma onda eletromagnética é uma forma de energia que se propaga através do espaço (vácuo) e de certos meios gasosos, líquidos e sólidos. É uma onda transversal composta de dois campos oscilantes, o elétrico e o magnético, sempre situados em planos ortogonais e variando em fase. A onda propaga-se na direção perpendicular aos campos elétrico e magnético. No vácuo, esta velocidade é a da luz, ou seja, aproximadamente 300.000 km/s (ULABY e ELACHI, 1990).

Em 1864, Maxwell descreveu de maneira unificada o comportamento do campo elétrico e magnético através de um conjunto de quatro equações. A onda eletromagnética pode ser completamente descrita apenas pelo vetor do campo elétrico $\vec{E}$, já que o campo magnético está diretamente relacionado ao elétrico (ULABY e ELACHI, 1990).

O vetor do campo elétrico $\vec{E}$ pode ser separado na componente horizontal ($\vec{E}_h$) e componente vertical ($\vec{E}_v$), representadas, respectivamente, em verde e em azul na Figura 1. A projeção da ponta dos vetores do campo elétrico $\vec{E}$ no plano perpendicular (em laranja) à direção de propagação da onda define a polarização da onda eletromagnética dada por uma figura geométrica. O caso apresentado na Figura 1 corresponde a uma onda eletromagnética com polarização elíptica (HELLMANN, 2001).

A polarização de uma onda plana descreve a forma e o lugar da ponta do vetor $\vec{E}$ (no plano ortogonal à direção de propagação) como uma função do tempo. No caso geral temos uma elipse, sendo a onda chamada elipticamente polarizada. A elipse ainda pode se degenerar em um segmento de linha reta ou círculo, sendo a polarização chamada linear ou circular (ULABY e ELACHI, 1990). A polarização circular ocorre quando as componentes horizontal e vertical são de mesma magnitude e possuem diferença de fase de 90° . A polarização linear ocorre quando a diferença de fase é zero ou um múltiplo de 180° (ULABY e ELACHI, 1990).

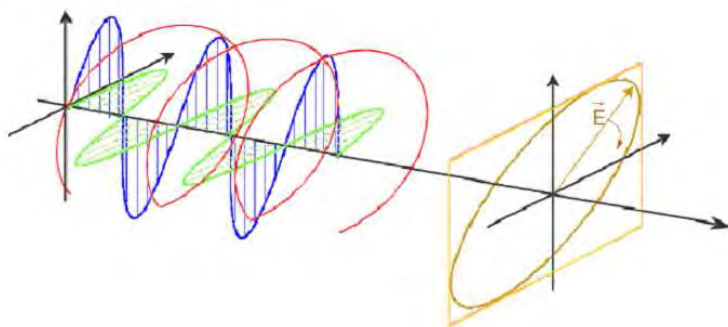


Figura 1. Campo $\vec{E}$ de uma onda eletromagnética plana oscilando em um plano perpendicular à direção de propagação.

Fonte: Hellmann (2001).

Uma oscilação diagonal do campo elétrico pode ser interpretada como uma resultante entre alguma oscilação verticalmente polarizada e alguma oscilação horizontalmente polarizada. Portanto, pela medida dos dois componentes ortogonais, pode-se medir o estado de polarização da onda (HELLMANN, 2001).

Para descrever o estado de polarização é utilizada a elipse de polarização (Figura 2), a qual é caracterizada pelo ângulo de elipticidade (χ : a tangente deste ângulo é igual à razão entre o eixo menor e maior da elipse), pelo ângulo de rotação (ψ : ângulo entre o eixo maior e a direção de referência, que no caso da Figura 2 é a direção do eixo h) (ULABY e ELACHI, 1990; WOODHOUSE, 2006). O ângulo de rotação ψ está entre $0 \leq \psi \leq \pi$ e o ângulo de elipticidade χ entre $-\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4$.

Para descrever o estado de polarização da onda incidente e espalhada, dois são os sistemas de coordenadas normalmente utilizados de acordo com a convenção adotada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*): o *Forward Scatter Alignment* (FSA) e o *Back-Scatter Alignment* (BSA) (IEEE, 1979). O FSA é um sistema orientado pela onda, definindo o sistema de coordenada local orientado para a direita em relação à direção de propagação da onda. O BSA é um sistema orientado pela antena, definindo o sistema local em relação à polarização da antena (ULABY e ELACHI, 1990; WOODHOUSE, 2006).

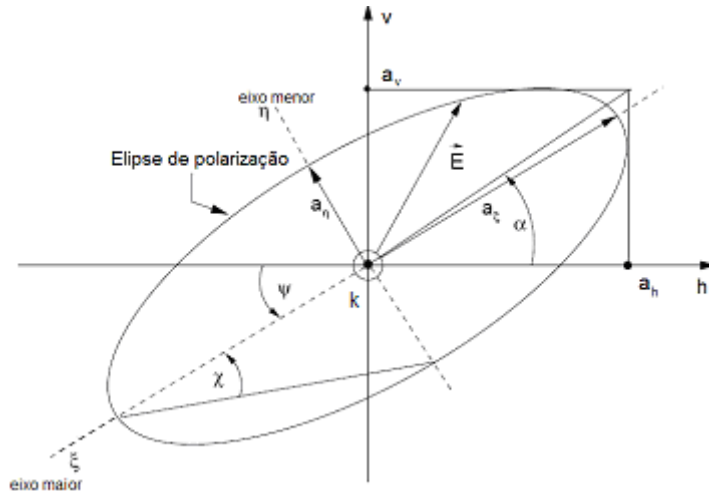


Figura 2. Elipse de polarização no plano h-v, ângulo de rotação ψ , ângulo de elipticidade χ , e ângulo auxiliar α , para uma onda viajando na direção k (fora do papel).

Fonte: Hellmann, 2001.

Além da elipse de polarização, para descrever o estado de polarização, podem ser utilizados o vetor de Stokes e o vetor de Jones. O vetor de Stokes é muito usado no campo da óptica, ao passo que o vetor de Jones é o preferido para aplicações em sensoriamento remoto para radar (HELLMANN, 2001).

2.1.1 Vetor de Stokes

Em 1852, Stokes introduziu um conjunto de parâmetros para a caracterização do estado de polarização da onda, dados por I_0 , Q , U e V escritos na forma vetorial da seguinte forma (ULABY e ELACHI, 1990):

$$F = \begin{bmatrix} I_0 \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_v|^2 + |E_h|^2 \\ |E_v|^2 - |E_h|^2 \\ 2\text{Re}(E_v E_h^*) \\ 2\text{Im}(E_v E_h^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_0 \cos 2\psi \cos 2\chi \\ I_0 \sin 2\psi \cos 2\chi \\ I_0 \sin 2\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que, E_v e E_h indicam, respectivamente, a componente vertical e horizontal do vetor campo elétrico $\vec{E}$, E_h^* é o complexo conjugado da componente horizontal do vetor campo elétrico e I_0 é proporcional à intensidade total da onda.

No caso de ondas completamente polarizadas (por exemplo, as emitidas pelos sistemas de radar), somente três dos parâmetros de Stokes são independentes, pois eles estão relacionados pela equação:

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

O estado de polarização de uma onda plana pode ser mapeado para um ponto P na superfície de uma esfera de raio I_0 , em que os três parâmetros Q , U e V são as coordenadas cartesianas de P (ULABY e ELACHI, 1990). Esta esfera é chamada esfera de Poincaré, como ilustra a Figura 3. Ela é uma representação tridimensional do vetor de Stokes.

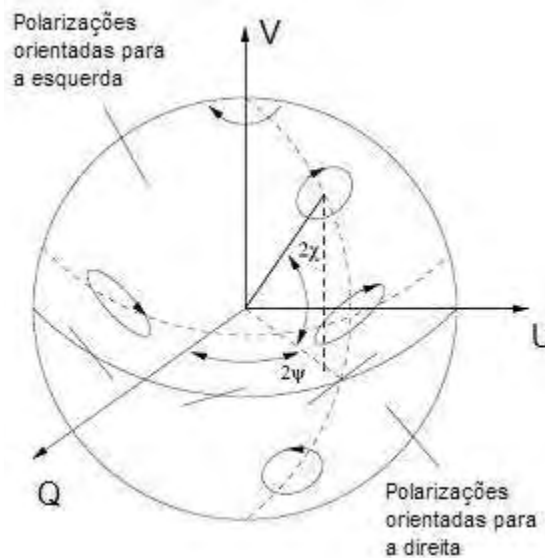


Figura 3. Esfera de Poincaré.
Fonte: Alberga (2004).

A latitude e longitude de P são definidas, respectivamente, por 2χ e 2ψ . O sinal de χ determina a orientação do estado de polarização. Portanto, o hemisfério superior da esfera de Poincaré ($\chi > 0$) mostra as polarizações orientadas para a esquerda (regra da mão esquerda), enquanto que o hemisfério inferior ($\chi < 0$) mostra as polarizações orientadas para a direita. Os pólos representam as polarizações circulares, no plano do equador são encontradas as polarizações lineares e nos hemisférios superior e inferior a polarização elíptica (ULABY e ELACHI, 1990).

Quando a amplitude e fase de uma onda variam com o tempo, a elipse de polarização também varia e a onda é dita parcialmente polarizada (são exemplos de ondas parcialmente polarizadas aquelas resultantes da interação entre as ondas emitidas pelos sistemas de radar e os alvos terrestres). Para ondas parcialmente polarizadas, nem toda intensidade está contida nas componentes

polarizadas Q , U e V e, portanto, a intensidade total é maior que a soma destas componentes (ULABY e ELACHI, 1990):

$$I_0^2 > Q^2 + U^2 + V^2 \quad (3)$$

Neste caso, os parâmetros que caracterizam a polarização da onda são obtidos por intermédio de uma média estatística e só têm significado se o sinal apresentar condições de estacionariedade³ e ergodicidade⁴ (TOUZI et al., 2004). Para representar este tipo de onda, é utilizado o vetor de Stokes modificado, em que a principal diferença entre este e o vetor de Stokes normal é que no modificado os parâmetros são representados pela média estatística.

O grau de polarização p (ULABY e ELACHI, 1990) é dado por:

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I_0} \quad (4)$$

sendo que $p = 0$ indica uma onda totalmente despolarizada, e $p = 1$ uma onda completamente polarizada.

2.1.2 Vetor de Jones

A representação da onda usando o vetor de Jones é feita num espaço complexo bi-dimensional (HELLMANN, 2001):

$$\vec{E}_{mn} = \begin{bmatrix} E_m \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_m \exp(j\delta_m) \\ a_n \exp(j\delta_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

sendo $\vec{m}$ e $\vec{n}$ os dois estados arbitrários de polarização ortogonal que formam uma base ortogonal, (a_m, a_n) e (δ_m, δ_n) são as amplitudes e as fases em relação à base ortogonal, respectivamente (HELLMANN, 2001).

³ Estacionariedade: Uma variável é considerada estacionária se os momentos estatísticos da variável forem constantes. De acordo com o número k de momentos estatísticos constantes, a variável é chamada estacionária de ordem k .

⁴ Ergodicidade: um processo aleatório é ergódico se a média temporal é equivalente à média populacional. Isto implica que um sinal simples de tempo amostral contém todas as variações estatísticas do processo. Consequentemente, observações obtidas a partir de muitas amostras de tempo não resultam em mais informações do que o obtido a partir de um simples sinal amostral no tempo (STRANG e BORRE, 1997).

O vetor de Jones possui a informação completa sobre a elipse de polarização, mas não contém o sentido de rotação do campo elétrico. Isto quer dizer que duas ondas planas que se propagam em sentidos opostos têm a mesma representação pelo vetor de Jones. Para compensar esta falta, o vetor de Jones pode ser complementado pelos subscritos “ $+$ ” e “ $-$ ”, em que “ $+$ ” indica ondas propagando-se no sentido positivo de $\vec{k}$ e “ $-$ ” indica ondas propagando-se no sentido contrario de $\vec{k}$. $\vec{E}_{\pm}$ é chamado de direcional de Jones. A representação pelo vetor de Jones está relacionada com uma escolha particular do sistema de coordenada local da onda, que no caso deste texto é indicado por “ m ” e “ n ”, além da necessidade em se apresentar o sentido de propagação (HELLMANN, 2001).

2.2 Descrição polarimétrica do retroespalhamento

Duas diferentes representações dos espalhadores são normalmente usadas na literatura: a matriz de Jones ou matriz de espalhamento $[S]$ e a matriz de Muller ou Kennaugh. Estas duas matrizes permitem relacionar o vetor da onda incidente e espalhada e, portanto, obter informação sobre o espalhador. A matriz de Jones é usada quando a onda é representada através do vetor de Jones, e a matriz de Muller ou Kennaugh é usada quando se utiliza o vetor de Stokes para a representação da onda (HELLMANN, 2001).

Estas matrizes descrevem espalhadores determinísticos, os quais geram ondas perfeitamente polarizadas, preservando a polarização da onda incidente. Para os alvos que ocorrem na natureza, esta suposição de espalhadores determinísticos puros não é válida, já que a célula de resolução é maior que o comprimento de onda utilizado pelo sistema, ou seja, superfícies naturais do terreno contêm muitos espalhadores determinísticos espacialmente distribuídos, sendo cada um desses espalhadores completamente e individualmente representados por uma matriz de espalhamento $[S]_i$. Portanto, a matriz $[S]$ medida para uma célula de resolução, consiste de uma superposição coerente das matrizes individuais $[S]_i$ de todos os espalhadores localizados dentro da célula de resolução. Estes alvos são chamados não-determinísticos e geram ondas parcialmente polarizadas (HELLMANN, 2001). Para lidar com estes alvos, é utilizada a matriz de covariância

do alvo e a matriz de coerência, as quais são obtidas a partir da vetorização da matriz de espalhamento $[S]$.

2.2.1 Matriz de Jones

Os campos elétricos da onda espalhada e da onda incidente, representados respectivamente por $\vec{E}^s$ e $\vec{E}^i$, estão relacionados pela matriz de espalhamento $[S]$ de acordo com a expressão (HELLMANN, 2001):

$$\vec{E}^s = \frac{\exp(jk_0 r)}{r} [S] \vec{E}^i \quad (6)$$

em que r é a distância entre o alvo e a antena e k_0 é o número de onda.

A matriz $[S]$ é uma matriz complexa 2x2, chamada matriz de Jones ou matriz de Sinclair quando se utiliza os sistemas de coordenadas FSA (*Forward Scatter Alignment*⁵) e BSA (*Backscatter Scattering Alignment*⁶), respectivamente. Os quatros elementos complexos dessa matriz contêm informações sobre o espalhador (HELLMANN, 2001).

A matriz $[S]$ é dada na base de polarização horizontal-vertical (h, v):

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (7)$$

em que S_{hv} representa o espalhamento do alvo para o sinal que foi transmitido por uma antena de polarização horizontal (h) e recebido por uma antena de polarização vertical (v). $[S]$ é simétrica se o meio entre a antena receptora e o alvo é recíproco⁷.

⁵ FSA: sistema orientado pela onda, definindo o sistema de coordenada local orientado para a direita em relação à direção de propagação da onda.

⁶ BSA: sistema orientado pela antena, definindo o sistema local em relação à polarização da antena.

⁷ O teorema da reciprocidade implica que $S_{hv} = S_{vh}$, uma prática conveniente já que o termo de polarização cruzada tem intensidade muito menor do que os termos co-polarizados e é influenciado pelo ruído do instrumento. Para fornecer uma estimativa mais acurada, é frequentemente assumido que $S_{HV} = 1/2(S_{VH} + S_{HV})$. A suposição de reciprocidade pode ser aplicada nos casos de sistemas SAR monoestáticos, em que as antenas de transmissão e recepção estão localizadas na mesma posição (WOODHOUSE, 2006).

2.2.2 Matriz de Stokes (ou de Mueller)

Usando a convenção FSA, o vetor de Stokes do campo elétrico retroespalhado ($\vec{g}^s$) relaciona-se ao vetor de Stokes do campo elétrico incidente ($\vec{g}^i$) através da matriz de Mueller $[M]$ (HELLMANN, 2001):

$$\vec{g}^s = [M]\vec{g}^i \quad (8)$$

Caso haja reciprocidade ($S_{hv} = S_{vh}$), a matriz $[M]$ é simétrica, e neste caso ela é chamada de matriz de Stokes. Assim, a diferença entre elas é que a matriz de Muller não assume o teorema da reciprocidade e, conseqüentemente, contém mais elementos independentes.

Usando a convenção BSA, o vetor de Stokes do campo elétrico retroespalhado relaciona-se ao vetor de Stokes do campo elétrico incidente através da matriz de Kennaugh $[K]$ (HELLMANN, 2001):

$$\vec{g}^s = [K]\vec{g}^i \quad (9)$$

2.2.3 Síntese de polarização e resposta polarimétrica

Já que um alvo tem uma forma e orientação preferencial, espera-se que ondas incidentes com diferentes polarizações tenham ecos com diferenças nas polarizações. Um sistema de radar não pode controlar por completo as várias polarizações pixel a pixel, mas pelas medidas dos dados polarimétricos é possível processar os dados como se pudéssemos mudar as polarizações transmitidas e recebidas para cada pixel. Esta técnica é chamada síntese de polarização e pode ser usada para simular a resposta de qualquer combinação arbitrária das polarizações transmitidas e recebidas (WOODHOUSE, 2006). Ou seja, a resposta de um alvo para uma combinação arbitrária de polarizações transmitidas e recebidas pode ser sintetizada pela multiplicação do vetor de Stokes pela matriz de Stokes, a qual caracteriza por completo a resposta polarimétrica, (Equação (1)) (BOERNER et al., 1998).

A resposta polarimétrica representa a variação do retroespalhamento normalizado como função da elipticidade ($-45^\circ \leq \chi \leq 45^\circ$) e orientação polarimétrica ($0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$) baseada na representação gráfica tridimensional (Figura 4). Ângulos de elipticidade de 0° e 45° indicam polarização linear e circular, respectivamente. Para o caso linear ($\chi = 0^\circ$), o ângulo de orientação de 0° e 180° indicam polarização horizontal, e $\psi = 90^\circ$ indica polarização vertical (EVANS et al., 1988; SANTOS et al., 2009). A altura pedestal mínima representa a fração da componente de espalhamento não polarizada e está, portanto, relacionada ao grau de polarização da onda espalhada (EVANS et al., 1988). A forma da resposta polarimétrica indica os mecanismos de espalhamento dominantes representando características do alvo nas configurações polarizadas linear, circular e elíptica, em todas as polarizações (McNAIRN et al., 2002).

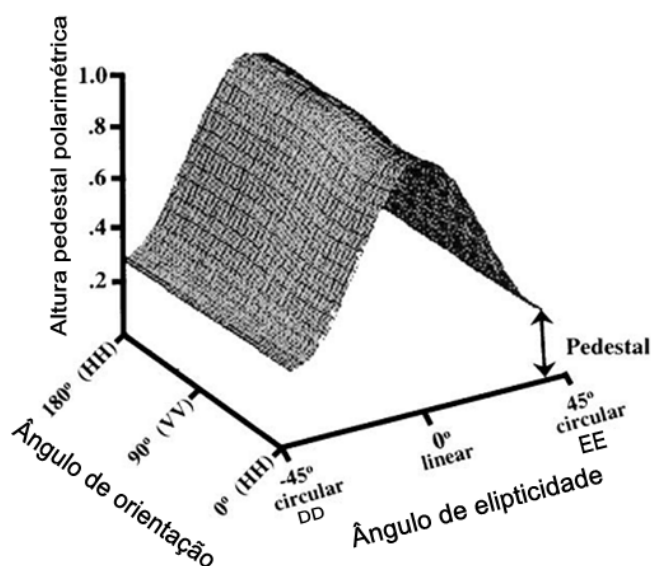


Figura 4. Exemplo de representação da resposta de polarização. DD e EE correspondem, respectivamente, às respostas de co-polarização circular direita-direita e esquerda-esquerda.

Fonte: McNairn et al., 2002.

2.2.4 Transformação de base

A transformação de base é utilizada para realçar as características do alvo. Pode-se extrair a maior energia através da mudança de base ou melhorar o conhecimento das propriedades do alvo.

A representação dos elementos da matriz $[S]$ é dependente da base de polarização. A partir de uma matriz $[S]$ com uma combinação arbitrária de polarizações é possível gerar a matriz $[S]$ para qualquer outra combinação arbitrária de polarizações. Uma aplicação comum desta relação é a transformação da base linear $\{\vec{e}_h, \vec{e}_v\}$ para a base circular $\{\vec{e}_r, \vec{e}_l\}$, através da seguinte transformação (HELLMANN, 2001):

$$\begin{bmatrix} S_{LL} & S_{LR} \\ S_{RL} & S_{RR} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

em que, $S_{RR} = iS_X + \frac{S_{HH}+S_{VV}}{2}$, $S_{LL} = iS_X - \frac{S_{HH}-S_{VV}}{2}$, $S_{RL} = i \frac{S_{HH}+S_{VV}}{2}$, $S_X = \frac{S_{HV}+S_{VH}}{2}$ i é o número imaginário.

Mesmo que os elementos da matriz de espalhamento se modifiquem com a rotação, ou seja, com a mudança de base, algumas propriedades são invariantes (HELLMANN, 2001):

- A potência total da matriz (*span*), definido como a soma quadrática dos seus elementos é constante: $|S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{VV}|^2 = |S_{MM}|^2 + |S_{MN}|^2 + |S_{NM}|^2 + |S_{NN}|^2$;
- $[S]$ é simétrica em qualquer base de polarização arbitrária, na convenção BSA;
- $\det([S])$ é invariante.

2.2.5 Vetor de espalhamento

Como já apresentado, a matriz $[S]$ descreve o processo de espalhamento e contém as informações sobre o alvo imageado. Outras representações, como a matriz de covariância e coerência, são essenciais já que lidam melhor com os casos de ondas parcialmente polarizadas. As matrizes de covariância e coerência são obtidas a partir da vetorização da matriz de espalhamento $[S]$ (HELLMANN, 2001).

A matriz $[S]$ pode ser substituída por um vetor complexo de quatro elementos $\vec{k}$, o qual contém a informação completa da matriz $[S]$ (HELLMANN, 2001):

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \Rightarrow \vec{k} = \frac{1}{2} \text{Traço}([S]\Psi) = [k_0, k_1, k_2, k_3]^T \quad (11)$$

em que $\text{Traço}([S])$ é a soma dos elementos da diagonal de $[S]$ e Ψ é uma base matricial complexa 2x2, que forma uma base ortogonal. Entre os conjuntos de base, duas são muito utilizadas: a base de Borgeaud (Ψ_B) e a base de Pauli (Ψ_P). A base de Borgeaud é dada por (LEE e POTTIER, 2009):

$$\Psi_B = \left\{ 2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2 \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, 2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (12)$$

sendo o vetor correspondente $\vec{k}_B$, o qual está mais relacionado com o sistema de medida do que com o mecanismo físico de espalhamento, dado pelos seguintes elementos complexos de $[S]$ (LEE e POTTIER, 2009):

$$\vec{k}_B = [S_{HH}, S_{HV}, S_{VH}, S_{VV}]^T \quad (13)$$

A base de Pauli é mais utilizada por estar relacionada ao mecanismo físico do espalhamento da onda (mecanismos de espalhamento do tipo superficial, diedro, diedro inclinado de 45° e polarização cruzada) e é dada por (LEE e POTTIER, 2009):

$$\Psi_P = \left\{ \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (14)$$

com o vetor correspondente $\vec{k}_P$ (LEE e POTTIER, 2009):

$$\vec{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, S_{HV} + S_{VH}, i(S_{VH} - S_{HV})]^T \quad (15)$$

Os fatores de multiplicação 2 e $\sqrt{2}$, os quais aparecem em (12) e (14), são utilizados a fim de manter a norma do vetor de espalhamento, a qual é igual à potência total espalhada, independente da base matricial Ψ escolhida (HELLMANN, 2001):

$$|\vec{k}|^2 = \vec{k}_P^{*T} \cdot \vec{k}_P = \vec{k}_B^{*T} \cdot \vec{k}_B = (|S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{VV}|^2) \quad (16)$$

2.2.6 Matriz de covariância e matriz de coerência

A matriz de covariância polarimétrica $[C]_{4 \times 4}$ é obtida pelo produto vetorial entre o vetor de espalhamento convencional (vetor de Borgeaud) $\vec{k}_B$, e seu complexo conjugado transposto $\vec{k}_B^{*T}$ (BOERNER et al., 1981):

$$[C]_{4 \times 4} = \langle \vec{k}_B \vec{k}_B^{*T} \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle & S_{HH} S_{VH}^* & S_{HH} S_{VV}^* \\ S_{HV} S_{HH}^* & \langle |S_{HV}|^2 \rangle & S_{HV} S_{VH}^* & S_{HV} S_{VV}^* \\ S_{VH} S_{HH}^* & S_{VH} S_{HV}^* & \langle |S_{VH}|^2 \rangle & S_{VH} S_{VV}^* \\ S_{VV} S_{HH}^* & S_{VV} S_{HV}^* & S_{VV} S_{VH}^* & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (17)$$

em que $\langle \dots \rangle$ indica a média espacial do conjunto, com a suposição de que o meio espalhador seja homogêneo.

Analogamente, a matriz de coerência polarimétrica é formada por:

$$[T]_{4 \times 4} = \langle \vec{k}_P \vec{k}_P^{*T} \rangle \quad (18)$$

As matrizes de covariância e coerência têm a mesma informação, são, por definição, hermitianas⁸ positivas semi-definidas, ou seja, seus autovalores são reais e não negativos. Elas têm os mesmos autovalores, mas possuem diferentes autovetores. O traço de cada uma das matrizes é o mesmo e fornece a intensidade total da onda (HELLMANN, 2001).

Considerando o Teorema de reciprocidade ($S_{HV} = S_{VH}$) o quarto elemento de Pauli não ocorre e o vetor de Pauli é reduzido a três dimensões, sem perda de informação (HELLMANN, 2001):

$$\vec{k}_{P3} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, 2S_{HV}]^T \quad (19)$$

Usando o vetor de espalhamento $\vec{k}_{P3}$ tem-se a matriz de coerência:

$$[T]_{3 \times 3} = \langle \vec{k}_{P3} \vec{k}_{P3}^{*T} \rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |A|^2 \rangle & \langle AB^* \rangle & \langle AC^* \rangle \\ \langle A^* B \rangle & \langle |B|^2 \rangle & \langle BC^* \rangle \\ \langle A^* C \rangle & \langle B^* C \rangle & \langle |C|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (20)$$

⁸ Matrizes hermitianas: desempenham papel fundamental no problema de diagonalização ortogonal de uma matriz com entradas complexas. Elas são análogas às matrizes reais simétricas. Uma matriz quadrada A com entradas complexas é chamada hermitiana se $A = A^*$, sendo A^* a matriz transposta conjugada de A (ANTON e RORRES, 2001).

em que $A = S_{HH} + S_{VV}$, $B = S_{HH} - S_{VV}$, $C = 2S_{HV}$.

A média espacial resulta em dados *multilook*, gerados pós-processamento SAR, diminuindo o ruído *speckle* presente nas imagens de radar.

A matriz de espalhamento $[S]$, covariância $[C]$ e coerência $[T]$ possuem informações sobre o processo de espalhamento, sendo interessante analisá-las a fim de extrair informações. Para isso, são utilizadas técnicas estatísticas e técnicas polarimétricas, como a decomposição de alvos.

2.3 Ruído *Speckle*

O ruído *speckle*, inerente às imagens de radar, ocorre devido à natureza coerente da radiação emitida pelo radar. Como cada célula de resolução possui contribuição de muitos espalhadores independentes, cada um destes elementos pode interferir no sinal um do outro de maneira construtiva ou destrutiva gerando assim um processo de interferência. Devido a este processo de interferência, o resultado na imagem de radar são pontos muito claros (interferência construtiva) ou muito escuros (interferência destrutiva), ou seja, variações súbitas na intensidade da imagem, o que dá origem ao nome *speckle* (GOODMAN, 1976; LEE e POTTIER, 2009). Ele tem caráter multiplicativo, sendo mais intenso onde a intensidade do sinal é maior (SANT'ANNA, 1995).

Uma das maneiras de se reduzir o *speckle* é através do processamento *multilook*. Existem várias maneiras de se obter imagens *multilook* (SANT'ANNA, 1995). Uma delas é durante o processamento da imagem SAR, em que o intervalo de abertura sintética é dividido em sub-intervalos gerando-se uma imagem para cada sub-intervalo, em que cada intervalo é chamado de *look*. A imagem final é composta pela média das imagens de cada visada, com nível de ruído atenuado (LEE e POTTIER, 2009). Para um dado em *single-look*, como a resolução em azimuth normalmente é maior que a resolução em range, uma divisão em até 8-looks pode ser feita, em alguns casos, sem comprometer a resolução espacial final (MURA, 1990).

A filtragem espacial é uma técnica para realçar a imagem e/ou reduzir o nível de ruído. A técnica mais comumente utilizada é o filtro boxcar, o qual substitui o pixel central numa janela que se move de tamanho 3 x 3 ou maior pela média dos pixels da janela. Este filtro possui algumas vantagens como: 1) simples aplicação, 2) eficiente para redução de ruído *speckle* em áreas homogêneas, e 3) preserva o valor médio. Entretanto, a maior deficiência é a degradação da resolução espacial. Um filtro boxcar borra as bordas e mancha alvos pontuais e feições lineares brilhantes, como rodovias e construções. Outros algoritmos foram propostos, como o filtro mediana, o qual substitui o pixel central da janela que se movimenta pela mediana de todos os pixels da janela (LEE e POTTIER, 2009). Outro exemplo é o filtro de Lee que se baseia na média local e variância local, supondo que a média e variância de um pixel é igual à média e variância local baseada nos pixels dentro de uma vizinhança fixa. Em áreas de contraste muito baixo, o pixel estimado se aproxima da média local enquanto que em áreas de contraste muito alto (área de borda), o pixel estimado favorece o pixel da borda, permanecendo a informação da borda. A fim de reduzir o ruído na área da borda sem sacrificar a borda, Lee propôs o filtro modificado de Lee (LEE, 1981), cuja idéia básica é redefinir a área da vizinhança próxima à região de alto contraste levando em consideração a orientação da borda.

2.4 Decomposição de alvos

A idéia principal do teorema de decomposição dos alvos (TD – *target decomposition*) é expressar o mecanismo médio de espalhamento como uma soma de elementos independentes e associar um mecanismo físico a cada um destes elementos (CLOUDE e POTTIER, 1996).

Cloude e Pottier (1996) definem três principais classes da decomposição de alvos: Decomposição coerente; Decomposição baseada na matriz de Mueller e vetor de Stokes (Ex.: decomposição Huynen); Decomposição do autovetor das matrizes de covariância $[C]$ e coerência $[T]$.

É comum encontrar as duas últimas classes agrupadas em apenas uma. Assim, alguns autores (TOUZI et al., 2004) definem duas classes principais de decomposição:

- Decomposição coerente ou decomposição da matriz de reflexão de voltagem complexa (Sinclair);
- Decomposição incoerente ou decomposição das matrizes de reflexão de potência (Mueller/Kennaugh e covariância).

A decomposição coerente relaciona-se com alvos determinísticos, ou seja, aqueles cujo retroespalhamento é conhecido. Este tipo de alvo produz ondas completamente polarizadas e não ocorre na natureza. Exemplos de elementos determinísticos são: dipolo, diedro, triedro, elemento esférico, entre outros. A matriz $[S]$ é comumente utilizada para caracterizar os estados de polarização de uma onda completamente polarizada (ULABY e ELACHI, 1990).

A decomposição incoerente é utilizada quando o espalhamento for não determinístico. Neste caso, as ondas são parcialmente polarizadas e o estado de polarização é caracterizado pelas matrizes de Mueller, covariância e coerência (ULABY e ELACHI, 1990).

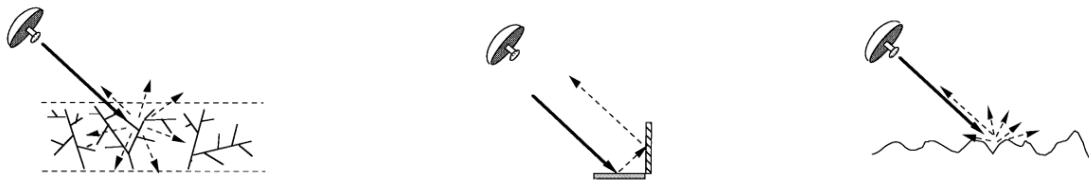
Tradicionalmente, as abordagens baseadas nas matrizes Mueller/Kennaugh são preferidas em óptica, enquanto as abordagens baseadas nas matrizes de covariância $[C]$ e coerência $[T]$ são preferidas em sensoriamento remoto por radar (HELLMANN, 2001).

Entre as decomposições incoerentes, foram utilizadas nesta pesquisa a Decomposição de Freeman e Durden (1998), a de Cloude e Pottier (1997) e a de Touzi (2007), as quais serão explicadas nos próximos itens.

2.4.1 Decomposição de Freeman-Durden

A decomposição de Freeman-Durden é baseada no modelo de espalhamento físico, decompondo a matriz de covariância para descrever o espalhamento polarimétrico a partir de espalhadores que ocorrem naturalmente. Esta técnica ajusta três modelos diferentes de mecanismos de espalhamento aos dados SAR polarimétricos (FREEMAN e DURDEN, 1998): 1) espalhador da copa ou de volume (P_V) a partir de dipolos (semelhante a uma nuvem de espalhadores cilíndricos, muito finos) orientados aleatoriamente; 2) espalhador superficial (P_S) (superfície moderadamente rugosa, modelado pelo espalhamento superficial de

Bragg de primeira ordem); e 3) mecanismo de espalhamento *double-bounce* (P_D) (espalhamento que ocorre num par de superfícies ortogonais com constantes dielétricas diferentes, por exemplo, interação água-tronco que ocorre numa floresta alagada) (Figura 5). As vantagens da decomposição de Freeman-Durden é que é baseada na física do espalhamento do radar, e não é uma construção puramente matemática. Este método permite a discriminação entre floresta inundada e não inundada e entre áreas com florestas e sem florestas (FREEMAN e DURDEN, 1998).



Espalhamento volumétrico (P_V) Espalhamento *double-bounce* (P_D) Espalhamento superficial (P_S)

Figura 5. Os três mecanismos de espalhamento usados no modelo de Freeman-Durden
Fonte: Freeman e Durden (1998).

Cada mecanismo de espalhamento de Freeman-Durden é dado por (FREEMAN e DURDEN, 1998):

$$P_V = \frac{8f_V}{3} \quad (21)$$

$$P_D = f_D(1 + |\alpha|^2) \quad (22)$$

$$P_S = f_S(1 + |\beta|^2) \quad (23)$$

em que f_V , f_D e f_S correspondem, respectivamente, às contribuições dos espalhamentos volumétrico, *double-bounce* e superficial da componente VV. α e β são estatísticas de segunda ordem para o espalhamento *double-bounce* e superficial, respectivamente, depois da normalização com respeito ao termo VV.

2.4.2 Decomposição de Cloude-Pottier

A decomposição de Cloude-Pottier (ou decomposição do autovetor da matriz de coerência) é baseada em estatísticas de segunda ordem. Ela não

assume uma distribuição estatística e, portanto, é livre das restrições impostas pelos modelos multivariados (CLOUDE e POTTIER, 1997). Este método supõe que há sempre um mecanismo de espalhamento dominante médio em cada célula, o qual pode ser representado por três parâmetros invariantes à rotação da plataforma (*“roll-invariant”*⁹): 1) ângulo alfa médio ($\bar{\alpha}$), o qual corresponde ao mecanismo de espalhamento físico (superficial ($\bar{\alpha} = 0^\circ$), volumétrico ($\bar{\alpha} = 45^\circ$) e *double-bounce* ($\bar{\alpha} = 90^\circ$), 2) entropia (H) e 3) anisotropia (A), que juntos correspondem ao tipo do processo de espalhamento.

Estes três parâmetros são gerados a partir da matriz de coerência, a qual é decomposta na soma de três matrizes de coerência $[T_n]$, cada uma ponderada por seus correspondentes autovalores (λ_i) (LEE e POTTIER, 2009):

$$[T] = \sum_{n=1}^3 \lambda_n [T_n] = \lambda_1 (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_1^T) + \lambda_2 (\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_2^T) + \lambda_3 (\vec{e}_3 \cdot \vec{e}_3^T) \quad (24)$$

Cada $[T_n]$ é uma matriz de espalhamento unitária representando uma contribuição de espalhamento determinístico. Os autovetores contêm informação sobre o tipo de espalhamento enquanto que os autovalores informam quanto do processo de espalhamento descrito pelo correspondente autovetor contribui para o processo de espalhamento como um todo (CLOUDE e POTTIER, 1997).

A partir dessa decomposição, pode-se considerar um espaço de classificação bidimensional como mostra a Figura 6. Todo mecanismo de espalhamento aleatório pode ser representado neste espaço, chamado espaço entropia (H) ângulo alfa (α), em oito diferentes zonas válidas (nove no total). As zonas especificadas, segundo Cloude e Pottier (1997) representam os seguintes mecanismos de espalhamento: (Z1) Alta entropia com espalhamento múltiplo – Ex.: camadas de vegetação com estrutura geométrica bem desenvolvida; (Z2) Espalhamento da vegetação com alta entropia: o espalhamento volumétrico aumenta quando $\bar{\alpha} = 45^\circ$ e $H > 0,9$ – Ex.: espalhamento de copas de florestas e espalhamento de alguns tipos de superfícies vegetadas; (Z3) Não faz parte de uma região válida, pois é impossível distinguir espalhamento superficial com $H > 0,9$; (Z4)

⁹ *Roll* é o ângulo de rotação da plataforma em torno do seu eixo longitudinal. Se o parâmetro é *“roll-invariant”*, significa que o parâmetro é o mesmo qualquer que seja a rotação da plataforma no eixo longitudinal.

Espalhamento múltiplo com média entropia – Ex.: *Double-bounce* em áreas urbanas e em florestas; (Z5) Espalhamento da vegetação com média entropia: moderada entropia com mecanismos de espalhamento do tipo dipolo dominante – Ex.: superfícies vegetadas com espalhadores anisotrópicos e moderada correlação das orientações do espalhador; (Z6) Espalhamento superficial com média entropia: esta zona reflete o aumento na entropia devido às mudanças na rugosidade da superfície e devido aos efeitos de propagação da copa – Ex.: Propagação no dossel ou elevação da rugosidade da superfície; (Z7) Espalhamento múltiplo com baixa entropia. Esta zona é caracterizada por $\bar{\alpha} > 47,5^\circ$ – Ex.: espalhadores diédricos metálicos isolados; (Z8) Espalhamento dipolo com baixa entropia: nesta zona ocorrem mecanismos fortemente correlacionados. Um espalhador dipolo isolado e espalhamento da vegetação com orientação fortemente correlacionada de elementos com espalhamento anisotrópico – Ex.: vegetação com elementos de espalhamento anisotrópicos altamente correlacionados; (Z9) Espalhamento superficial com baixa entropia: correspondem aos valores de $\bar{\alpha} < 42,5^\circ$, incluem espalhamento superficial e especular – Ex.: água nas bandas P e L, oceano na banda L e superfícies bem suaves.

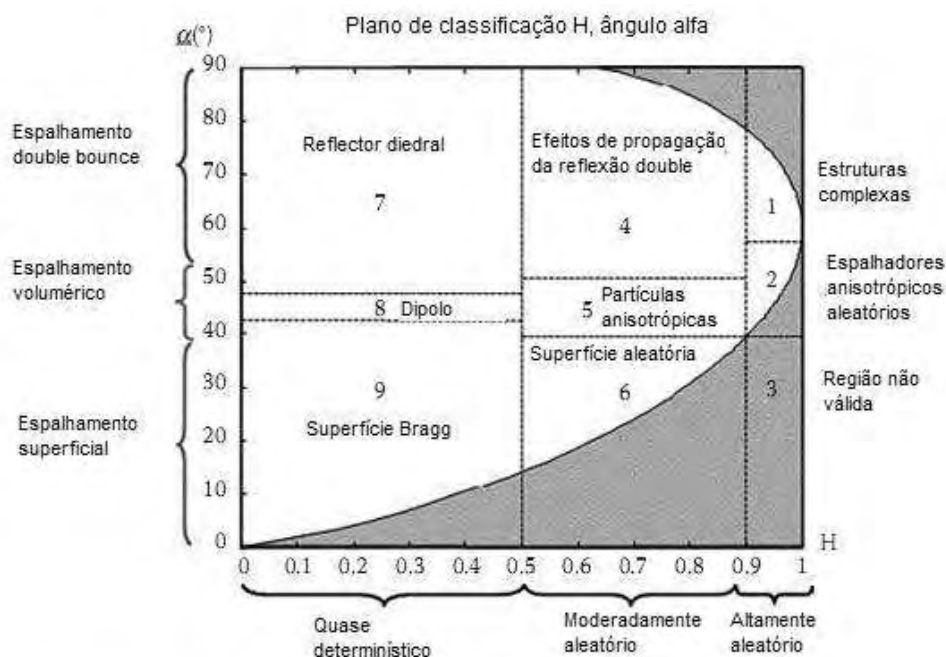


Figura 6. Plano bidimensional entropia (H), ângulo alfa (α).

Fonte: Modificada de Cloude e Pottier (1997); Lee e Pottier (2009).

A entropia (H) indica o grau de aleatoriedade da distribuição dos mecanismos de espalhamento e é dada pela seguinte fórmula (CLOUDE e POTTIER, 1997):

$$H = -P_1 \log_3 P_1 - P_2 \log_3 P_2 - P_3 \log_3 P_3 \text{ em que } P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^3 \lambda_j} \quad (25)$$

em que P_i pode ser interpretado como a intensidade relativa de um processo de espalhamento ' i '. Devido a esta definição, H está restrito ao intervalo $0 \leq H \leq 1$, em que $H = 0$ indica que $[T]$ tem apenas um autovalor diferente de zero, representando somente um processo de espalhamento determinístico, enquanto $H = 1$ significa que todos os λ_n são iguais. Já que a entropia é principalmente um indicador para o relacionamento entre λ_1 e os dois outros autovalores λ_2 e λ_3 , nenhuma informação direta sobre a relação entre os dois últimos pode ser extraída a partir da entropia (HELLMANN, 2001).

A anisotropia, também extraída a partir dos autovalores, indica a importância relativa dos mecanismos de espalhamento secundários, sendo mais representativo quando ocorre média entropia ($H > 0,7$). A anisotropia é complementar à entropia e é dada por (CLOUDE e POTTIER, 1997):

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (26)$$

Quando a entropia é menor que 0,7, a anisotropia é afetada por ruído. Se a entropia é maior que 0,7 ($H > 0,7$), pode ocorrer: 1) espalhamento aleatório (além do espalhamento dominante, existe contribuição do 2º e 3º mecanismos) quando a anisotropia é baixa, e 2) um 2º mecanismo com a mesma probabilidade que o 1º para anisotropia média e alta (LEE e POTTIER, 2009):

O ângulo α está presente nos autovetores ($\vec{e}_n$) da decomposição da matriz de coerência. Além do ângulo α , cada autovetor pode ser parametrizado em termos de 5 ângulos (HELLMANN, 2001; LEE e POTTIER, 2009).

$$\vec{e}_n = [\cos(\alpha_n) e^{i\phi_n} \quad \sin(\alpha_n) \cos(\beta_n) e^{i\delta_n} \quad \sin(\alpha_n) \sin(\beta_n) e^{i\gamma_n}]^T \quad (27)$$

em que, o ângulo α indica o tipo de mecanismo de espalhamento ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$), sendo $\alpha = 0^\circ$ o espalhamento superficial, $\alpha = 45^\circ$ o espalhamento dipolo e $\alpha = 90^\circ$ o espalhamento *double-bounce*; o ângulo β representa a orientação física do

espalhador em relação à linha de visada ($-180^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$); ϕ , δ , γ estão relacionados com os ângulos de fase do alvo (HELLMANN, 2001).

O ângulo alfa médio é definido como a soma ponderada pela intensidade relativa de cada processo de espalhamento (P_i):

$$\bar{\alpha} = P_1\alpha_1 + P_2\alpha_2 + P_3\alpha_3 \quad (28)$$

Os ângulos β , ϕ , δ , γ não são normalmente utilizados por serem variantes à rotação da plataforma no eixo longitudinal (*"roll-variant"*).

2.4.3 Decomposição de Touzi

Assim como a decomposição de Cloude-Pottier, a decomposição de Touzi é baseada na matriz de coerência. Essa matriz passa por uma transformação de rotação segundo o ângulo de orientação ψ , procedimento que permite a geração de parâmetros invariantes à rotação (*"roll-invariant"*), os quais são capazes de descrever o espalhamento do alvo de maneira única, independente da base de polarização. Eles são referenciados à base triedral-diedral e, portanto, às características dos alvos.

O vetor de espalhamento de Touzi é derivado a partir da projeção da matriz de espalhamento de Kennaugh-Huynen na base de Pauli e é dado pela seguinte expressão (TOUZI, 2007):

$$\vec{e}_T^{SV} = m|\vec{e}_T|_m \cdot \exp^{j\phi_s} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\psi & -\sin 2\psi \\ 0 & \sin 2\psi & \cos 2\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha_s \cos 2\tau \\ \sin \alpha_s e^{j\phi_{\alpha_s}} \\ -j \cos \alpha_s \sin 2\tau \end{bmatrix} \quad (29)$$

em que ψ , τ , m , ϕ_s , α_s são os cinco parâmetros independentes que representam cada espalhador e representam, respectivamente, o ângulo de orientação do alvo, a helicidade, a amplitude máxima de retorno, fase do tipo de espalhamento e magnitude do tipo de espalhamento. Os dois primeiros parâmetros e mais outros três não citados aqui foram usados por Huynen para a caracterização do espalhamento de alvos coerentes e são conhecidos como parâmetros de Huynen.

A co-diagonalização Kennaugh-Huynen é geralmente aplicada na base ortonormal de polarização H-V. Na decomposição de Touzi é utilizada a base

de Pauli por oferecer uma maneira mais conveniente de representar o espalhamento, pois ela permite resolver a ambigüidade da fase (TOUZI, 2007).

A magnitude do tipo de espalhamento (α_s) e a fase do tipo de espalhamento (ϕ_{α_s}) são determinadas na base triedral-diedral e são conhecidas como entidade complexa ou tipo de espalhamento simétrico. A helicidade (τ) mede a natureza simétrica do espalhamento do alvo e o ângulo de orientação (ψ) implica na medida intrínseca do ângulo de orientação do alvo. Como já descrito acima, a eliminação desse ângulo é o que conduz na construção do vetor de espalhamento “*roll-invariant*” (TOUZI, 2007).

A fase do tipo de espalhamento (ϕ_{α_s}) pode somente ser analisada sob condições de coerência (TOUZI, 2007). Como o espalhamento dominante corresponde ao autovetor de maior autovalor λ_1 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$), espera-se que espalhamento dominante tenha a fase de maior coerência. O espalhamento é simétrico ($\tau = 0$) quando o alvo é isotrópico dentro da célula de resolução. Uma área de floresta com distribuição de árvores não-uniforme dentro da célula de resolução terá helicidade maior que zero, devido à assimetria do alvo. Para espalhador simétrico ($\tau = 0$), o alfa de Cloude e o alfa de Touzi são idênticos.

2.5 Atributos gerados a partir do retroespalhamento e da decomposição de alvos

Os atributos se referem aos dados (imagens) gerados a partir do retroespalhamento de radar e da decomposição de alvos. Os atributos utilizados neste trabalho são apresentados na Tabela 2.

O sigma zero é o coeficiente de retroespalhamento normalizado ou seção cruzada normalizada do radar. Ele é gerado a partir da seção cruzada do radar (sigma), que corresponde à porção de energia retornada ao sensor de toda energia que incide no alvo, numa distância R . O sigma (m^2) depende de vários parâmetros do alvo: tamanho, forma, propriedades dielétricas, orientação, rugosidade, etc. O sigma zero de um alvo será quase zero se, por exemplo, o alvo emite muito pouca potência de volta para o radar. Para que possam ser comparados os sigmas obtidos a partir de vários sensores, é necessário que ele não tenha nenhuma relação direta com a real área frontal apresentada pelo alvo ao feixe de

radar. Para isso, utiliza-se um parâmetro independente ao tamanho da área de imageamento da antena ou tamanho do pixel. Esse parâmetro é o sigma zero (m^2/m^2), a partir do qual as comparações podem ser feitas e os valores utilizados como referência para outras pesquisas (WOODHOUSE, 2006).

O sigma zero para a imagem PALSAR nível 1.1 é calculado pela fórmula (SHIMADA et al., 2009):

$$\sigma^0 = 10 \log_{10} I + CF - A \quad (30)$$

em que, I é a intensidade para cada polarização HH, HV, VH e VV, CF é o fator de calibração radiométrica e A é um fator de conversão. O fator de calibração, que depende do ângulo de incidência, e o fator de conversão foram determinados por Shimada et al. (2009), que utilizou 572 pontos coletados pelo mundo todo e alvos distribuídos selecionados na floresta Amazônica. Os valores determinados por Shimada et al. (2009) para a imagem trabalhada foram $CF=-83$ e $A=32$. O sigma zero expresso em escala linear, útil para a determinação dos próximos atributos, é determinado com uma transformação sobre o dado em escala logarítmica:

$$\sigma_{lin}^0 = 10^{\frac{\sigma^0}{10}} \quad (31)$$

Tabela 2. Atributos baseados nos dados polarimétricos. ¹Parâmetros de Pope; ²Parâmetros de Cloude-Pottier; ³Parâmetros de Freeman-Durden; ⁴Parâmetros de Touzi.

Atributos gerados a partir do retroespalhamento	Símbolo	Significado
Sigma zero (HENDERSON e LEWIS, 1998)	$\sigma_{HH}^0; \sigma_{HV}^0$ $\sigma_{VH}^0; \sigma_{VV}^0$	Porção de energia retornada ao sensor de toda energia incidente no alvo, não dependente da área do alvo ou tamanho do pixel (HENDERSON e LEWIS, 1998; WOODHOUSE, 2006).
Razão de co-polarização	$\sigma_{linVV}^0 / \sigma_{linHH}^0$	Razão entre os dois retroespalhamentos co-polarizados.
Razão de polarização cruzada	$\sigma_{linVV}^0 / \sigma_{linHV}^0$ $\sigma_{linHH}^0 / \sigma_{linHV}^0$	Razão entre o retroespalhamento co-polarizado e o de polarização cruzada ou vice-versa.
Potência total	Span	Soma da potência de todas as polarizações espalhadas de um alvo de volta ao radar.
Índice de biomassa (POPE et al., 1994) ¹	BMI	Porção relativa de madeira quando comparada à biomassa foliar.
Índice de estrutura da copa (POPE et al., 1994) ¹	CSI	Troncos ou hastes aproximadamente verticais.
Índice de espalhamento do volume (POPE et al., 1994) ¹	VSI	Densidade da copa.
Diferença de fase entre HH e VV	$\phi_{HH} - \phi_{VV}$	Diferença de fase entre os espalhamentos HH e VV. Valor alto indica a ocorrência do espalhamento <i>double-bounce</i> .
Coerência polarimétrica entre HH-VV	γ	Magnitude da correlação cruzada complexa entre HH e VV. Indica o grau de correlação entre os espalhamentos HH e VV.
Atributos gerados a partir da decomposição de alvos	Símbolo	Significado
Ângulo alfa médio (CLOUDE e POTTIER, 1996) ²	α_m	Tipo de espalhamento dominante (espalhamento superficial ($\alpha_m = 0^\circ$), volumétrico ($\alpha_m = 45^\circ$) e <i>double-bounce</i> ($\alpha_m = 90^\circ$)).
Entropia (CLOUDE e POTTIER, 1996) ²	H	Número de mecanismos de espalhamentos dominantes (Se a entropia é baixa ($H < 0,3$), o sistema é fracamente despolarizante e o espalhamento dominante em termos de um espalhador pontual identificável pode ser recuperado; se a entropia é alta, pode ser considerada uma mistura de possíveis tipos de espalhadores pontuais; se $H=1$, a informação da polarização torna-se zero e o espalhamento do alvo é um processo aleatório ruidoso (LEE e POTTIER, 2009)
Anisotropia (CLOUDE e POTTIER, 1996) ²	A	Parâmetro complementar à entropia polarimétrica. Mede a importância relativo do 2º e 3º mecanismos de espalhamento, quando $H > 0,7$ (para H menor, A é afetada por ruído). Alta entropia e baixa anisotropia correspondem ao espalhamento aleatório. Alta entropia e alta anisotropia correspondem à presença de dois mecanismos de espalhamento com a mesma probabilidade.
Espalhamento volumétrico (FREEMAN e DURDEN, 1998) ³	P_V	Parâmetro modelado por uma nuvem de espalhadores aleatoriamente orientados, muito finos do tipo cilíndrico.
Espalhamento <i>double-bounce</i> (FREEMAN e DURDEN, 1998) ³	P_D	Parâmetro modelado pelo espalhamento provocado por um par de superfícies ortogonais com diferentes constantes dielétricas, por exemplo a interação água-tronco para florestas inundadas.
Espalhamento superficial (FREEMAN e DURDEN, 1998) ³	P_S	Superfície moderadamente rugosa.
Magnitude do tipo de espalhamento (TOUZI, 2007) ⁴	$\alpha_{s1}; \alpha_{s2};$ $\alpha_{s3}; \alpha_{sm}$	Ângulo da direção do vetor de espalhamento simétrico na base triedral-diedral. Para um espalhador simétrico ($\tau = 0$), o ângulo alfa médio de Cloude-Pottier e de Touzi são idênticos.
Fase do tipo de espalhamento (TOUZI, 2007) ⁴	$\phi_{as1}; \phi_{as2};$ $\phi_{as3}; \phi_{asm}$	Diferença de fase entre os espalhamentos triedral e diedral. Pode somente ser analisada sob condições de coerência.
Helicidade (TOUZI, 2007) ⁴	$\tau_1; \tau_2; \tau_3;$ τ_m	Natureza simétrica do espalhamento do alvo. O espalhamento é simétrico ($\tau = 0$) se o alvo é isotrópico dentro da célula de resolução.
Ângulo de orientação (TOUZI, 2007) ⁴	$\psi_{t1}; \psi_{t2};$ $\psi_{t3}; \psi_{tm}$	Medida intrínseca do ângulo de orientação do alvo.

Entre os atributos gerados a partir do retroespalhamento, estão os índices de Pope: BMI (*Biomass index*), CSI (*Canopy structure index*) e VSI (*Volume scattering index*), os quais são índices biofísicos diretamente relacionados com as características da vegetação. De acordo com Pope et al. (1994), BMI é útil para diferenciar entre áreas vegetadas e não vegetadas e entre terrenos inclinados e planos; VSI é útil para distinguir entre florestas de terra firme e em regeneração; e CSI é útil para diferenciar entre tipos de florestas de pântano. As fórmulas para os cálculos de BMI, CSI e VSI são apresentadas nas Equações (32), (33) e (34), respectivamente.

$$BMI = (\sigma_{linHH}^0 + \sigma_{linVV}^0)/2 \quad (32)$$

$$CSI = \sigma_{linVV}^0 / (\sigma_{linHH}^0 + \sigma_{linVV}^0) \quad (33)$$

$$VSI = \sigma_{linHV}^0 / (\sigma_{linHV}^0 + BMI) \quad (34)$$

O parâmetro BMI é um indicador da porção relativa de madeira em relação à biomassa foliar, em que os menores valores são normalmente associados às florestas perenes (biomassa foliar fresca alta) devido à absorção das microondas pelas folhas verdes. BMI é melhor utilizado para terrenos com vegetação, e apesar do solo nu e água frequentemente ter os menores valores para BMI, quando estas superfícies são rugosas o BMI pode ser muito alto. O CSI tende a ser mais alto para ecossistemas dominados por troncos ou hastes aproximadamente verticais do que para ecossistemas dominados por troncos ou hastes aproximadamente horizontais e o VSI indica a densidade do dossel da vegetação (POPE et al., 1994).

A coerência pode ser interpretada como uma medida de similaridade entre duas ondas separadas no espaço ou tempo (WOODHOUSE, 2006). Os elementos da matriz de covariância correspondem diretamente às correlações cruzadas complexas (CCC) usadas para definir a coerência complexa. É correlação cruzada porque se trata da correlação de uma onda com a outra e é complexa porque as ondas são descritas usando números complexos. A coerência polarimétrica depende de qual base está sendo usada e quais polarizações são escolhidas.

A magnitude da correlação cruzada complexa (CCC) entre HH e VV é dada pela equação (35) e pode ser um indicador do grau de polarização já que valores baixos indicam que não há correlação entre os dois estados co-polarizados. Superfícies rugosas tendem a ter baixos valores de $|\gamma_{HH,VV}|$ (WOODHOUSE, 2006).

$$\gamma = \frac{|\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle|}{\sqrt{\langle S_{HH} S_{HH}^* \rangle \langle S_{VV} S_{VV}^* \rangle}} \quad (35)$$

A fase da correlação cruzada complexa representa a diferença de fase entre os dois estados de polarização. A fase $\gamma_{HH,VV}$ tem significado físico relacionado ao número de interações. É normalmente chamada diferença de fase polarimétrica. Valor próximo a 0° significa que o espalhamento é do tipo *single-bounce*, próximo a 180° , o espalhamento é do tipo *double-bounce*, e diferença de fase entre estes dois valores significa que o alvo possui espalhamento múltiplo (WOODHOUSE, 2006).

2.6 Métodos de classificação de imagens SAR polarimétricas

2.6.1 Classificação baseada em modelo de decomposição

Entre as classificações baseadas em modelos de decomposição, as mais comuns são as geradas a partir da decomposição de Cloude-Pottier (CLOUDE e POTTIER, 1997) e de Freeman-Durden (FREEMAN e DURDEN, 1998). Como já tratado no item 2.4 (Decomposição de alvos), a decomposição de Cloude-Pottier divide a classificação em 8 zonas válidas quando são utilizados os parâmetros entropia e ângulo alfa e 16 zonas quando é adicionada a anisotropia. A decomposição de Freeman-Durden classifica a imagem nos mecanismos de espalhamento superficial, volumétrico e *double-bounce*.

2.6.2 Classificação baseada em parâmetros estatísticos

Entre as classificações baseadas nas características estatísticas dos dados de radar, a mais comumente utilizada é a Máxima Verossimilhança baseada na distribuição Wishart complexa (LEE e GRUNES, 1992; LEE e POTTIER, 2009).

Além desta, existem: a classificação por Máxima Verossimilhança integrada ao classificador contextual ICM (*Iterated Conditional Modes*) – MaxVer-ICM (VIEIRA et al., 1997; CORREIA et al., 1998); a classificação polarimétrica *Expectation-Maximisation* – EM (REIGBER et al., 2007).

A classificação pelo critério de Máxima Verossimilhança (MaxVer) é o método de classificação supervisionado mais comum aplicado aos dados de sensoriamento remoto no nível óptico. Ele se baseia em uma caracterização estatística do conjunto de dados analisados e no teorema de Bayes.

A classificação por Máxima Verossimilhança baseada na distribuição Wishart complexa é pixel a pixel e foi desenvolvida para ser aplicada na matriz de covariância (ou de coerência), a qual possui distribuição Wishart. Antes deste classificador, a maioria dos esquemas de classificações era baseada em informações polarimétricas incompletas (como intensidades HH, HV, VV, diferença de fase entre HH e VV, razão de polarização), ou baseava-se nos três componentes polarimétricos complexos (HH, HV e VV), mas apenas para dados polarimétricos processados em *single-look*. Já a classificação por Máxima Verossimilhança baseada na distribuição Wishart complexa permite a extração de informação baseada em dados polarimétricos completos processados em *multilook* e também em *single-look*. Ao se assumir a distribuição de Wishart para as classes, a classificação por máxima verossimilhança conduz à seguinte regra: considerando que as probabilidades *a priori* das classes são iguais, a matriz de covariância de um pixel é designada à classe X_m se $d_1([C], X_m) \leq d_1([C], X_j) \forall j \neq m$ (LEE e GRUNES, 1994), sendo:

$$d_1([C], X_m) = \ln|C_m| + \text{Tr}(C_m^{-1}[C]) \quad (36)$$

em que $\text{Tr}(C_m^{-1}[C])$ é o traço da matriz $C_m^{-1}[C]$, C_m é a matriz de covariância classe X_m e $[C]$ é a matriz de covariância do pixel.

No classificador MaxVer-ICM (VIEIRA et al., 1997; CORREIA et al., 1998), o usuário pode escolher três diferentes distribuições para modelar as classes conforme o seu grau de homogeneidade (áreas homogêneas, áreas heterogêneas e extremamente heterogêneas). A classificação por Máxima Verossimilhança depende da radiometria observada e do modelo (densidade) escolhido para cada classe. O ICM é um método iterativo de refinamento de classificações que se baseia em

substituir a classe associada a um determinado pixel pela classe que maximiza um certo critério. Esse critério é a distribuição *a posteriori* da classe, dadas a radiometria (componente MaxVer) e as classes vizinhas (componente de contexto). A influência de oito vizinhos é considerada nesse critério.

2.6.3 Classificação híbrida

A classificação híbrida é a combinação entre a classificação baseada nos modelos da decomposição dos alvos e aquela baseada na estatística dos dados polarimétricos. Dentre estas, podem ser citadas: classificação Wishart com classes de entrada baseadas na decomposição de Cloude-Pottier (LEE et al., 1999; LEE e POTTIER, 2009) e classificação Wishart com classes de entrada baseadas na decomposição de Freeman-Durden (LEE et al., 2004).

A classificação Wishart – Cloude Pottier utiliza as classes resultantes da decomposição de Cloude-Pottier (8 classes no caso bidimensional - plano H/alfa e 16 no caso tridimensional - Entropia, alfa e anisotropia) como entrada para a classificação por Máxima Verossimilhança baseada na distribuição complexa de Wishart. As interações de Wishart são baseadas apenas na estatística do pixel, não sendo levado em consideração o mecanismo de espalhamento. Isso pode migrar um pixel inicialmente pertencente a uma zona para outra (LEE et al., 1999; LEE e POTTIER, 2009).

A classificação Wishart – Freeman Durden combina a decomposição baseada no modelo de espalhamento de Freeman Durden e a classificação por Máxima Verossimilhança baseada na distribuição Wishart complexa. Este método, diferentemente do anterior, preserva as características de espalhamento (superficial, *double-bounce* e volumétrico) inicialmente associadas aos pixels. Para isso, os pixels associados a uma determinada categoria de espalhamento ficam restritos a serem reclassificados na mesma categoria. Cada categoria é dividida em 30 ou mais regiões pequenas com aproximadamente o mesmo número de pixels. Dentro de cada categoria, as regiões são fundidas com base na distância Wishart. A matriz de covariância de cada classe é usada como centro da classe e os pixels são reclassificados com base na distância Wishart medida a partir de cada centro da classe. Ocorrem de 2 a 4 iterações e as cores azul, verde e vermelho são,

normalmente, associadas aos mecanismos de espalhamento superficial, volumétrico e *double-bounce*, respectivamente (LEE et al., 2004).

Capítulo 3 - Classificação orientada a objetos

A informação contida em pixels individuais, muitas vezes, não é suficiente para discriminar feições em sensoriamento remoto, sendo mais adequados os métodos avançados baseados em conhecimento (HOFMANN, 2001), que utilizam a análise da imagem orientada a objetos, já que um objeto da imagem pode ser associado a um correspondente objeto do mundo real.

Na maioria dos casos, informações semânticas importantes da imagem não são representadas em pixels individuais, mas em objetos da imagem e em suas relações mútuas. Além disso, dados de radar, devido à sua natureza, podem ser classificados com maior sucesso quando os alvos de interesse são submetidos a um algoritmo de segmentação que produz objetos homogêneos com significado semântico (BAATZ e SCHÄPE, 2000). O conhecimento do especialista é, então, modelado para o ambiente computacional (FEITOSA et al., 2005), através da análise orientada a objetos.

O conhecimento pode ser representado hierarquicamente por uma estrutura que relaciona os objetos usando a semântica. Essa organização hierárquica das relações entre os objetos assemelha-se ao raciocínio humano, o qual trabalha a informação em vários níveis (LANG, 2008; ANTUNES, 2003).

A abordagem orientada a objetos compreende dois estágios: no primeiro, os pixels são agrupados formando os objetos, com base em alguma medida de similaridade, possivelmente numa hierarquia de objetos multi-nível; no segundo estágio, os objetos identificados são tratados como entidades únicas, podendo ser analisados e classificados (BAATZ et al., 2008).

Existem diversos algoritmos para segmentar uma imagem. A segmentação multiresolução (item 3.1), cuja implementação é encontrada no *software* eCognition Developer, foi desenvolvido a partir de métodos de inteligência artificial ao invés de processamentos tradicionais de imagem (DEFINIENS, 2009). Ela permite a aplicação do conhecimento do especialista já no processo de segmentação que cria objetos conforme critérios de homogeneidade da cor e forma, sendo seu tamanho ajustado pelo parâmetro de escala que determina qual o máximo de heterogeneidade permitido para os objetos. Para gerar objetos úteis para

a classificação é fundamental uma segmentação adequada para o processo de análise de objetos (HOFMANN, 2001).

Depois de realizada a segmentação da imagem, os objetos são classificados em classes definidas conforme seus descritores espectrais, contextuais, de textura, da forma, da área, do tamanho dos objetos. A variedade de descritores dificulta que diferentes objetos com características espectrais similares sejam agrupados numa mesma classe. Além dos descritores, outro fator levado em consideração na classificação é a função de pertinência que pode utilizar regras *fuzzy* ou booleana para associação dos objetos às classes (PINHO, 2005).

3.1 Segmentação multiresolução

A segmentação multiresolução baseia-se na abordagem de crescimento de regiões, agrupando pixels ou objetos segundo um determinado critério de homogeneidade, que é dado pela combinação do critério espectral e forma (espacial). O critério de homogeneidade mede quão homogênea ou heterogênea é a região interna de um objeto (BENZ et al., 2004).

O critério de heterogeneidade (f) de um objeto deve ser menor do que um determinado limiar:

$$f = w_{cor} \cdot \Delta h_{cor} + w_{forma} \cdot \Delta h_{forma} \quad (37)$$

$$w_{cor} \in [0,1]; w_{forma} \in [0,1]; w_{cor} + w_{forma} = 1$$

em que, Δh_{cor} é a componente espectral, Δh_{forma} a componente espacial, w_{cor} e w_{forma} , a importância relativa de cada um destes componentes respectivamente (BENZ et al., 2004).

A heterogeneidade da cor (Δh_{cor}) permite adicionar peso w_c para os diferentes canais (c) da imagem (BENZ et al., 2004):

$$\Delta h_{cor} = \sum_c w_c \left(n_{Obj_{unido}} \cdot \sigma_{c,Obj_{unido}} - (n_{Obj_1} \cdot \sigma_{c,Obj_1} + n_{Obj_2} \cdot \sigma_{c,Obj_2}) \right) \quad (38)$$

em que, n_{Obj_i} é o número de pixels em Obj_i , para $i = 1, 2, unido$, Obj_1 é o segmento selecionado, Obj_2 é o vizinho analisado, Obj_{unido} é o segmento resultante da união

de Obj_1 e Obj_2 , σ_{c,Obj_i} é o desvio padrão dos valores dos pixels do objeto i na banda c .

O critério de heterogeneidade da forma (Δh_{forma}) descreve a forma com respeito à sua suavidade (Δh_{suav}) e compacidade (Δh_{comp}) (BENZ et al., 2004):

$$\Delta h_{forma} = w_{comp} \cdot \Delta h_{comp} + w_{suav} \cdot \Delta h_{suav} \quad (39)$$

com:

$$\Delta h_{suav} = n_{Obj_{unido}} \cdot \frac{l_{Obj_{unido}}}{b_{Obj_{unido}}} - \left(n_{Obj_1} \cdot \frac{l_{Obj_1}}{b_{Obj_1}} + n_{Obj_2} \cdot \frac{l_{Obj_2}}{b_{Obj_2}} \right) \quad (40)$$

$$\Delta h_{comp} = n_{Obj_{unido}} \cdot \frac{l_{Obj_{unido}}}{\sqrt{n_{Obj_{unido}}}} - \left(n_{Obj_1} \cdot \frac{l_{Obj_1}}{\sqrt{n_{Obj_1}}} + n_{Obj_2} \cdot \frac{l_{Obj_2}}{\sqrt{n_{Obj_2}}} \right) \quad (41)$$

em que, l é o perímetro do objeto e b é o perímetro do retângulo que envolve o objeto.

Os resultados da segmentação dependem dos pesos w selecionados. O parâmetro de escala determina quando a segmentação deve parar. Antes de agrupar dois objetos adjacentes, é calculado o aumento da heterogeneidade e caso esse valor exceda o limiar determinado pelo parâmetro de escala, os objetos não são agrupados e a segmentação para. Quanto maior o parâmetro de escala, mais objetos podem ser agrupados e maiores são os objetos resultantes (BENZ et al., 2004).

Capítulo 4 - Modelo de regressão linear múltipla

Para investigar o potencial da imagem SAR polarimétrica banda L (PALSAR) na estimativa de parâmetros morfológicos da macrófita, foi utilizada a análise de regressão linear múltipla, conforme a formulação (42):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \epsilon_i \quad (42)$$

em que Y_i é a variável resposta na i -ésima observação (variável morfológica da macrófita); $X_{i1}, \dots, X_{i,p-1}$ são as $p - 1$ constantes (atributos da imagem de radar), $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$ são os p parâmetros; e ϵ é o termo de erro aleatório com as seguintes suposições: média zero ($E\{\epsilon_i\} = 0$), variância constante ($Var\{\epsilon_i\} = \sigma^2$) e independência entre si ($Cov\{\epsilon_i, \epsilon_j\} = 0, i \neq j$). A média zero é garantida pela inclusão de β_0 no modelo; a constância da variância pode ser verificada pelo teste de Levene; e independência dos erros pode ser verificada por testes de autocorrelação espacial (Diagrama de Moran). A suposição de normalidade dos erros implica que a variável resposta Y_i também tem distribuição normal.

As suposições apresentadas devem ser satisfeitas para que o modelo de regressão seja adequado. Para tanto, procedimentos diagnósticos são recomendados por Neter et al. (2004), os quais foram utilizados nas metodologias de Gonçalves et al. (2011) e Narvaes (2010) para o tratamento de dados SAR (R99-B e PALSAR/ALOS) demonstrando a potencialidade dos atributos SAR (banda L) na caracterização e estimativa de volume e biomassa florestal na Amazônia. Tais procedimentos são:

1. Diagrama de espalhamento da variável resposta contra cada variável explicativa (Y versus $X_1, \dots, Y$ versus X_{p-1}) pode ajudar na determinação da natureza e força do relacionamento e na identificação de *outliers*;
2. Gráfico dos resíduos para avaliação da homocedasticidade, normalidade dos resíduos e curvatura.
 - a) Gráfico dos resíduos contra os valores ajustados ($|\hat{\epsilon}|$ versus $\hat{Y}$ ou $\hat{\epsilon}^2$ versus $\hat{Y}$) ajuda a avaliar a constância da variância dos erros. Se a não-constância é detectada, um gráfico dos resíduos contra cada variável explicativa ($\hat{\epsilon}$ versus $X_1, \dots, \hat{\epsilon}$ versus X_{p-1}) pode identificar a variável explicativa que esteja relacionada com a variabilidade do erro. Para confirmar a constância

da variância dos erros, pode-se utilizar o teste de Levene. Para cada variável independente, é realizada uma análise nos desvios dos resíduos em relação às respectivas médias dos grupos. Para isso, os dados são divididos em dois grupos, ordenados de acordo com o valor da variável independente que está sendo testada (X). Assim, um grupo é composto por elementos com pequenos valores de X e o outro por grandes valores de X . Se o valor absoluto de t calculado é menor ou igual ao valor assumido pela distribuição $t - student$, o teste não é estatisticamente significativo e a hipótese de variância homogênea é aceita. Outro teste semelhante é o teste de Levene modificado (teste de Brown-Forsythe). Enquanto o teste de Levene utiliza a média dos desvios dos resíduos de cada grupo, o de Levene modificado utiliza a mediana;

- b) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos ajuda a examinar se os termos de erros são razoavelmente normalmente distribuídos;
- c) Gráfico do resíduo versus cada variável explicativa (*ê versus $X_1, \dots, \hat{e}$ versus X_{p-1}*) ajuda a verificar se o efeito de curvatura para aquela variável é requerida no modelo;

3. *Outliers*. Uma observação pode ser *outlier* com respeito ao seu valor Y , seu(s) valor(es) X , ou ambos. Nem todos os *outliers* têm uma forte influência na função de regressão. Para determinar se são ou não influentes pode ser utilizada a distância de Cook, a qual considera a influência do i -ésimo caso em todos os valores ajustados n . Para sua interpretação, determina-se o correspondente valor do percentil desta medida na distribuição $F(p, n - p)$, em que n é o número de observações e p o número de parâmetros. Se o valor de percentil é menor que 10 ou 20%, o i -ésimo caso tem pouca influência nos valores ajustados. Outra medida utilizada para verificar a influência dos *outliers* foi $DFFITS_i$ que é a diferença entre o valor ajustado de uma observação ($\hat{Y}_i$) quando todas as observações são usadas no ajuste da função e o seu valor predito ($\hat{Y}_{i(i)}$) quando ela é omitida do ajuste da função. Neter et al. (2004) sugere considerar um *outlier* influente se o valor absoluto de $DFFITS$ é maior que 1 para pequenos e médios conjuntos amostrais e $2\sqrt{p/n}$ para um grande número de observações.

4. Multicolinearidade. É o estado de alta associação entre as variáveis independentes. Se presente, a inferência estatística pode não ser confiável. Pode ser detectada pelo valor de tolerância e pelo fator de inflação da variação (VIF – *variance inflator factor*). O valor de tolerância é um menos a proporção da variância da variável explicada por outra(s) variável (eis) independente(s). Uma alta tolerância indica pouca colinearidade e, valor de tolerância próximo de zero indica que a variável é praticamente explicada por outra(s) variável(eis). O VIF mede quanto aumenta a variância de um coeficiente de regressão estimado se as variáveis independentes forem correlacionadas. Segundo Neter et al. (2004), VIF superior a 10 indica que a multicolinearidade pode estar influenciando indevidamente as estimativas dos mínimos quadrados.

5. Autocorrelação espacial dos resíduos. Foi utilizado o diagrama de Moran (I) dos resíduos (ANSELIN, 1996), o qual mede o grau de correlação existente entre o resíduo de uma dada observação e o resíduo nas localizações vizinhas.

Como uma medida de correção do item 2, pode ser feita uma transformação na variável resposta Y ou nas variáveis explicativas. A transformação em Y é útil quando a distribuição dos termos de erros é tendenciosa (enviesada, ou seja, não aleatória) e a variância dos erros não é constante. A transformação de algumas das variáveis explicativas é importante quando o efeito destas variáveis é curvilinear. Além disso, as transformações em Y e/ou nas variáveis explicativas podem ajudar na eliminação ou redução dos efeitos de interação. A transformação Box-Cox identifica, automaticamente, uma transformação em Y a partir de uma família de transformações potência. O procedimento Box-Cox usa o método de máxima-verossimilhança para encontrar a potência (λ) a ser utilizada na transformação.

4.1.1 Análise de variância (ANOVA)

A ANOVA é um caso particular da análise de regressão e a partir dela é possível testar diferenças significativas entre as classes (tratamentos) levando em consideração as médias e as variâncias destas classes.

O modelo ANOVA é dado por (NETER et al., 2004):

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} \quad (43)$$

em que, Y_{ij} é o valor da variável resposta na j -ésima observação para a i -ésima classe, μ_i são parâmetros, ε_{ij} são desvios ou erros independentes $N(0, \sigma^2)$, i são as classes ($i = 1, \dots, r$), r corresponde ao número de classes.

O modelo ANOVA assume que:

1. A distribuição de probabilidade de cada classe é normal.
2. As distribuições de probabilidade de cada classe possuem variância constante.
3. As classes são independentes entre si, ou seja, as respostas para cada classe são seleções aleatórias a partir da distribuição de probabilidade correspondente e são independentes das respostas para qualquer outra classe.

Capítulo 5 - Área de estudo, aquisição de dados e metodologias

5.1 Área de estudo

Com o objetivo de avaliar o potencial da imagem polarimétrica banda L (ALOS/PALSAR – *Advanced Land Observing Satellite/Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) para mapear macrófitas emersas, a planície de inundação do Lago Grande de Monte Alegre (Pará, Brasil) foi selecionada como área de estudos. A região de interesse está localizada próxima à cidade de Santarém, entre as coordenadas 803265 m E / 9751336 m N a 827317 m E / 9776919 m N, projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*), zona 21 sul, sistema de referência WGS 84 (Figura 7). Localiza-se na planície de inundação da Amazônia oriental mais baixa, com abundantes grupos de vegetação herbácea, arbustos e florestas.

A escolha do Lago Grande de Monte Alegre foi feita a partir de um conjunto de critérios, como o conhecimento adquirido em trabalhos anteriormente realizados nessa área de estudo e a necessidade em escolher uma área que estivesse no planejamento de aquisição da JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency* - responsável pelo lançamento do satélite ALOS). O conhecimento acumulado sobre a área de estudo permitiu planejar com antecedência o levantamento de campo e a aquisição do dado SAR.

O Lago Grande de Monte Alegre tem uma superfície de água aberta média entre 1000 e 1200 km² (COSTA, 2004), com variações no nível da água de 3 a 6 metros. O nível da água aumenta a partir de dezembro até maio, alcançando um pico em junho e julho, e recuando até o mínimo em outubro-novembro (COSTA, 2000). A água origina-se do Rio Maicurú, da água branca¹⁰ do Amazonas através de canais estreitos, e outros rios e riachos menores que contribuem com entradas de água preta¹¹ ou clara. Antes de alcançar o lago, o rio Amazonas recebe águas do Tapajós. As diferentes características destes rios (origem, bacia de drenagem,

¹⁰ Água branca: rios de água barrenta e amarela, rica em sedimentos dissolvidos e suspensos e de pH entre 6,2-7,2 (SIOLI, 1984).

¹¹ Água preta: rios de água transparente, cor verde escuro-marrom, pobres em sólidos em suspensão. O pH é ácido (entre 3,8-4,9) devido à alta concentração de ácidos húmicos e fúlvicos (SIOLI, 1984).

regime da água) influenciam em diferentes contribuições temporais e diferenças espaciais da química do lago (COSTA, 2000).

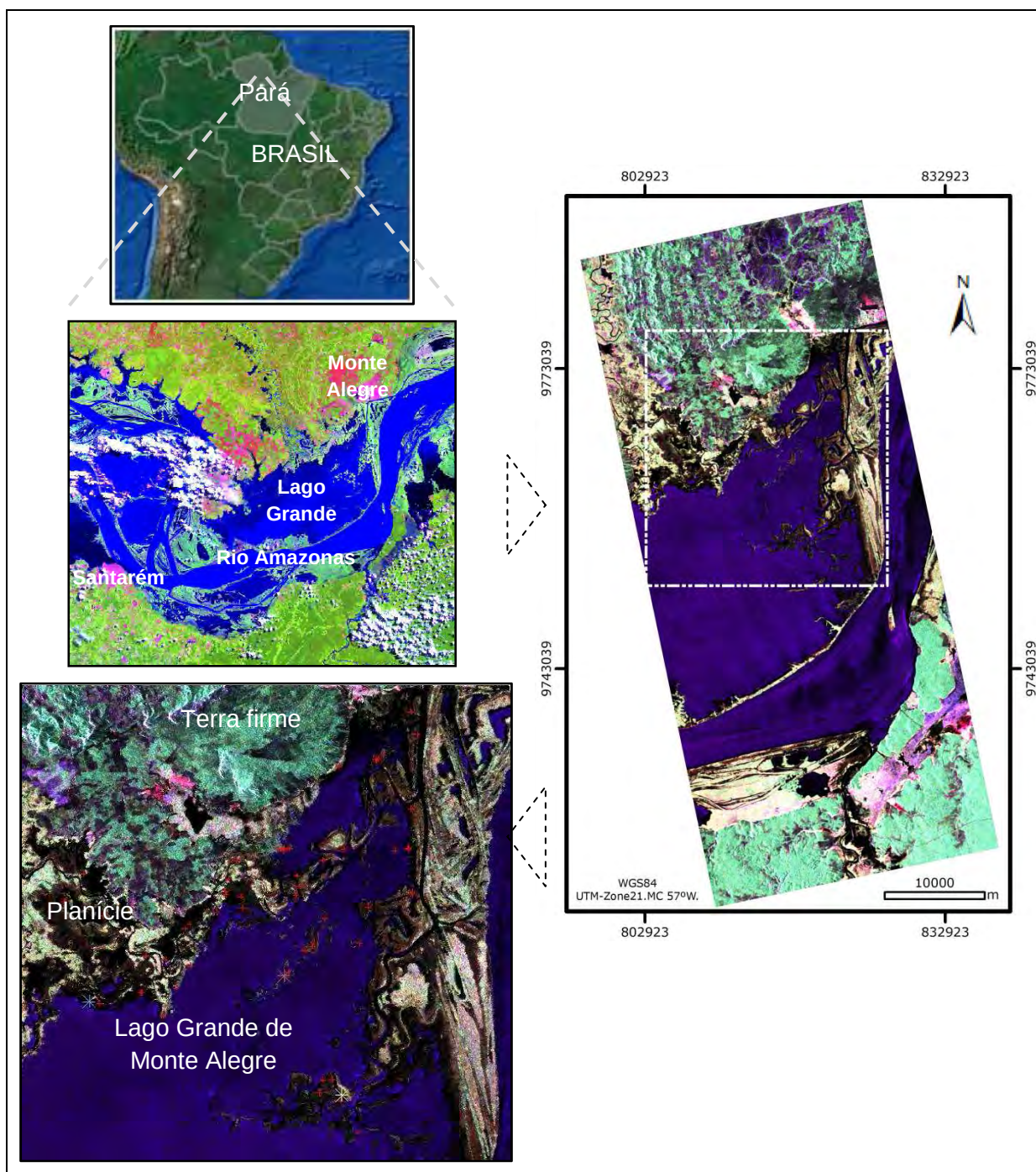


Figura 7. Área de estudo – Imagem Landsat mostrando o Lago Grande de Monte Alegre; Imagem PALSAR (composição colorida das intensidades da matriz de covariância filtrada – HH em R, HV em G e VV em B); Recorte da área de estudos.

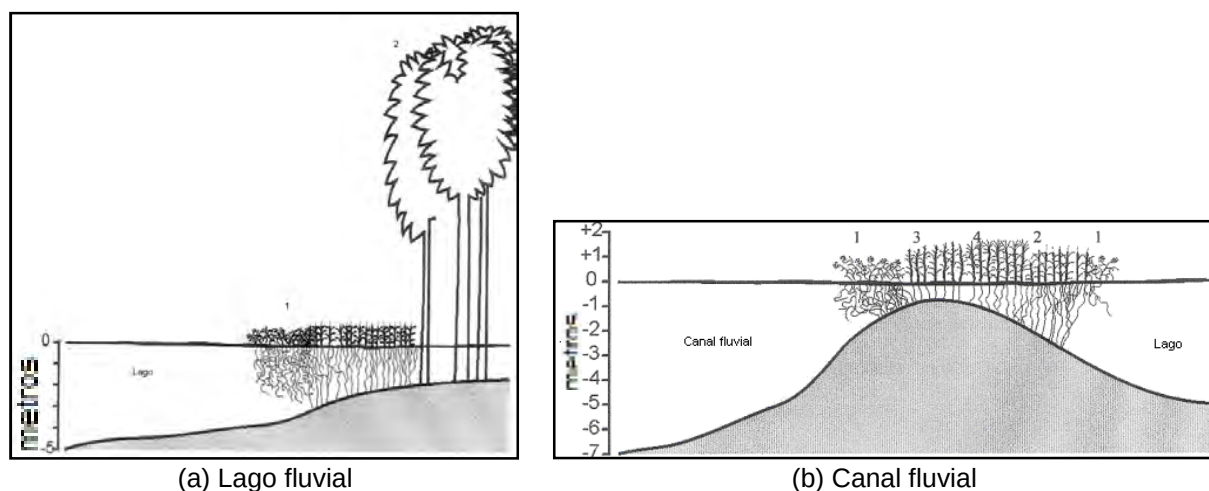
Ao norte da área de estudos existe uma pequena área rural onde parte da floresta inundada foi convertida em pasto. A vegetação predominante no limite norte da planície é savana e vegetação secundária. Ao sul, na época de água

alta, a área de estudo é conectada ao canal principal do Amazonas (COSTA et al., 2002).

As espécies enraizadas emergentes, como *Hymenachne amplexicaulis* e *Echinochloa polystachya*, colonizam a maior parte da margem litoral do lago, onde a profundidade média é aproximadamente $3,5 \pm 0,5$ m durante o período de maio e junho, quando a água é mais alta, degenerando-se em outubro-novembro, no período de estiagem, quando o sedimento fica exposto e novas plantas começam a se desenvolver conforme o nível da água cresce, exibindo um ciclo anual (COSTA, 2000).

A espécie *Paspalum repens* é uma planta aquática emergente que se caracteriza, principalmente, por converter-se de enraizada para flutuante quando o nível da água aumenta, permitindo sua presença na orla externa das populações de vegetação aquática entre as espécies enraizadas e a água aberta do lago. É comum serem levadas pelo vento ou seguir correntes do rio, envelhecendo durante o período de estiagem (COSTA, 2000).

A Figura 8 mostra uma representação esquemática das zonas de distribuição dos tipos de vegetação aquática mais comum em dois ambientes distintos: lago fluvial, equivalente à área de estudos (Figura 8 a) e canal fluvial (Figura 8 b). O lago fluvial é uma região mais protegida onde o gradiente de profundidade é menor. O canal fluvial possui correntes mais fortes, processo de sedimentação e influência direta das águas do Rio Amazonas (COSTA, 2000).



Fonte: Costa (2000).

Como se observa, *Hymenachne amplexicaulis* está presente em áreas mais protegidas dentro do lago, *Echinochloa polystachya* e *Paspalum fasciculatum* ocorrem em áreas onde a influência da água do rio Amazonas é maior, e *Paspalum repens* forma estreitos grupos na orla externa da vegetação aquática nos níveis de água mais profundos.

5.1.1 Dados hidrológicos do Lago Grande de Monte Alegre

Como a maioria da água do Lago Grande de Monte Alegre origina-se do rio Amazonas, foi escolhida a estação de Óbidos, localizada neste rio, para analisar a precipitação e cota. Observa-se que, para os anos de 2004 a 2006, os meses de maior e menor nível da água, respectivamente, foram maio e novembro (Figura 9). Estes correspondem aos três últimos anos que apresentavam dados no *site* da Agência Nacional de Águas (ANA, 2008).

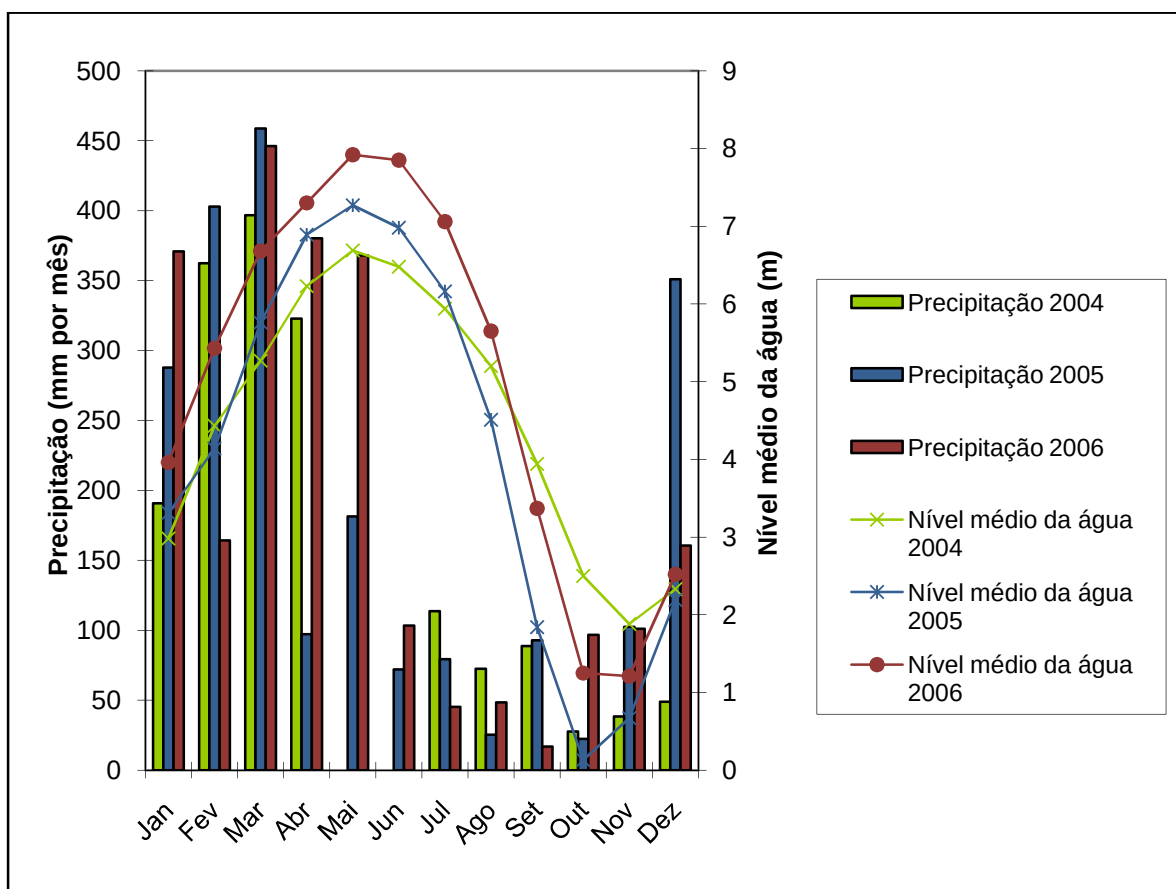


Figura 9. Nível do rio e precipitação na estação de Óbidos.
 FONTE: Agência Nacional de Águas (ANA, 2008).

O padrão de inundação na área de estudo compreende um único pulso de inundação anual, com o aumento das águas de dezembro a junho, e recuo de julho a dezembro. Dada a escala de tempo do pulso de inundação, variações do nível de água por dia são pequenas, exceto em pontos críticos das transições junho-julho e novembro-dezembro.

5.2 Características dos dados PALSAR e modelo digital de elevação

5.2.1 Características dos dados PALSAR

O sensor PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), a bordo do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), é um radar que opera na banda L das microondas (23,61 cm), nos modos fino, ScanSAR e polarimétrico. No modo fino (*Fine Beam Single* – FBS e *Fine Beam Dual* – FBD) são adquiridas imagens com polarização HH (*single*) e HH+HV (*dual*), ângulos de incidência entre 8° a 60° e a faixa imageada está entre 40 e 70 km. No modo de observação ScanSAR são adquiridas imagens com uma larga faixa de observação, de 250 a 350 km, com ângulo de incidência entre 18° e 43°. O modo polarimétrico (PLR) permite gerar imagens com polarizações HH+HV+VV+VH (*quad-pol*), o ângulo de incidência varia entre 8° e 60° e a faixa imageada está entre 20 e 65 km. Algumas características dos quatro modos de aquisição de dados do sensor PALSAR são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Modos default de observação PALSAR.

Modo de imageamento	Polarização	Resolução nominal	Ângulo off-nadir	Órbita	Tamanho da cena (alcance x azimuth)	Cobertura	Frequência de observação
Fine Beam Single (FBS)	HH	10 m	34,3°	Ascendente	70 km x 52-78km		1-2 obs/ano
Fine Beam Dual (FBD)	HH + HV	20 m	34,3°	Ascendente	70 km x 52-78km	Global	1-4 obs/ano
Polarimetric (PLR)	HH + HV + VH + VV	30 m	21,5°	Ascendente	30 km x 64-72km	Regional	2 obs/2 anos
ScanSAR	HH	100 m	20,1°-36,5° (5 beam)	Descendente	350 km x 350 km	(a) Global; (b) Regional	(a) 1 obs/ano; (b) 8 obs/1ano
Fine Beam Dual (FBD)	HH + HV	20 m	49°	Ascendente	70 km x 52-78km	Círculo Ártico	1-3 obs/ano

Fonte: ALOS (2008).

As imagens ALOS/PALSAR são fornecidas em diversos níveis de correção, tanto radiométrica, quanto geométrica (Quadro 2).

Quadro 2. Níveis de processamento dos dados PALSAR.

Nível	Definição
L1.0	Dado de sinal não processado e reconstruído, com coeficientes de correção radiométrica e geométrica anexados, mas não aplicados.
L1.1	Dado complexo em alcance inclinado (<i>Slant range</i>), processado com compressão em alcance e 1 <i>look</i> em azimuth. Não disponível para o modo ScanSAR.
L1.5	Imagem processada em <i>Multilook</i> , projetada para coordenadas cartográficas. Opções: G: Sistemáticamente geocodificada (Imagem com pixels alinhados em relação a trajetória do satélite); R: Sistemáticamente georeferenciada (Imagem com pixels alinhados com a grade da projeção UTM).

Fonte: ALOS (2008).

Todos os modos do PALSAR foram calibrados e validados radiometricamente usando mais de 500 pontos de calibração coletados ao redor do planeta, incluindo dados de alvos da Amazônia. Através da determinação do padrão da antena e calibração polarimétrica, foram realizados os ajustes do modelo radiométrico e geométrico do PALSAR instalado no processador SAR (SIGMA-SAR) (ALOS, 2008).

5.2.2 Modelo digital de elevação

Foi utilizado um modelo digital de elevação para a transformação dos elementos amostrais do datum WGS 84 para o sistema de referência da imagem de radar (*slant range*) e depois para ortorretificar as classificações geradas neste trabalho.

O modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foi gerado a partir do radar interferométrico SIR-C (*Spaceborne Imaging Radar-C*) e possui espaçamento da amostragem de 3 segundos de arco. O arquivo possui extensão .hgt, é um dado inteiro sinalizado 16 bit e as elevações estão em metros referenciadas ao geóide WGS84/EGM96. Foram utilizados os seguintes arquivos SRTM: s2w54.hgt, s3w54.hgt, s2w55.hgt e s3w55.hgt. O site utilizado para fazer *download* foi: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

5.3 Planejamento de campo

O planejamento de campo seguiu a estratégia de aquisição de dados da agência japonesa JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*), a qual é responsável pelo lançamento do satélite ALOS. A coleta da imagem polarimétrica na região amazônica estava prevista para dois ciclos (março e maio) nos anos de 2007 e 2009.

Para a aquisição dos dados desta tese foi escolhido o mês de maio de 2009, por ser menos chuvoso que março. Entretanto, em meados de fevereiro, a JAXA planejou uma mudança no ângulo off-nadir de 21.5° para 23.1°, o que deixava de coletar a imagem da região de interesse. Assim, a aquisição foi antecipada para o mês de março.

O plano com as atividades de campo foi elaborado com uma folga de dias considerando que a chuva ou outros imprevistos pudessem atrasar a coleta.

5.3.1 Aquisição dos dados da área de estudos

A imagem ALOS PALSAR usada foi adquirida dia 25 de março de 2009, no modo PLR (polarimétrico), com ângulo *off-nadir* de 21,5°, órbita ascendente e nível de processamento 1.1 (dado SLC – *single look complex*). O espaçamento em pixel e linha da imagem adquirida é, respectivamente, 9,369 e 3,574 m, e o indicador da cena é ALPSRP168627150, ciclo 26.

Na composição colorida das polarizações VV, HV e HH representadas pelos canais R (*red*), G (*green*) e B (*blue*) – representação de Sinclair ou lexicográfica (Figura 10), a água aberta aparece em magenta escuro, as áreas de vegetação baixa em verde escuro e áreas de vegetação densa em verde claro/cinza.



Figura 10. Imagem PALSAR da área de estudos sobreposta ao *Google Earth*. Aquisição da imagem PALSAR: 25/03/2009. Representação de Sinclair (VV em R, HV em G e HH em B).

A coleta de dados em campo foi realizada nas datas mais próximas possíveis da aquisição da imagem (Abril/2009) para medir as seguintes variáveis morfológicas: altura da haste emergente (L_{haste}), diâmetro da haste emergente ($\text{Diam}_{\text{haste}}$), largura da folha (W_{folha}), comprimento da folha (L_{folha}), número de folhas por haste ($N_{\text{folha/haste}}$) (Figura 11), e número de hastes num quadrado de $0,25 \text{ m}^2$ (N_{ind}) (Figura 12). No total, 65 elementos amostrais foram adquiridos: 41 *P. repens* (PR), 15 *H. amplexicaulis* (HA) e 9 *P. elephantipes* (PE). Para a tomada das medidas, foi selecionada uma haste que representava, aproximadamente, a altura média da população do quadrado de $0,25 \text{ m}^2$. As medidas da folha foram feitas na folha superior desta haste e a medida do diâmetro da haste foi tomada logo abaixo da lígula superior.

Durante a campanha de campo, os pontos amostrais foram escolhidos nos bancos de macrófitas onde havia, predominantemente, somente um tipo de espécie organizada de maneira homogênea.

No Apêndice A é apresentada uma planilha preenchida no campo, a foto do ponto amostral, a foto ao seu norte, leste, sul e oeste.

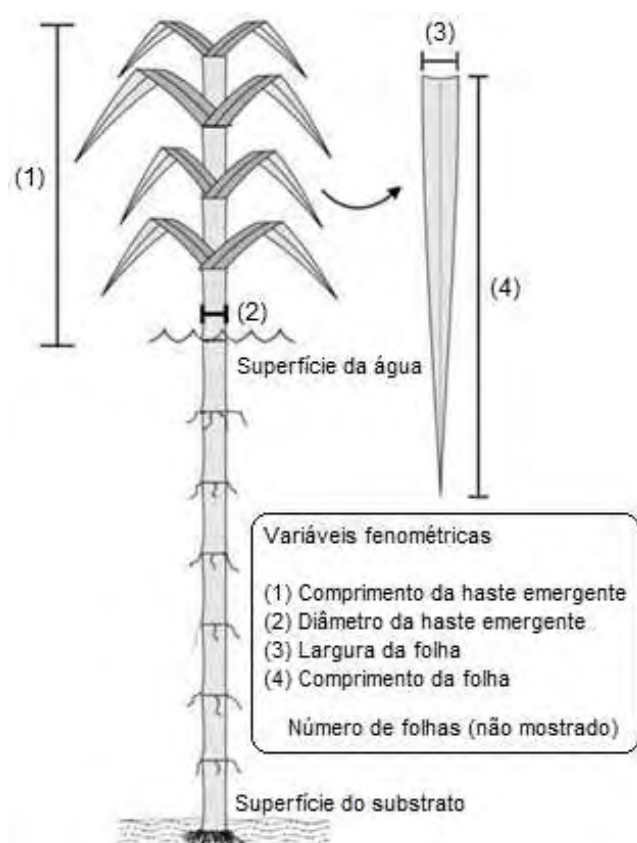


Figura 11. Diagrama mostrando as variáveis morfológicas medidas.
Adaptado de Silva et al. (2010b)



Figura 12. Exemplo de um elemento amostral, mostrando o quadrado usado para delimitar a área de 0,25 m² para a contagem das hastes.

5.3.2 Medidas derivadas a partir das medidas morfológicas de campo

Medidas morfológicas adicionais foram derivadas dos dados de campo originais: volume da haste emergente (V_{haste}), área da folha por haste ($A_{\text{folha/haste}}$), e biomassa individual da planta (B_i). O volume da haste emergente foi determinado como um volume cilíndrico ($V_{\text{haste}} = L_{\text{haste}} \times 0,25 \times \pi \times \text{Diam}_{\text{haste}}^2$), e a área foliar foi determinada como sendo a soma da área de triângulos ($A_{\text{folha/haste}} = \sum_{i=0}^n (0,5 \times L_{\text{folha}} \times W_{\text{folha}})$) (SILVA et al., 2009).

A biomassa vegetal do indivíduo foi estimada para cada elemento amostral usando os modelos fenométricos desenvolvidos por Silva et al. (2009), descritos na Equação (44) para as espécies enraizadas e na Equação (45) especificamente para *Hymenachne amplexicaulis*. Estes modelos foram

desenvolvidos especificamente a partir de plantas que ocorrem no Lago Grande de Monte Alegre:

$$B_i = 0,24 + 0,05 V_{\text{haste}} + 0,01 A_{\text{folha/haste}} \quad (44)$$

$$B_i = 0,55 + 0,07 V_{\text{haste}} \quad (45)$$

em que, B_i = biomassa do indivíduo por haste (g), V_{haste} = volume da haste emergente e $A_{\text{folha/haste}}$ = área foliar por haste. Após o cálculo da biomassa do indivíduo por haste (B_i), foi determinada a biomassa por metro quadrado ($B_{(\text{g}/\text{m}^2)}$) com base na densidade de indivíduos. Assim, $B_{(\text{g}/\text{m}^2)}$ corresponde à multiplicação de B_i pela densidade de hastes por m^2 , ou seja, por 4 vezes o número de hastes no quadrado amostral (N_{ind}).

5.4 Processamento da imagem PALSAR e dos elementos amostrais

A extração dos atributos de radar foi feita com auxílio do *software* PolSARPro. O dado PALSAR recebido (formato CEOS da JAXA: arquivos LED, VOL, TRL e IMG das quatro polarizações) foi importado para o *software* e, em seguida foram extraídos os elementos de Sinclair (matriz de espalhamento).

O fluxograma da Figura 13 apresenta as etapas pelas quais a imagem passou até a geração dos atributos e as etapas para a determinação da média e desvio padrão para cada elemento amostral (50 x 50 m). A matriz de espalhamento foi convertida para a matriz de covariância com uma média espacial de 7x1 pixels (azimute por range, respectivamente). Esta média espacial converte o espaçamento do pixel de 3,59 m em azimute x 9,37 m em range para 25,12 m em azimute x 9,37 metros no alcance inclinado (*slant range*), correspondendo a aproximadamente 25,12 m em azimute x 23,04 m no alcance do terreno (*ground range*) levando em consideração o ângulo de incidência de 21,5° (cálculos apresentados no Apêndice B – Determinação da média espacial 7x1 pixels aplicada na matriz de covariância). A fim de reduzir o *speckle*, a matriz de covariância foi filtrada usando o filtro refinado de Lee, com janela de 3x3 pixels.

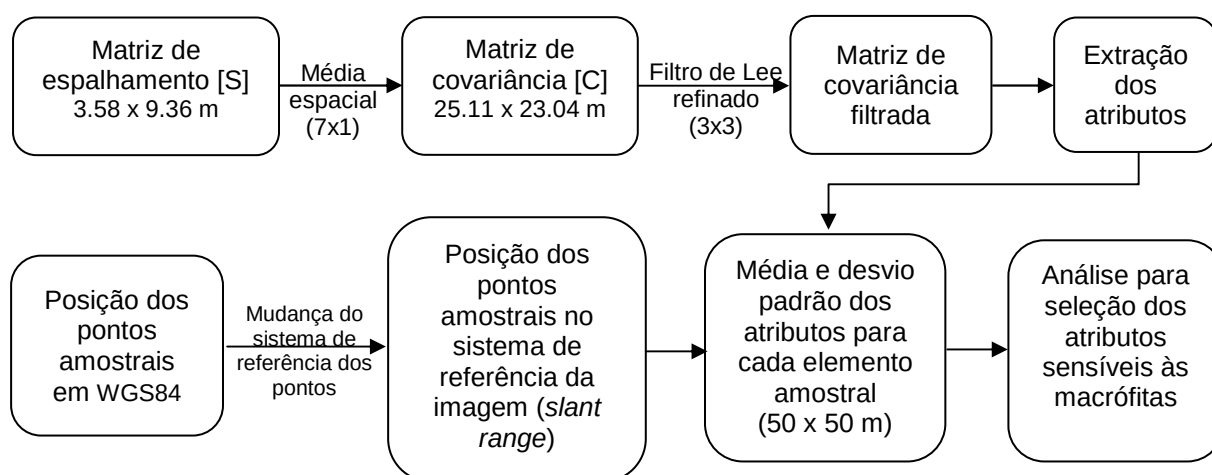


Figura 13. Processamento da imagem PALSAR, extração dos atributos e etapas seguidas para a análise estatística dos elementos amostrais.

A partir da imagem filtrada, os seguintes atributos foram extraídos: sigma zero, span, razão de co-polarização e polarização cruzada, parâmetros de Pope, parâmetros da decomposição de Cloude-Pottier, de Freeman-Durden e de Touzi, a diferença de fase entre HH e VV e a magnitude do coeficiente de correlação cruzada. No total, 34 atributos foram extraídos (Tabela 2).

Já que os atributos extraídos estão no sistema de referência da imagem de radar (*slant range*), os pontos amostrais coletados em campo foram projetados para o mesmo sistema de referência. Preferiu-se fazer a transformação dos pontos ao invés da imagem, para evitar mudanças na parte complexa da imagem SAR, que poderia ocorrer devido ao processo de ortorretificação (alteração da informação de fase devido ao processo de reamostragem). Por esta razão, cada ponto amostral foi projetado do sistema de referência cartográfico (WGS-84) para o sistema da imagem de radar em *slant range* (linha e coluna), baseado no processo de geocodificação inversa (MEIER et al., 1993). Essa transformação foi feita no Sarscape, o qual lê a imagem bruta ALOS/PALSAR e utiliza os dados de efemérides e o modelo digital de elevação (SRTM).

Para avaliar o impacto do erro de co-registro (apresentado no item 6.1), foi verificada a concordância entre feições coletadas em campo e visíveis na imagem: um banco de macrófitas contornado em campo e uma estrada.

As análises dos atributos foram realizadas na área quadrada de 50 m x 50 m, correspondente ao tamanho médio de bancos de macrófitas homogêneos observados em campo. Para cada elemento amostral (50 m x 50 m), a média e

desvio padrão foi computado sobre cada atributo extraído. A diferença de fase entre as polarizações HH e VV foi gerada depois de realizar a média (50 m x 50 m) sobre a matriz de covariância. Uma análise de correlação foi realizada para avaliar a sensibilidade dos atributos de radar às variáveis morfológicas das macrófitas.

A média e desvio padrão dos elementos para cada atributo de radar foram analisados, a fim de identificar os atributos sensíveis às espécies. Outras análises estatísticas foram realizadas como ANOVA (Análise de variância) e análise dos gráficos de espalhamento de cada atributo. A partir dos gráficos de dispersão foram determinados os limites de ocorrência de cada espécie para os atributos identificados com potencial para a discriminação. Os resultados destas análises foram a base para o desenvolvimento das regras aplicadas na classificação baseada em regras.

5.5 Classificações aplicadas na imagem SAR

Além da análise dos atributos para cada elemento amostral, para continuar a avaliação do potencial dos dados polarimétricos na discriminação das espécies de macrófitas, um conjunto de classificações foi aplicado: 1) classificação baseada em regras, 2) classificação não-supervisionada baseada em modelos (Decomposição de Freeman-Durden e de Cloude-Pottier), 3) classificação baseada em estatística (Wishart), e 4) classificação híbrida (Classificação estatística de Wishart com classes de entrada baseadas no plano H/a).

Do total de 65 (41 PR, 15 HA e 9 PE) pontos amostrais coletados em campo, 47 foram separados como áreas de treinamento (31 PR, 10 HA e 6 PE) e 18 como áreas de validação (10 PR, 5 HA e 3 PE).

O ideal seria que tanto o treinamento da classificação supervisionada baseada na estatística de Wishart quanto a validação das classificações fossem realizadas com os elementos amostrais de 50 x 50 m, correspondente ao tamanho médio de bancos de macrófitas homogêneos observados em campo. Este tamanho foi sugerido considerando que um tamanho maior poderia contaminar o elemento com informações diferentes do que aquelas realmente observadas em campo. Entretanto, como se trata de um elemento com

apenas 4 pixels, foi necessário aumentar o tamanho tomando alguns cuidados para o delineamento de polígonos, como o agrupamento apenas de pixels homogêneos. Para isso, cada ponto amostral coletado em campo foi visualizado na composição colorida das intensidades da matriz de covariância (HH em *Red*, HV em *Green*, VV em *Blue*) e foi delimitado um polígono em torno do elemento, levando em consideração: 1) as características espectrais do elemento e dos pixels ao redor, o qual deveria ser similar para ser agregado ao polígono, 2) fotografias tomadas nas direções norte, leste, sul e oeste do elemento amostral durante as campanhas de campo (Apêndice A), e 3) o esboço realizado em campo com as dimensões aproximadas do banco de macrófitas (Apêndice A).

As classificações geradas foram validadas e em seguida ortorretificadas utilizando como modelo digital de elevação o SRTM e como imagem referência a imagem ortorretificada (com dados de efemérides e o SRTM) pelo SARSCAPE. O Apêndice C mostra os elementos utilizados para treinamento e validação e a respectiva quantidade de pixels. O fluxograma da Figura 14 apresenta as etapas para a geração das classificações.

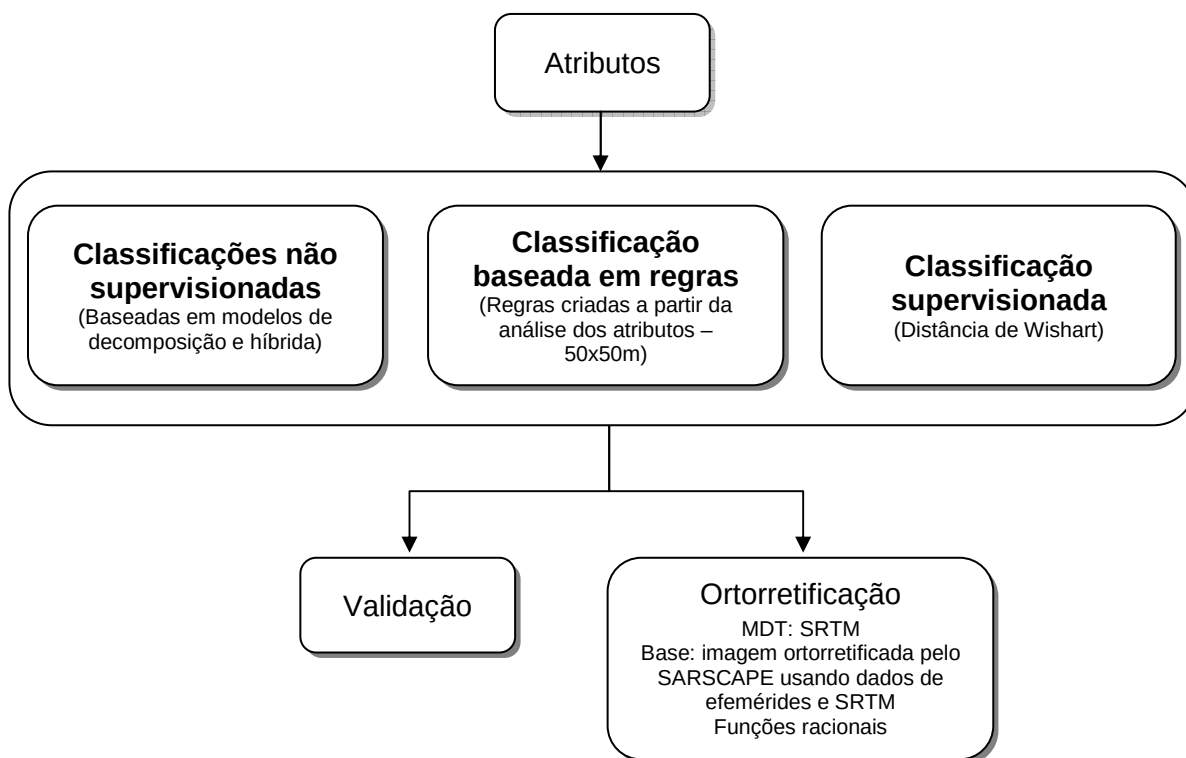


Figura 14. Geração das classificações e ortorretificação.

Na Tabela 3 é apresentada cada uma das classificações realizadas com os respectivos planos de entrada e dados de treinamento. No Apêndice D são mostrados os valores dos atributos calculados na janela de 50 m x 50 m para cada elemento amostral, bem como os valores de média e desvio padrão para cada conjunto de elemento de treinamento e validação, por espécie.

Tabela 3. Planos de entrada e dados de treinamento para as classificações.

Classificação	Planos de entrada	Dados de treinamento
Baseada em regras	Atributos sensíveis à discriminação detectados no item 5.4	Regras baseadas na análise dos atributos na janela de 50 x 50 m
Baseada no modelo de Freeman-Durden	Espalhamento volumétrico, superficial e <i>double-bounce</i>	Não-supervisionada
Baseada no modelo de Cloude-Pottier	H, ângulo alfa	Não-supervisionada
Baseada na estatística de Wishart	Matriz de covariância	Polígonos de treinamento
Híbrida com base no modelo de Cloude-Pottier e na estatística de Wishart	H, ângulo alfa, matriz de covariância	Zonas do plano entropia-ângulo alfa

5.6 Classificação baseada em regras

A classificação baseada em regras foi realizada através da análise orientada a objetos (*Geographic object-based image analysis* - GEOBIA), usando a hierarquia de objetos multi-nível disponível no *software* eCognition (DEFINIENS, 2009). A hierarquia multi-nível foi adotada para reduzir a confusão entre a cobertura de macrófitas e os outros tipos de coberturas, tais como áreas de terra firme e cobertura arbóreo-arbustiva, o que poderia afetar a discriminação entre as espécies. Assim, através da hierarquia multi-nível, antes de discriminar as espécies de macrófitas, foi delimitada a cobertura de macrófitas e a cobertura arbóreo-arbustiva presentes na planície de inundação. Ao invés de planície de inundação, a classe correspondente foi chamada planície inundada, pois para a determinação da primeira é necessária uma análise multitemporal e, neste trabalho, foi feito uma análise de apenas uma data sendo possível, somente, mapear a planície inundada até essa data.

Foram utilizados três níveis (Figura 15), similar à abordagem usada por Silva et al. (2010b): no primeiro nível, a planície inundada foi separada da área

de terra firme e água; no segundo nível, a planície inundada foi separada em macrófitas e cobertura arbóreo-arbustiva inundada; finalmente, no terceiro nível, foram discriminadas as espécies de macrófitas, somente para a área previamente mapeada como macrófitas.

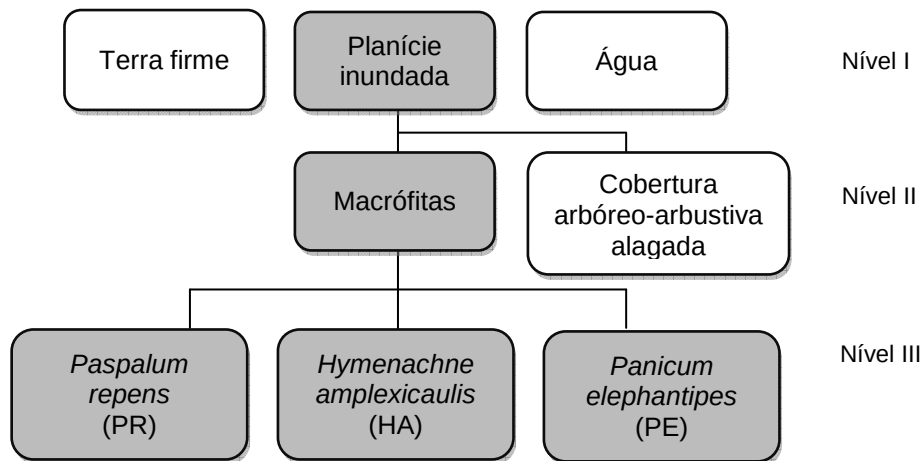


Figura 15. Níveis temáticos definidos para a classificação baseada em regras. Caixas hachuradas indicam as classes de interesse.

5.6.1 Segmentação e criação das classes para a classificação baseada em regras

Os atributos sensíveis à discriminação foram importados para o *software* eCognition. Os atributos com transformação foram importados em sua forma original para depois serem transformados. É o caso, por exemplo, do sigma zero. Isso porque a transformação deve levar em consideração a média do objeto transformado e não a média dos pixels transformados. Além disso, não se pode determinar a média de valores de sigma zero, pois a média é uma medida para dados lineares e o sigma zero é uma medida logarítmica. Assim, para cada imagem de sigma zero ($\sigma_{HH}^0, \sigma_{HV}^0, \sigma_{VV}^0$) foi importado o sigma zero linear ($\sigma_{linHH}^0, \sigma_{linHV}^0, \sigma_{linVV}^0$) e no eCognition gerada a imagem transformada ($\sigma_{HH}^0 = 10 * \log_{10} \sigma_{linHH}^0$), que representa o valor médio transformado de cada objeto.

Após a importação dos atributos, vários foram testados para a segmentação multiresolução e as classes foram criadas. Para a criação das classes foi utilizada principalmente a função *booleana* associada às seguintes características: média dos objetos, desvio padrão dos pixels vizinhos, comprimento por largura, entre outras. Foi utilizada também a função *fuzzy* associada à

característica de relação de borda do objeto aos seus vizinhos (*Class-Related Features > Relations to Neighbor Objects > Rel. Border To*). Esta função *fuzzy* foi utilizada para a classificação dos objetos não classificados no nível I e para a classificação dos objetos de “Macrófita” não discriminados no nível III. Utilizando esta característica, o objeto é categorizado à classe que possui maior contato com ele. Em seguida, foram executadas as classificações.

5.7 Modelagem de uma variável morfológica em função dos atributos de radar

Supõe-se que os atributos da imagem de radar sejam capazes de estimar as variáveis morfológicas das macrófitas. Dentre os 65 elementos amostrais, 55 (35 de PR, 13 de HA e 7 de PE) foram separados para a estimativa do modelo e 10 (6 de PR, 2 de HA e 2 de PE) para a validação

O seguinte conjunto de etapas adotadas por Gonçalves et al. (2011) e Narvaes (2010) foram também utilizadas nessa tese para a modelagem da variável morfológica em função dos atributos de radar (Figura 16):

1. Análise exploratória. Uma análise exploratória dos dados foi feita a fim de identificar a ocorrência de variáveis com maior capacidade para explicar o modelo, ou seja, foram identificados os atributos de radar com maior correlação com a variável morfológica. Também foi verificada a existência da relação linear entre as variáveis independentes e a dependente (Y versus $X_1, \dots, Y$ versus X_{p-1});

2. Seleção das variáveis explicativas. O subconjunto de atributos adequado à modelagem foi selecionado utilizando o algoritmo “*Best subsets*”, o qual procura, automaticamente, pelos melhores subconjuntos segundo um dado critério. O Minitab, por exemplo, identifica os dois melhores subconjuntos para cada número de variáveis do modelo usando o coeficiente de determinação múltipla ajustado (R_{aj}^2). A seleção do subconjunto foi baseada no coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2) e no erro médio quadrático (EMQ), plotados contra as $p - 1$ variáveis explicativas. Durante a seleção das variáveis explicativas, é necessário que o analista intervenha caso deseje manter alguma (tida como importante na análise);

3. Diagnósticos. Para verificar se o modelo atende às suposições exigidas, foram feitas as seguintes verificações:

- a) Normalidade da variável dependente. Seleccionadas as variáveis explicativas do modelo, foi analisada a normalidade da variável dependente e, caso necessário, aplicada a transformação Box-Cox a fim de normalizá-la e aumentar sua correlação com as variáveis explicativas. A normalidade foi testada usando o teste Shapiro-Wilk (SHAPIRO et al., 1968) ao nível de significância de 5% (se p-valor é maior que 0,05, a hipótese nula é aceita e os dados são normais);
- b) Análise exploratória através do gráfico de dispersão de cada variável explicativa versus a variável dependente para verificar o comportamento entre elas;
- c) Normalidade e homocedasticidade dos resíduos. A homocedasticidade foi testada usando o teste de Levene modificado ao nível de significância de 5% (se p-valor é maior que 0,05, a hipótese nula é aceita e, consequentemente, há homocedasticidade entre os grupos testados);
- d) *Outliers* influentes: avaliados pela distância Cook e *DFFITs*;
- e) Termos de interação: os resíduos do modelo de regressão foram plotados contra cada termo de interação e verificado, por análise visual, a ocorrência de padrão sistemático. Caso ocorra, há necessidade de inclusão do termo de interação no modelo;
- f) Multicolinearidade: detectada pelo fator de inflação da variação (VIF) que, se superior a 10 indica que a multicolinearidade pode estar influenciando indevidamente as estimativas dos mínimos quadrados (NETER et al.; 2004);
- g) Autocorrelação espacial: avaliada pelo Diagrama de espalhamento de Moran (ANSELIN, 1996).

4. Validação do modelo. Foi utilizado o critério PRESS (soma dos quadrados dos erros de predição – *prediction error sum of squares*), o qual é uma medida que indica quão bom é o modelo de regressão na predição de novos dados. Para o cálculo do PRESS, é excluída a i -ésima observação e estimada a função de regressão para os $n - 1$ casos restantes. A partir desta estimativa, é predito o valor da observação excluída. É repetido este procedimento para as n observações, sendo feita a exclusão uma observação de cada vez. O PRESS é dado pela soma quadrática dos n erros de predição. O cálculo do PRESS é comparado do SQR do modelo (em que as n observações são consideradas). Segundo Neter et al. (2004),

se o PRESS é próximo de SQR (soma dos quadrados dos resíduos), o MSE (*mean square error*) pode ser considerado um indicador da capacidade preditiva do modelo, ou seja, um estimador do desvio padrão. Além do critério PRESS foi utilizado um conjunto de observações reservadas para a validação. Os valores observados foram comparados aos valores preditos apresentados com o intervalo de 95% de confiança.

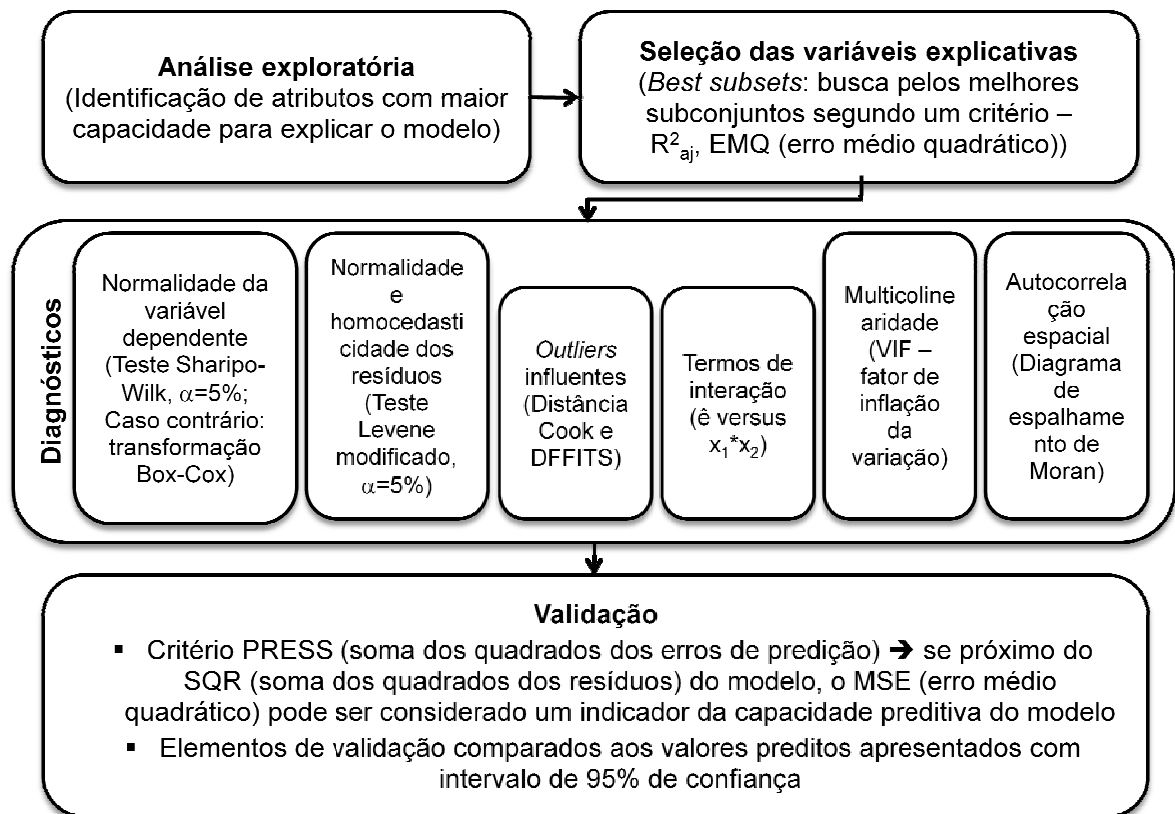


Figura 16. Fluxograma seguido para a modelagem da variável morfológica.

Capítulo 6 - Resultados e discussões

6.1 Avaliação do erro de co-registro dos dados de campo

Para avaliar o impacto do erro de co-registro, foi verificada a concordância de um banco de macrófitas contornado em campo e uma estrada e as respectivas feições na imagem. A concordância visual entre as feições localizadas no campo e na imagem revelou o deslocamento de aproximadamente um pixel no eixo y que pode ser atribuído a um erro introduzido pelo posicionamento por ponto obtido com receptor GPS de uma frequência ou durante a transformação de geocodificação dos pontos. Entretanto, como o erro é sistemático, os pontos coletados em campo foram deslocados em um pixel para cima (eixo y), como forma de correção, depois de transformados para o sistema da imagem em *slant range*. As duas feições contornadas em campo, corrigidas, são apresentadas na Figura 17.

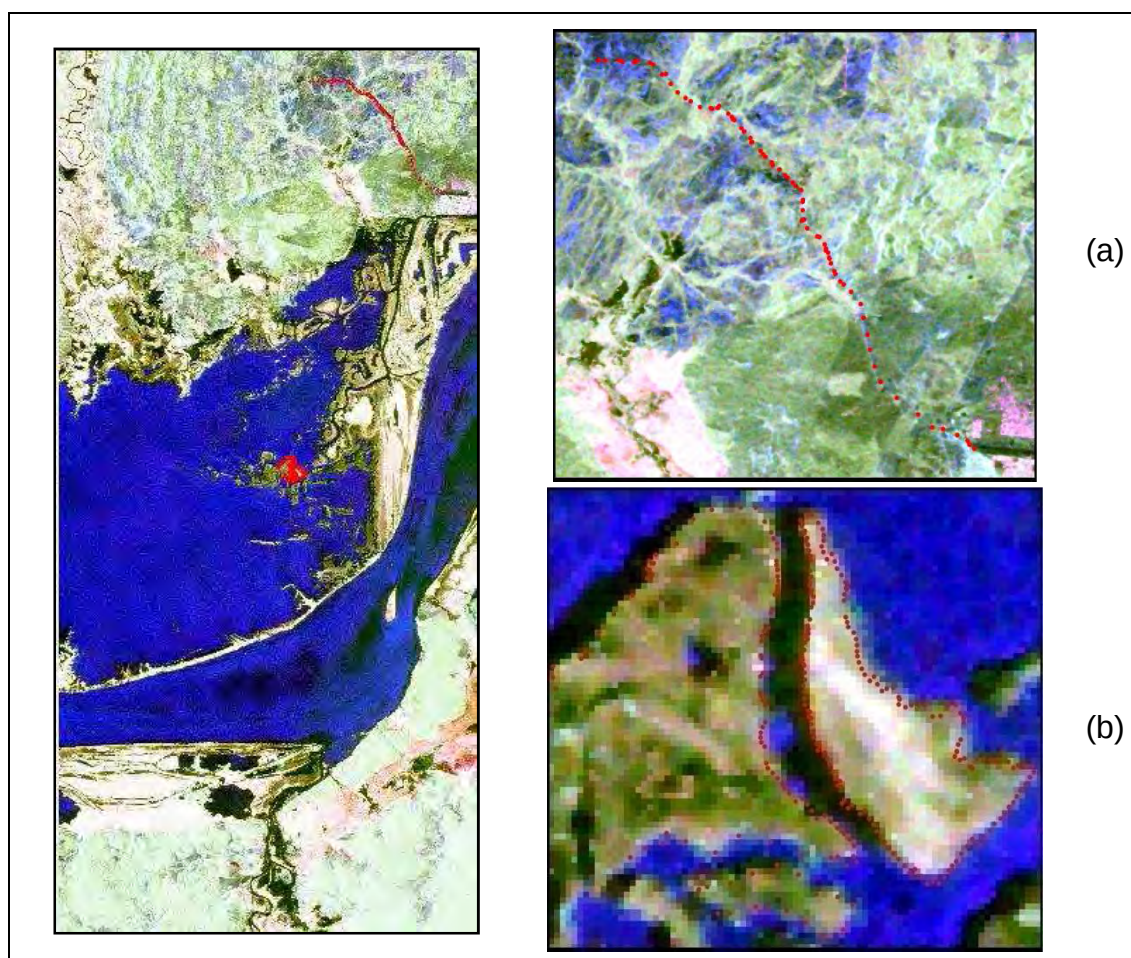


Figura 17. Representação de Pauli e os pontos transformados para o sistema da imagem em *slant range*. (a) Pontos de uma estrada; (b) pontos do contorno de bancos de macrófitas.

É difícil quantificar o erro de posicionamento, já que não havia pontos de controle na região, tais como refletores de canto, cruzamento de rodovias ou construções. Entretanto, a Figura 17 permite verificar uma concordância satisfatória entre os pontos GPS e as feições.

6.2 Descrição das espécies de macrófitas

As principais espécies encontradas na área de estudos foram *P. repens* (n=41), *H. amplexicaulis* (n=15) e *P. elephantipes* (n=9), que serão chamadas, respectivamente, de PR, HA e PE. Uma amostra individual de cada espécie de macrófita foi selecionada a fim de mostrar as fotografias tomadas em campo (Figura 18).

Durante a campanha de campo, as observações foram feitas nos bancos de macrófitas somente onde havia, predominantemente, um único tipo de espécie. Portanto, os pontos foram representativos de áreas maiores do que a resolução de radar e poderiam ser extrapolados para a dimensão de 50m x 50m (janela usada para calcular a média e desvio padrão dos atributos para cada elemento amostral).

P. repens foi caracterizada por alta densidade de hastes ($N_{\text{haste}}/\text{m}^2 = 112 \text{ hastes}/\text{m}^2$), com comprimento da haste emergente (L_{haste}) de 53 cm e largura (W_{haste}) de 1 cm de diâmetro. Esta configuração resultou numa área muito reduzida de superfície exposta da água. *P. amplexicaulis* também exibiu altos valores de densidade, com comprimento da haste similar à espécie anterior ($L_{\text{haste}} = 59 \text{ cm}$), mas diâmetro mais fino ($\text{Diam}_{\text{haste}} = 0,68 \text{ cm}$). As hastes estavam inclinadas na extremidade, provavelmente devido à razão *comprimento da haste/diâmetro*. *P. elephantipes* apresentou a menor densidade de hastes ($N_{\text{haste}}/\text{m}^2 = 44 \text{ hastes}/\text{m}^2$) e os menores comprimentos das hastes ($L_{\text{haste}} = 32 \text{ cm}$), o que levou aos menores valores de biomassa e a áreas significativamente expostas da superfície da água. Todas as três espécies tiveram números similares de folhas por haste (4 a 5 folhas). A área foliar total ($A_{\text{folha/haste}}$) e biomassa por metro quadrado ($B_{(\text{g}/\text{m}^2)}$) apresentaram mais altos valores para *P. repens*, seguido pelas espécies *H. amplexicaulis* e *P. elephantipes* (Tabela 4).



Paspalum repens - PR



Hymenachne amplexicaulis - HA



Panicum elephantipes - PE

Figura 18. Fotografias das espécies de macrófitas encontradas no Lago Grande de Monte Alegre.

Tabela 4. Variáveis morfológicas das macrófitas.

	Variáveis da haste medidas em campo			Variáveis da folha medidas em campo			Medidas morfológicas adicionais derivadas		
	N_{haste}/m^2	$L_{\text{haste}} \text{ (cm)}$	$Diam_{\text{haste}} \text{ (cm)}$	N_{folha}/m^2	$W_{\text{folha}} \text{ (cm)}$	$L_{\text{folha}} \text{ (cm)}$	$V_{\text{haste}} \text{ (cm}^3\text{)}$	$A_{\text{folha/haste}} \text{ (cm}^2\text{)}$	$B \text{ (g/m}^2\text{)}$
PR	112,3±53,7	53,6±15,9	1±0,27	592±303,8	42,4±13,2	2±0,5	47,5±29,4	254,7±160	560,6±401,4
HA	124±58,6	59,8±25,7	0,68±0,25	568±381	25,7±6,7	2,5±0,37	28,2±32,6	147±81,5	334,4±327,4
PE	44,4±35,4	32,8±13,4	1±0,22	202±173	28,8±5,8	1,8±0,5	30,8±14,4	112±40	147,7±165,3

6.3 Análise dos atributos polarimétricos

Já que *P. repens* e *H. amplexicaulis* tiveram características morfológicas similares, os atributos polarimétricos derivados foram também similares, com poucas diferenças. Para ambas as espécies, a polarização linear horizontal (σ_{HH}^0) mostrou valores mais altos que a vertical (σ_{VV}^0), provavelmente devido à influência das folhas que ocorrem predominantemente na horizontal (Tabela 5). Devido à absorção das microondas pela alta biomassa foliar fresca destas duas espécies, o valor do atributo BMI foi baixo (0,05). A interação das microondas com a densa copa destas duas espécies resultou, predominantemente, no tipo de espalhamento volumétrico, como pode ser confirmado pelo ângulo alfa médio (α_m) próximo de 45° (Tabela 6). Touzi apresentou resultados semelhantes para vegetação aquática (*marsh vegetation*) caracterizada por água persistente ou periódica onde a vegetação é dominada por gramínea, arbustos e plantas emergente (TOUZI et al., 2009). A alta entropia ($H > 0,7$) e a baixa anisotropia indicaram a ocorrência do espalhamento aleatório, ou seja, além do mecanismo de espalhamento dominante (volumétrico), ocorre também os mecanismos de espalhamento superficial e espalhamento *double-bounce*. A decomposição de Freeman-Durden (Tabela 6) que indica a proporção destes três mecanismos de espalhamento, também mostra o espalhamento volumétrico como dominante, com contribuições similares de espalhamento superficial e *double-bounce*. Tal dominância, mesmo em face da mais alta capacidade da banda L em penetrar a copa da vegetação, pode ser atribuída aos altos valores de densidade e biomassa observados neste estudo. Os valores de biomassa apresentados na literatura para as macrófitas emergentes da Amazônia podem ser ainda maior, da ordem de 1 a 4 kg de biomassa seca por metro quadrado acima da superfície da água (SILVA et al., 2009). Os menores valores obtidos neste estudo ocorrem, provavelmente, devido à época da coleta dos dados que foi antes do pico de crescimento (Junho-Julho).

Nas três espécies ocorre, mesmo que pequena, uma contribuição do *double-bounce* que está associado ao fato de que, apesar das hastes serem finas, uma ao lado da outra, formam uma superficial diedral. As espécies apresentaram uma distribuição uniforme, ou seja, cada banco de macrófita era homogêneo, explicando os valores de helicidade média (τ_m) próximos de zero e indicando espalhamento simétrico (Tabela 8). O mesmo foi observado para vegetação

aquática por Touzi et al. (2009). Já que $\tau_m = 0$, o alfa de Cloude-Pottier e de Touzi são similares ($\alpha_m = \alpha_{sm}$), como mostrado na Tabela 6 e Tabela 7. O espalhamento dominante também apresentou valores de helicidade próximos de zero para todas as espécies ($\alpha_{s1} = 0$).

Duas diferenças foram observadas entre *P. repens* e *H. amplexicaulis*, nos valores de sigma-zero HV e no ângulo de orientação do espalhamento dominante (ψ_{t1}). O retorno de radar de polarização cruzada (σ_{HV}^0) foi maior para *P. repens*, um resultado por causa da maior biomassa destas espécies. Este maior retorno ocorre devido às várias interações das microondas com as hastes e folhas levando à despolarização das microondas e, conseqüentemente aos maiores valores de σ_{HV}^0 .

O ângulo de orientação do espalhamento dominante (ψ_{t1}) apresentou um alto desvio padrão para *P. repens* e *P. elephantipes* e, já que este atributo fornece uma medida intrínseca do ângulo de orientação do alvo, uma possível interpretação é que os espalhadores são altamente orientados num banco individual de macrófitas, mas que esta orientação varia consideravelmente de um banco para outro. Por outro lado, *H. amplexicaulis* apresentou um menor desvio padrão do que as outras duas espécies e, já que o sigma zero HH foi maior que VV, isso sugere uma configuração uniforme de espalhadores orientados horizontalmente.

Para *P. elephantipes*, a qual apresentou a menor densidade entre as espécies, as microondas interagiram não somente com a copa, hastes e folhas, mas também com a água. Isso resultou em valores de CSI maiores (0,48) do que para as outras espécies, indicando que a estrutura é, predominantemente, vertical. O maior valor de CSI observado para *P. elephantipes* não significa que suas hastes são mais verticais do que as das outras espécies, mas que, devido à sua menor densidade, a estrutura vertical é melhor registrada pelo sensor. A baixa densidade de *P. elephantipes* (44 hastes por m²) também conduz aos menores valores de VSI (0,18), enquanto que para as outras espécies, densidade e VSI foram, aproximadamente, 120 hastes por m² e 0,22, respectivamente. A configuração espacial de *P. elephantipes* também favoreceu a ocorrência do espalhamento superficial confirmado pelo valor do ângulo alfa médio próximo de 30° (Tabela 6). Além disso, a decomposição de Freeman-Durden mostra que o primeiro mecanismo de

espalhamento (superficial) apresentou quase a mesma contribuição que o segundo, ou seja, o espalhamento volumétrico ($P_V \cong P_S \cong -14\text{dB}$).

Tabela 5. Atributos derivados da magnitude do retroespalhamento para as espécies de macrófitas estudadas (PR: *P. repens*, HA: *H. amplexicaulis*, PE: *P. elephantipes*).

	Sigma zero (dB)			Razão de polarização (dB)			Span (dB)	Índices de Pope		
	σ_{HH}^0	σ_{HV}^0	σ_{VV}^0	$\frac{\sigma_{linHH}^0}{\sigma_{linHV}^0}$	$\frac{\sigma_{linVV}^0}{\sigma_{linHH}^0}$	$\frac{\sigma_{linVV}^0}{\sigma_{linHV}^0}$		BMI	CSI	VSI
PR	-10±2,3	-16,9±2,9	-13,8±2,1	9,92±1,54	-3,77±2	6,15±2,7	-7,92±2	0,07±0,03	0,3±0,1	0,22±0,06
HA	-13,2±4,5	-20±4,6	-17,1±3,6	9,7±1,6	-3,8±1,9	5,9±1,9	-11,1±4,2	0,05±0,05	0,29±0,09	0,23±0,06
PE	-12,3±1,2	-20,2±3,6	-12,7±2,4	10,8±4,1	-0,42±1,8	10,4±5,6	-9±1,5	0,06±0,02	0,48±0,1	0,18±0,11

Tabela 6. Atributos derivados da fase do retroespalhamento para as espécies de macrófitas estudadas: decomposições de Cloude-Pottier e de Freeman-Durden, magnitude e fase da correlação complexa cruzada.

	Cloude-Pottier			Freeman-Durden (dB)			CCC	
	α_m (°)	H	A	P_D	P_S	P_V	γ	$\phi_{HH} - \phi_{VV}$ (°)
PR	42,6±8,4	0,72±0,09	0,32±0,1	-18,2±3,1	-16,5±4	-10,5±3,2	0,46±0,12	-54,2
HA	44,5±3,3	0,75±0,07	0,34±0,1	-19,6±2,3	-18±2,9	-13,8±4,9	0,48±0,15	-67,4
PE	31,3±15	0,62±0,25	0,39±0,1	-19,7±1,9	-14,5±5,4	-14,2±3,7	0,43±0,14	-42,5

Tabela 7. Atributos derivados da fase do retroespalhamento para as espécies de macrófitas estudadas: magnitude (α_s) e fase (ϕ_{α_s}) da decomposição de Touzi.

	Parâmetros de Touzi							
	α_{s1} (°)	$\phi_{\alpha s1}$ (°)	α_{s2} (°)	$\phi_{\alpha s2}$ (°)	α_{s3} (°)	$\phi_{\alpha s3}$ (°)	α_{sm} (°)	$\phi_{\alpha sm}$ (°)
PR	31,5±12,1	-9,21±15,2	57±9,5	6,9±17,6	68±9	1,2±27	40±8,9	-4,5±8,8
HA	32,6±8	-9,9±13,2	56,2±7	7,2±16	69,7±10,8	4±25,7	42±4	-3,7±6,7
PE	16,5±12,8	-19±17,9	64,9±14,7	15,5±17,7	64,9±14,7	-3,5±24	27±13,4	-10,9±9,9

Tabela 8. Atributos derivados da fase do retroespalhamento para as macrófitas estudadas: helicidade (τ) e ângulo de orientação (ψ_t) da decomposição de Touzi.

	Parâmetros de Touzi							
	τ_1 (°)	ψ_{t1} (°)	τ_2 (°)	ψ_{t2} (°)	τ_3 (°)	ψ_{t3} (°)	τ_m (°)	ψ_{tm} (°)
PR	-0,48±2,1	-3,12±19,1	3,26±11,8	2,21±47,3	0,75±13,9	-2,9±43,8	0,3±2,7	-3±16,5
HA	-0,4±2,8	2,5±4,7	-2,19±9,8	-5,52±48,3	3,28±16,4	-9±38,5	-0,56±2	-0,49±10,5
PE	0,37±1	4,4±33,4	-0,23±20,2	-14,2±41	-3,48±23,6	-19,7±38	-1±4	-6,8±28,9

Em síntese, os atributos foram sensíveis à organização da planta, permitindo a descrição sobre densidade, orientação predominante, biomassa, homogeneidade do banco, entre outros. Alguns atributos se mostraram similares (BMI , H , P_D , τ_1), outros mostraram ser possível separar *P. elephantipes* ($\sigma_{linVV}^0/\sigma_{linHH}^0$ e $\sigma_{linVV}^0/\sigma_{linHV}^0$, CSI , VSI , α_m , P_S , $\phi_{\alpha s1}$, α_{s1} , α_{sm}), *H. amplexicaulis* (σ_{VV}^0) e *P. repens* (σ_{HV}^0 , P_V).

A próxima etapa é, então, identificar quais atributos possuem potencial para discriminar as espécies de macrófitas e qual o intervalo de cada atributo para a discriminação.

6.4 Identificação dos atributos e intervalos com potencial para a discriminação entre as macrófitas

A partir da análise de variância (ANOVA), três atributos com distribuição normal para cada uma das três classes de macrófitas e variância constante (homocedasticidade) entre as classes foram selecionados por permitirem discriminação ao nível de 10% de significância. Para a normalidade e homocedasticidade foram usados os testes Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, ao nível de 5% de significância.

Os três atributos selecionados por ANOVA foram: 1) o índice de Pope CSI que permitiu discriminar PE das outras duas, 2) o sigma zero VV que discriminou HA das outras e, por último, 3) o sigma zero de HV ou o espalhamento volumétrico (P_v), os quais possuem informação redundante e permitiram discriminar PR.

Os atributos selecionados por ANOVA passaram pela transformação BoxCox a fim de satisfazer a suposição de normalidade de cada classe e homocedasticidade entre as classes.

Tabela 9. Atributos selecionados por ANOVA para a discriminação entre as espécies, melhor λ determinado por Box-Cox para normalizar o atributo, p-valor para os testes de normalidade e homocedasticidade antes e depois da transformação Box-cox.

Antes da transformação										Depois da transformação				
Var	Teste normalidade (p-valor)			Teste homoc. (p-valor)	Var. transf. (λ)	Teste normalidade (p-valor)			Teste homoc. (p-valor)					
	PR	HA	PE			PR	HA	PE						
CSI	0.0000	0.76	0.37	0.903	CSI ⁻¹	0.070	0.125	0.212	0.129					
σ_{VV}^0	0.12	0.15	0.95	0.066	$\sigma_{VV}^0 \wedge 0,7$	0.055	0.096	0.922	0.126					
σ_{HV}^0	0.007	0.19	0.62	0.009	$\sigma_{HV}^0 \wedge -0,5$	0.324	0.094	0.439	0.061					
P_v	0.006	0.14	0.77	0.014	$P_v \wedge 0,28$	0.087	0.099	0.629	0.063					

Após a aplicação da ANOVA, foi utilizado o teste Tukey (Tabela 10) para examinar se haviam diferenças entre as classes de cada dupla. Foi escolhida a

desigualdade de Tukey devido ao fato de que as amostras possuem quantidades diferentes de observações.

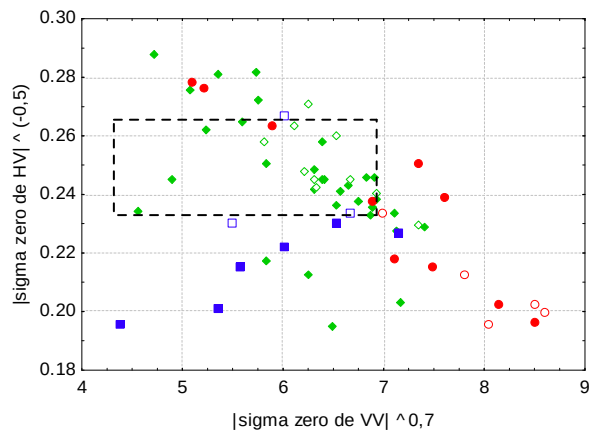
Tabela 10. Atributos selecionados por ANOVA para a discriminação entre as espécies, p-valor do teste Tukey entre as classes, classe que o atributo melhor discrimina.

Atributo transformado	Teste de Tukey (p-valor)			Potencial para separar
	PR x HA	PR x PE	HA x PE	
CSI^{-1}	>0,06	0,011	0,0078	PE
$\sigma_{VV}^0 \wedge 0,7$	0,0079	>0,06	0,0052	HA
$\sigma_{HV}^0 \wedge -0,5$	0,06	0,049	>0,06	PR
$P_V \wedge 0,28$	0,063	0,045	>0,06	PR

Embora os atributos da Tabela 10 fossem determinantes para a discriminação entre as três espécies, eles não foram suficientes e recorreu-se à análise dos gráficos de dispersão dos atributos para complementar a discriminação.

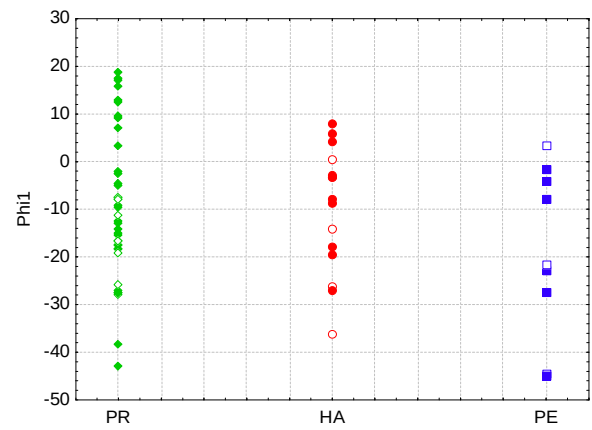
No total, foram identificados nove atributos com potencial para a discriminação. Observe na Figura 19 os retângulos em linha pontilhada, os quais representam os intervalos em que ocorre cada espécie a partir dos gráficos de dispersão dos atributos.

Conforme Touzi et al. (2007), dentre os parâmetros de Touzi, a informação fornecida pela fase do tipo de espalhamento simétrico (ϕ_{α_1}) pode ser usada para melhorar a caracterização das espécies de vegetação de áreas alagáveis, como a discriminação entre “*shrub bog*” (arbusto de uma área alagável rasa e parada) de “*sedge fen*” (macrófitas de uma área alagável com maior troca de água). Assim sendo, o gráfico de espalhamento desse parâmetro foi utilizado para a separação entre as espécies. Como esse parâmetro só pode ser analisado sob condições de coerência, foi utilizada apenas a fase do primeiro espalhamento, cuja coerência espera-se que seja a maior.



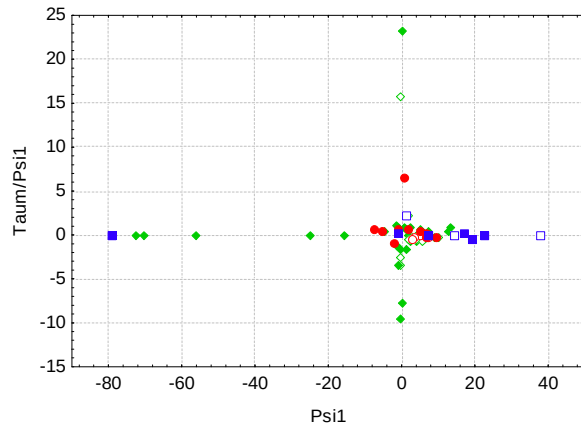
Intervalo de $|\sigma_{HV}^0|^{-0,5}$ com PR: 0,23 : 0,263
Intervalo de $|\sigma_{VV}^0|^{0,7}$ com PR: 4,28 : 6,96

(a) PR



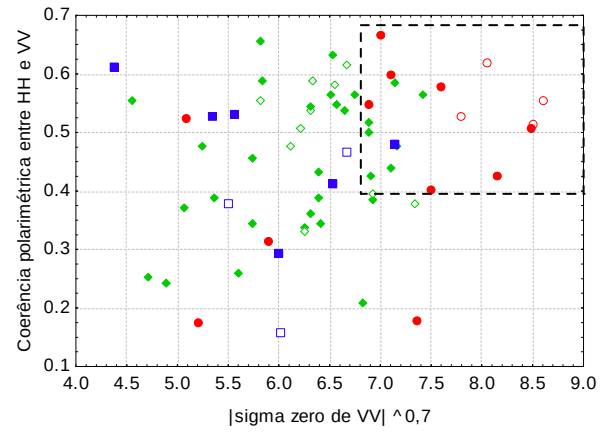
Intervalo de ϕ_1 com PR: 8,5 : 20

(b) PR



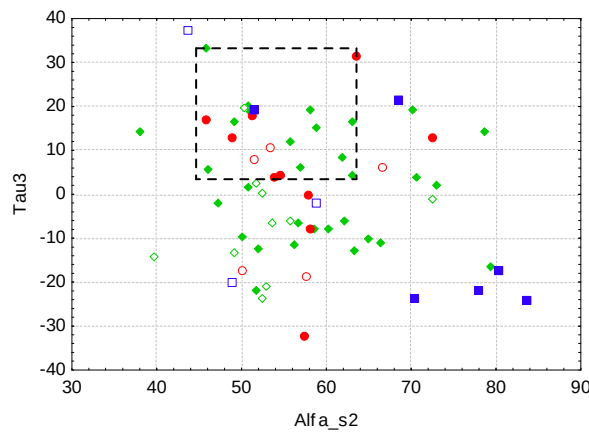
Intervalo da razão τ_m/ψ_{t1} com PR: -10 : -1,15
Intervalo ψ_{t1} com PR: -74 : -13

(c) PR



Intervalo de $|\sigma_{VV}^0|^{0,7}$ com HA: 6,7 : 9
Intervalo de γ com HA: 0,4 : 0,67

(d) HA



Intervalo de α_{s2} com HA: 45 : 62
Intervalo de τ_3 com HA: 3,9 : 33

(e) HA

- ◆ PR - Treinamento
- ◇ PR - Validação
- HA - Treinamento
- HA - Validação
- PE - Treinamento
- PE - Validação

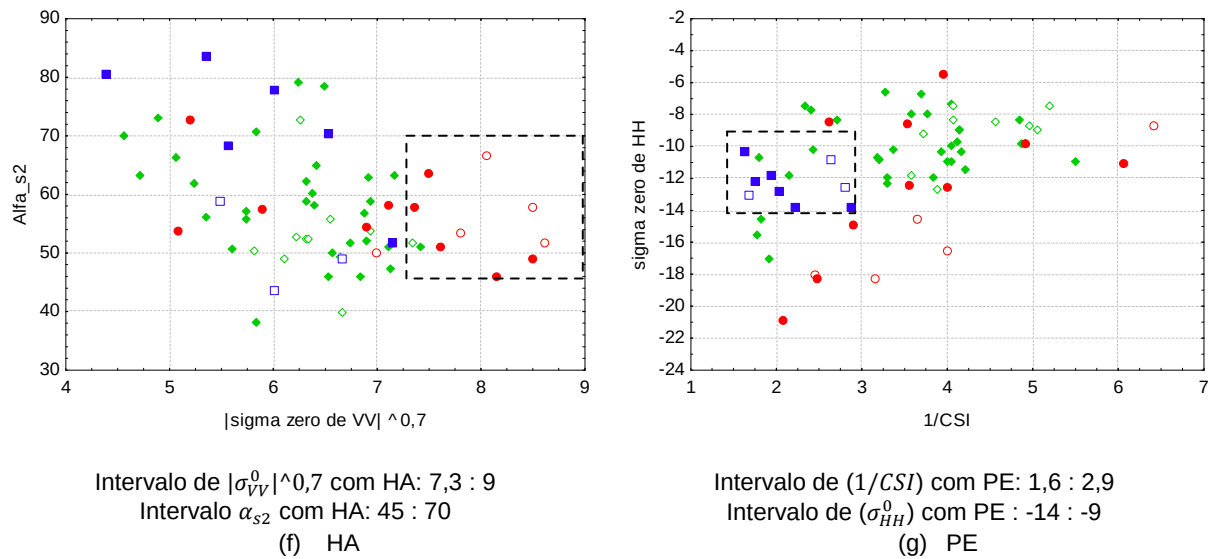


Figura 19. Atributos usados para a discriminação entre as espécies

Os resultados apresentados até aqui sugerem que os atributos σ_{HH}^0 , σ_{VH}^0 , σ_{VV}^0 , CSI , γ , τ_3 , α_{s2} , ϕ_{as1} e ψ_{t1} derivados dos dados SAR polarimétricos da banda L possuem potencial para discriminar as espécies de macrófitas da planície de inundação da Amazônia, bem como estimar características morfológicas das plantas. Para testar esta hipótese, um conjunto de atributos polarimétricos (Tabela 11) foi utilizado como entrada para a classificação baseada em regras, a qual foi realizada através da análise orientada a objetos (AOO). A AOO ajuda a diminuir a confusão entre as classes já que, durante a segmentação multiresolução, além da informação espectral, leva em consideração a informação espacial, ou seja, de contexto.

Tabela 11. Atributos sensíveis à discriminação das espécies de macrófitas.

Espécie de macrófita	Atributo
<i>P. repens</i>	$\sigma_{HV}^0, \sigma_{VV}^0, \phi_{as1}, \psi_{t1}$
<i>H. amplexicaulis</i>	$\sigma_{VV}^0, \gamma, \tau_3, \alpha_{s2}$
<i>P. elephantipes</i>	σ_{HH}^0, CSI

6.5 Classificação baseada em regras: parâmetros da segmentação e classificação

Antes de discriminar as espécies de macrófitas, foi delimitada a cobertura de macrófitas e a cobertura arbóreo-arbustiva presentes na planície inundada. A delimitação destas coberturas corresponde ao segundo nível da

classificação. Para a definição das classes deste nível foram utilizados os atributos e os intervalos explicados no próximo sub-item (6.5.1)

Para a definição das classes do primeiro nível foram utilizados atributos com diferenças espectrais entre as três classes de interesse. Para as classes do terceiro nível foram utilizados os atributos e os intervalos definidos no item 6.4.

6.5.1 Separação entre a cobertura de macrófitas e a cobertura arbóreo-arbustiva alagada

Além de elementos amostrais de macrófitas, foram coletados no campo alguns elementos amostrais da cobertura arbóreo-arbustiva alagada. Em muitos atributos, os valores de ambos se confundem com a resposta das macrófitas. Já que isso ocorre, a área de macrófitas foi delimitada buscando eliminar esses pontos. Os melhores atributos para isso, selecionados pela análise dos gráficos de dispersão, foram (Figura 20): entropia (H) e sigma zero de HV.

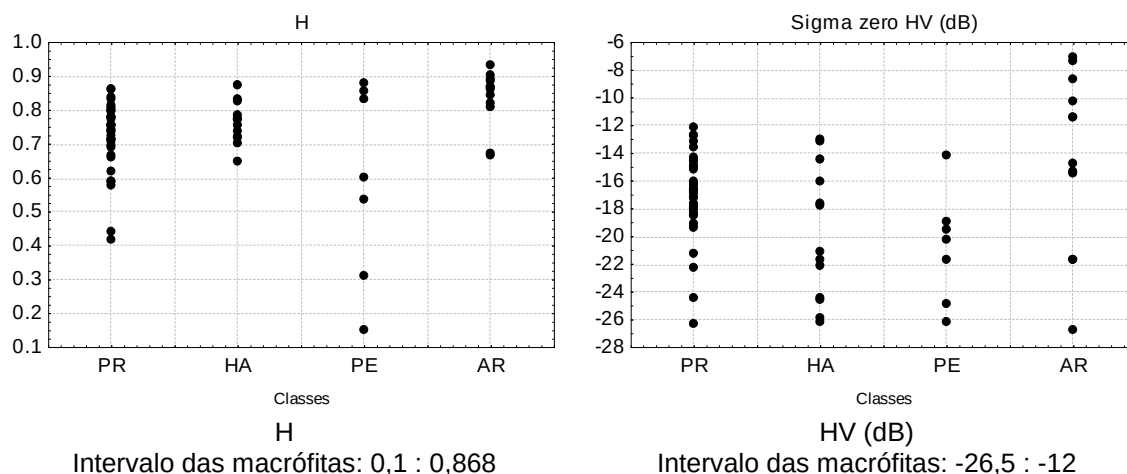


Figura 20. Atributos com potencial para delimitar a área de macrófitas e os respectivos intervalos da delimitação. AR = cobertura arbóreo-arbustiva alagada

Observe que a entropia da maioria dos elementos da cobertura arbóreo-arbustiva se concentra em valores entre 0,7 e 0,95 (o que indica mecanismos de espalhamento aleatórios), enquanto que para as macrófitas os valores vão de 0,15 a 0,9.

O sigma zero HV da cobertura arbóreo-arbustiva é maior que o das macrófitas, indicando que ocorrem múltiplos espalhamentos dentro da copa das árvores.

Para limitar ao máximo a área de macrófitas, foram utilizados os dois atributos (sigma zero HV e entropia) com a condição de pertencer à classe macrófita o elemento que ocorra nos dois intervalos (de macrófitas) simultaneamente.

6.5.2 Parâmetros da segmentação e regras para a classificação

Neste item são apresentados os parâmetros da segmentação e as regras para a classificação orientada a objetos. Após a segmentação e a especificação das regras, a classificação foi executada e validada.

Após vários testes, foram definidos os parâmetros para a segmentação multiresolução com três níveis de segmentos (níveis espaciais) (Tabela 12). Os objetivos dos três níveis, respectivamente, foram: 1) gerar os segmentos dos canais mais largos e de algumas áreas de terra firme; 2) gerar os segmentos correspondentes aos níveis temáticos I e II e 3) gerar os segmentos correspondentes às espécies de macrófitas (nível temático III).

Para o primeiro nível temático (planície inundada, terra firme e água), todos os atributos foram observados e aqueles com diferenças visuais entre estas classes foram utilizados na classificação. Para o segundo e terceiro nível temático, a classificação foi realizada conforme o discutido nos itens 6.4 e 6.5.1, respectivamente.

Tabela 12. Parâmetros da segmentação multiresolução.

	Segmentos do nível a	Segmentos do nível b	Segmentos do nível c
Domínio do objeto	Nível do pixel	Criado abaixo dos 'Segmentos do nível I – a'	Criado abaixo dos 'Segmentos do nível II'
Filtro	-	Objetos não classificados	Nenhum
Forma	0,1	0,1	0,1
Compacidade	0,5	0,5	0,5
Escala	25	10	10
Atributos	P_V , span	P_V , span	σ_{HH}^0 , σ_{HV}^0 , σ_{VV}^0 , CSI , α_{s2} , ψ_{t1} , ϕ_{as1} , τ_3 , τ_m
Peso dos atributos	1 para cada atributo	1 para cada atributo	1 para cada atributo
Objetivo	Gerar os segmentos dos canais mais largos e de algumas áreas de terra firme	Gerar os segmentos correspondentes às classes temáticas I e II	Gerar os segmentos correspondentes às espécies de macrófitas (classe temática III)
Observação	Foram escolhidos os atributos com melhor delimitação dos canais	A diferença desta segmentação para a anterior é a escala, mas ambas com a intenção de separar os canais da área de terra firme e planície inundada: canais mais largos e canais mais estreitos. Não houve problemas de separação entre as outras classes.	Foram utilizados atributos com potencial para a discriminação das macrófitas.
Filtro	Nenhum	Unclassified; 1.3 Desclas terra (apresentada na Tabela 13)	Nenhum

Foram criadas as classes hierárquicas a partir de regras que levaram em consideração, principalmente, a característica de média dos objetos (*Object Features > Layer Values > Mean*), razão entre comprimento e largura de um objeto (*Object Features > Geometry > Extent > Length/Width*), razão entre comprimento e largura da linha principal do objeto (*Object Features > Geometry > Based on Skeletons > Length/Width (Only Main Line)*), desvio padrão dos valores de intensidade dos pixels dentro de um volume, cujo tamanho é definido pelo operador (*Object Features > Layer Values > Pixel Based > StdDev. to Neighbor Pixels*), relação entre comprimento e curvatura da linha principal de um objeto (*Object Features > Geometry > Based on Skeletons > Curvature/Length (only main line)*). Definidas as classes, as classificações foram executadas conforme os intervalos de mapeamento (Tabela 13). Nos atributos em que não é especificada a característica foi aplicada a média dos objetos. Foi utilizada a função booleana para a definição de cada classe da Tabela 13. Apenas a classe 'Terra firme 1' apresentada na Tabela 13 foi construída com funções *fuzzy*.

Tabela 13. Sequência das classificações e intervalos utilizados para a definição das classes. Sg corresponde à segmentação em que a classificação foi executada.

		Classe	Sg	Atributo*	Intervalo f. booleana	Termo lógico						
Nível I. Separação da 'Planície inundada' das outras classes	1.1	Canais mais largos	a	$\sigma_{HV}^0 *$	-28 : -22,1	e						
				Length/Width (only main line)	>9,35							
				Not length/width	3,07 : 3,12							
	1.2	Terra firme 1		$CSI, \alpha_m, H, \alpha_{s1}; \alpha_{s2} **$	fuzzy	e						
				N pixel	> 1420							
	1.3	Desclas terra			Rel. Border To Terra firme 1	0						
	1.4	Canais mais largos	b		Existência dos super objetos(1)	1						
	1.5	Terra firme 1			Existência dos super objetos(1)	1						
					Existência dos super objetos(1)	1						
	1.7	Canais			SD to neighbor pixels τ_2 (50)	0 : 24	e	ou				
					ψ_{t1}	-23 : 10						
					Desvio padrão de ψ_{t1}	0 : 81,5						
					$\sigma_{HV}^0 *$	-29 : -14,75						
					Número de pixels	< > 322						
					Length/Width	>3						
					Curvature/length (only main line)	<9,5						
					Length/Width (only main line)	>9,2						
					Curvature/length (only main line)	<7						
					Length/Width	2,7 : 3						
				1.8	Lago				Distância y da borda superior	500 : 2633	e	ou
									Função inversa à classe 'Planície inundada'			
		α_{s3}				72,7 : 78,8						
		α_{s2}				66 : 86,1						
	1.9	Terra firme			VSI (função inversa)	0,225 : 0,35	e					
					ψ_{t1}	-23 : 10						
					$SD_{-\psi_{t1}}$	0 : 81,5						
					Função inversa à classe 'Planície inundada'							
					Função inversa à classe 'Lago'							
	1.10	Planície inundada			Função inversa à classe 'Canais'		e					
					Função inversa à classe 'Canais mais largos'							
					SD to neighbor pixels τ_2 (50)	0 : 24						
					ψ_{t1}	-23 : 10						
					Desvio padrão de ψ_{t1}	0 : 81,5						
					Função inversa à classe 'Canais'							
					σ_{HH}^0 (função inversa)	-3,3 : 4						
		Função inversa à classe 'Canais mais largos'										
		Função inversa à classe '1.5 Terra firme 1'										
Nível II. Classificação dos objetos que herdam as características da classe 'Planície inundada'	2.1	Macrófita	b	H	0,1 : 0,868	e						
				$\sigma_{HV}^0 *$	-26,5 : -12							
	2.2	Árvore/Arbusto alagado		Função inversa à classe 'Macrófita'								
Nível III. Classificação dos objetos que herdam as características da classe 'Macrófita' Utilização do filtro 'Macrófita' para que não haja sobreposição das classes	3.1	Macrófita	c		Existência dos super objetos(1)	1						
	3.2	PR			$ \sigma_{HV}^0 ^{\wedge(-0,5)} *$	0,2394 : 0,263	e	ou				
					$ \sigma_{VV}^0 ^{\wedge 0,7} *$	4,287 : 6,964						
					ϕ_{as1}	8,5 : 20						
	3.3				ψ_{t1}	-74 : -13						
					$CSI^{\wedge(-1)} *$	1,6 : 2,9			e			
	3.4	PE			$\sigma_{iinHH}^0 *$	-14 : -8,5						
	3.5	HA			$ \sigma_{VV}^0 ^{\wedge 0,7} *$	6,68 : 9	e	ou				
					γ	0,4 : 0,67						
					α_{s2}	45 : 62,1						
					τ_3	3,9 : 33						
					$ \sigma_{VV}^0 ^{\wedge 0,7} *$	7,3 : 9						
3.6			α_{s2}	52 : 58	e							
			$ \sigma_{VV}^0 ^{\wedge 0,7} *$	6 : 7,5								
3.7												
3.8	PR											

* Estas imagens foram importadas sem transformação e somente depois da segmentação foi realizada a transformação para o objeto. Para o caso do sigma zero foi feito $\sigma_{HH}^0 = 10 * \log_{10} \sigma_{inHH}^0$, em que σ_{inHH}^0 é o sigma zero HH na escala linear.

** Estas funções fuzzy foram explicadas mais adiante.

A função fuzzy foi utilizada em algumas etapas, sendo uma delas a classificação da 'Terra firme 1'. Os atributos com as respectivas funções são apresentadas na Figura 21.

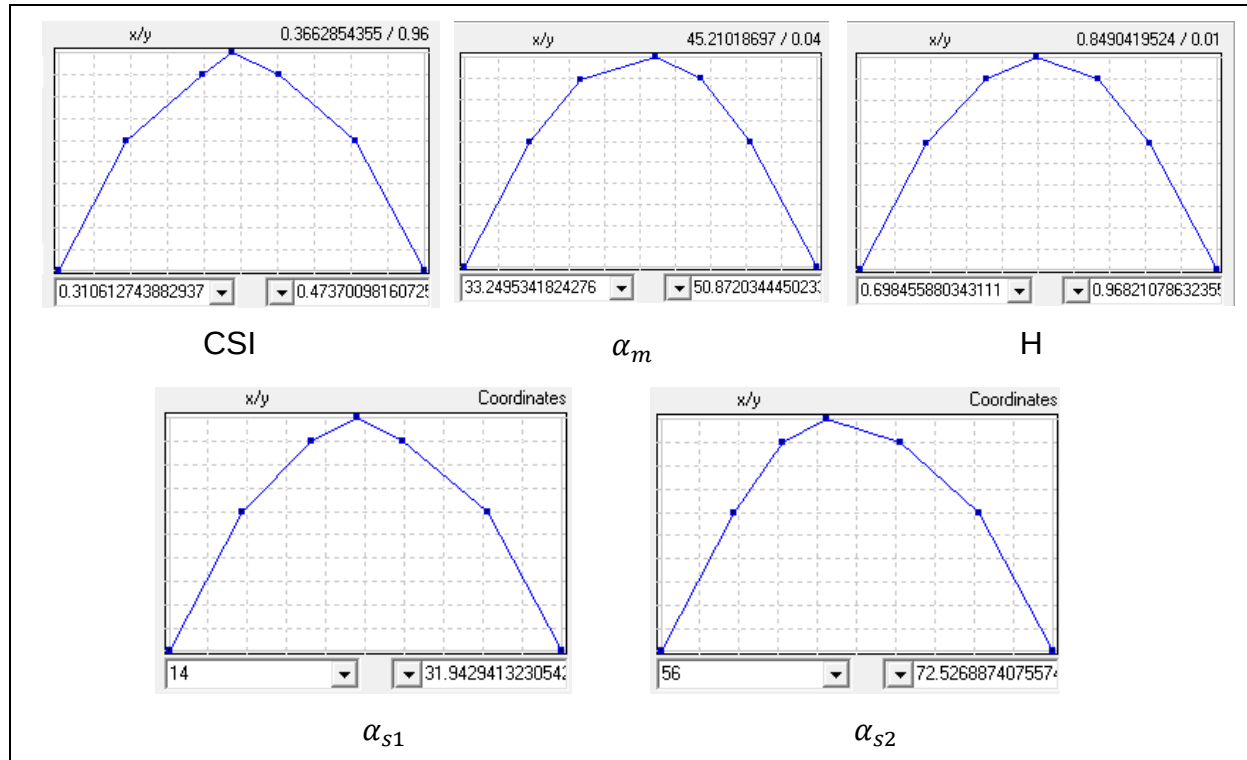


Figura 21. Gráficos das funções fuzzy utilizadas para classificar 'Terra firme 1'.

A função fuzzy foi utilizada em mais três etapas (Tabela 14): para a classificação dos objetos não classificados no nível temático I e para a classificação dos objetos de "Macrófita" não discriminados no nível III. A característica utilizada foi o comprimento relativo de borda que um objeto compartilha com os seus vizinhos associando-se ao objeto a classe cuja borda é maior (*Class-Related Features > Relations to Neighbor Objects > Rel. Border To*).

Tabela 14. Classificações de objetos não classificados nas etapas anteriores.

Etapa em que se encaixa na Tabela 13	Nível	Intervalo da função fuzzy (Relação de borda do objeto aos objetos vizinhos)	Classes que utilizaram a função
1.11	Nível I	 y: 0-1, x: 0-0,51	'Lago', 'Terra firme', 'Planície inunda'
3.9	Nível III	 y: 0-1, x: 0-0,51	PR, PE, HA
3.10	Nível III	 y: 0-1, x: 0-0,34	PR, PE, HA

Se duas classes têm contato com um objeto não classificado, a classe com mais de 50% de contato será atribuída a este objeto. Por isso, foi escolhido o valor 0,51 apresentado no Tabela 14. Depois desta tentativa, como ainda alguns objetos de macrófitas não foram discriminados, foi escolhido um valor um pouco menor (0,34).

6.6 Classificações baseadas em regras, em modelos de decomposição e em estatística

Os resultados das classificações são mostrados apenas para a região de interesse mostrada na Figura 7 (803265 m E / 9751336 m N a 827317 m E / 9776919 m N, projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*), zona 21 sul, sistema de referência WGS 84).

A Figura 22 mostra os resultados da classificação baseada em regras para o nível II (esquerda) e para o nível III (direita). Somente alguns objetos de macrófitas não foram classificados. Visualmente, *P. elephantipes* apresentou a menor ocorrência, *P. repens* foi classificada em áreas externas e expostas e *H. amplexicaulis* em áreas mais protegidas, como esperado devido às suas características apresentadas no item 5.1.

A classificação de Freeman-Durden, apresentada na Figura 23, mostrou que ocorrem dois mecanismos de espalhamento na área de terra firme: espalhamento superficial e espalhamento volumétrico. A região de macrófitas foi caracterizada, principalmente, como espalhamento volumétrico, não apresentando as diferenças entre as espécies. A água foi mapeada pelo espalhamento especular.

Em relação às classificações baseadas no plano H/alfa (com 8 zonas válidas – Figura 24) e híbrida (Wishart + plano H/alfa - Figura 25), as zonas mapeadas foram associadas às seguintes classes: 'Terra firme', 'Cobertura arbóreo-arbustiva alagada', 'Planície inundada (Macrófita)', 'Água', 'Planície inundada e Terra firme', 'Planície inundada (Macrófita) e Terra firme'. Para ambas as classificações, a água foi classificada como pertencente à zona 9 (superfície de Bragg), como esperado, devido ao espalhamento especular. A região de macrófita foi classificada como superfície vegetada moderadamente aleatória (zona 5) na classificação baseada no plano H/alfa, e superfície rugosa (zona 6) na classificação híbrida.

A classificação baseada no plano H/a distinguiu dois mecanismos de espalhamento para a área de terra firme: espalhamento superficial e espalhamento volumétrico. Este espalhamento volumétrico é altamente aleatório (zona 2), característica do espalhamento pelo dossel florestal (LEE e POTTIER, 2009). O outro espalhamento da área de terra firme é o superficial moderadamente aleatório (zona 6), o qual indica as mudanças na rugosidade da superfície e a propagação através da copa (LEE e POTTIER, 2009). A classificação híbrida não reconheceu a classe relacionada ao espalhamento ocasionado pelo dossel florestal (zona 2) como a classificação H/alfa. Em seu lugar, foram classificadas três zonas: zona 5 (espalhamento da vegetação com média entropia), zona 8 (espalhamento volumétrico quase-determinístico) e zona 7 (espalhamento *double-bounce* quase determinístico). A terra firme e a planície inundada apresentaram características da zona 6 (relacionada à rugosidade da superfície e a propagação através da copa) na classificação híbrida tornando difícil delimitar estas duas classes.

Na classificação baseada em estatística (Figura 26), as classes de entrada foram: *P. repens*, *H. amplexicaulis*, *P. elephantipes*, Água, Cobertura arbóreo-arbustiva alagada, Terra firme 1, Terra firme 2 e Terra firme 3. As três classes de terra firme foram criadas a fim de isolar diferentes padrões polarimétricos para distintos alvos de terra firme. Nesta classificação, as espécies de macrófitas foram discriminadas, mas também mapeadas erroneamente na área de terra firme. Algumas áreas corretamente classificadas como *H. amplexicaulis* na classificação baseada em regras foram erroneamente classificadas como *P. repens* na classificação supervisionada, indicando confusão entre estas duas classes. Visualmente, é difícil discernir a ocorrência de *H. amplexicaulis*, mas as regiões onde *P. elephantipes* ocorreram são compatíveis nas duas classificações. Entretanto, o efeito *speckle* afetou o delineamento adequado destas áreas, evidenciando o melhor desempenho do classificador orientado a objetos. Este efeito, provavelmente, ocorra devido à classificação ser por pixel e devido ao tamanho (aproximadamente 30 pixels por polígono) dos elementos amostrais.

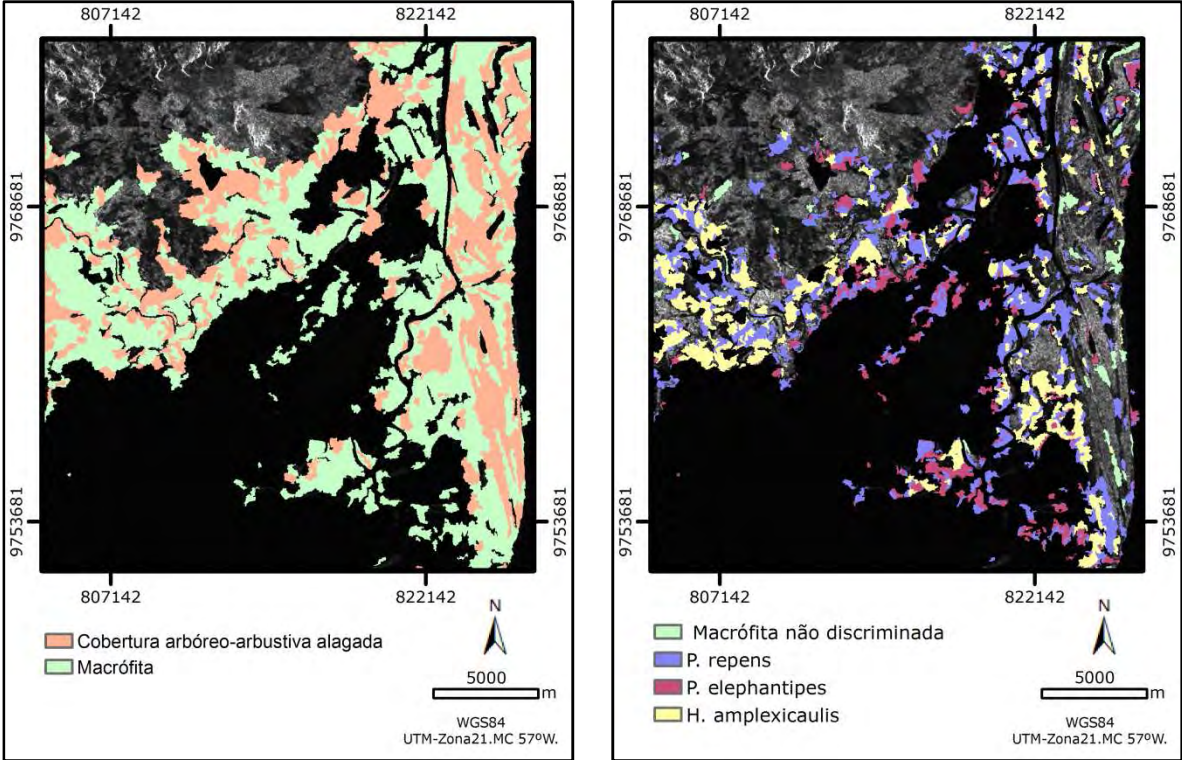


Figura 22. Classificação baseada em regras: Nível II (esquerda) e Nível III (direita).

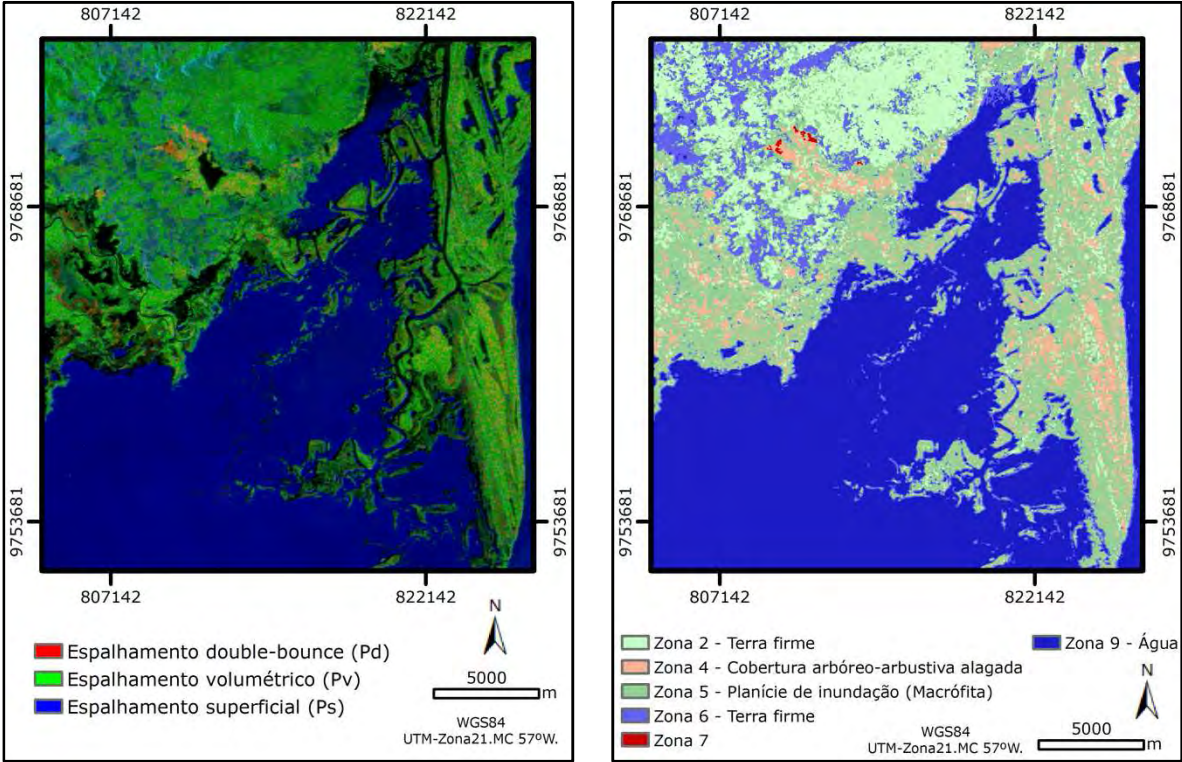


Figura 23. Decomposição de Freeman-Durden: RGB, respectivamente, associados aos mecanismos de espalhamento Pd, Pv e Ps.

Figura 24. Classificação não-supervisionada baseada no plano H/a da decomposição de Cloude-Pottier.

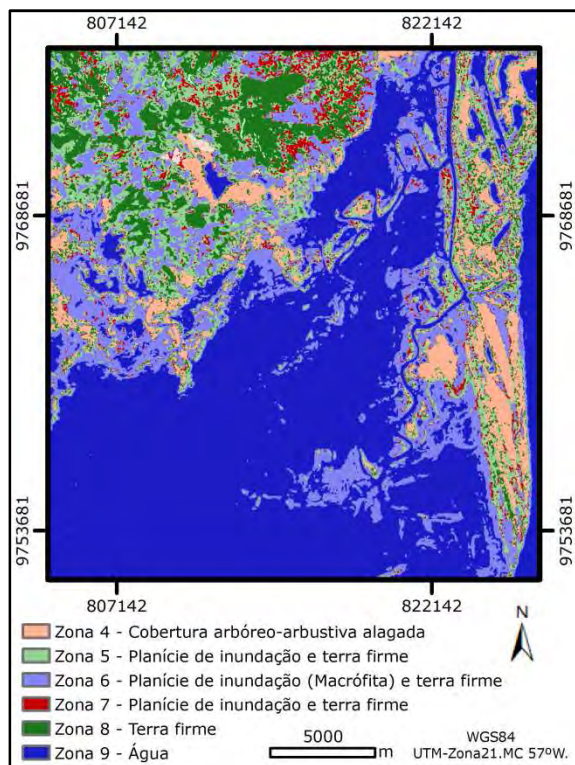


Figura 25. Classificação híbrida: classificação baseada em estatística com amostras de treinamento baseadas no plano H/a.

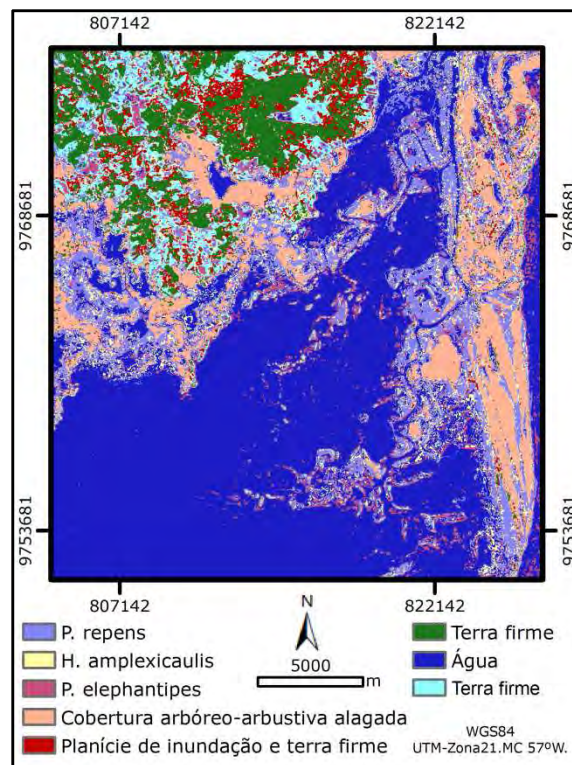


Figura 26. Classificação baseada em estatística (distância Wishart)

De modo geral, a água foi separada da área de terra firme e planície inundada em todas as classificações. A área de terra firme apresentou alguma confusão com a planície inundada na classificação híbrida. Dentro da planície inundada, todas as classificações separaram as áreas de macrófitas da cobertura arbóreo-arbustiva alagada. As três espécies de macrófitas foram discriminadas apenas na classificação supervisionada e baseada em regras.

Para verificar a exatidão da classificação, pode ser utilizada a exatidão global, a qual é obtida a partir da matriz de confusão e é definida pela soma dos pixels corretamente classificados (aqueles da diagonal principal) dividido pela quantia total de pixels classificados (STORY e CONGALTON, 1986).

A matriz de confusão é mostrada na Tabela 15. Foram usados 17 elementos amostrais (601 pixels) para a validação, sendo 10 de PR (409 pixels), 5 de HA (127 pixels) e 3 de PE (65 pixels). 74,54% de macrófita foi classificada como superfície vegetada (zona 5: espalhamento da vegetação com média entropia – Planície inundada (macrófita)) na classificação baseada no plano H/alfa; 66,72% de macrófita foi classificada como superfície rugosa (zona 6: espalhamento superficial

com média entropia – Planície inundada (macrófita) e terra firme); 92,9% de PR, 37% de HA e 36,92% de PE foram corretamente classificados na classificação baseada em estatística, representando 75,04% de exatidão global; 82,89% de PR, 96,85% de HA e 95,38% de PE foram corretamente classificados na classificação baseada em regras, representando 87,18% de exatidão global.

Tabela 15. Matriz de confusão para as quatro classificações. As abreviações e seus respectivos significados são: T (Terra firme), P(a) (Planície inundada (cobertura arbóreo-arbustiva), P(m) (Planície inundada (macrófita)), A (Água), P/T (Planície inundada e Terra firme), P(m)/T (Planície inundada (macrófita) e Terra firme), PR (*Paspalum repens*), HA (*Hymenachne amplexicaulis*), PE (*Panicum elephantipes*), O (Outras).

(Hymenachne amplexicaulis), P L (Panicum elephantipes), O (Outras).																			
	Classificação H/a					Classificação híbrida				Classificação supervisionada					Classificação baseada em regras				Tt
	Zonas					Zonas				Classes					Classes				
Dados de referência	2 T	4 P(a)	5 P(m)	6 T	9 A	5 P/T	6 P(m)/T	7 P/T	9 A	PR	HA	PE	A	T	PR	HA	PE	O	
PR	-	95	311	3	-	77	242	90	-	380	17	5	7	-	339	70	-	-	409
HA	-	11	107	9	-	-	95	-	32	21	47	1	58	-	-	123	-	4	127
PE	8	1	30	23	3	-	64	-	1	13	-	24	20	8	-	-	62	3	65
Total	8	107	448	35	3	77	401	90	33	414	64	30	85	8	339	193	62	7	601

6.7 Modelagem da variável morfológica

Antes da modelagem, foi observada a correlação entre as variáveis morfológicas e os atributos de radar a fim de modelar apenas a variável morfológica melhor correlacionada com os atributos. As mais altas correlações foram verificadas para sete atributos derivados da magnitude do dado de radar (Tabela 16) e quatro derivados da informação de fase (Tabela 17): sigma zero para HH e HV; BMI e CSI, desenvolvidos por Pope et al (1994); razão de co-polarização e polarização cruzada (I_{HH}/I_{HV}); span; ângulo alfa e anisotropia da decomposição de Cloude-Pottier; mecanismo de espalhamento volumétrico da decomposição de Freeman-Durden; e primeira magnitude do tipo de espalhamento da decomposição de Touzi (alfa 1). Entre estes, os atributos que tiveram as mais altas correlações com as variáveis morfológicas foram sigma zero HV (derivada da magnitude) e espalhamento volumétrico (P_V) (derivado da informação de fase).

A biomassa por metro quadrado ($B_{(g/m^2)}$) apresentou as maiores correlações. Entretanto, como a biomassa deste trabalho não foi uma medida diretamente coletada em campo, decidiu-se modelar a variável utilizada nas

equações de estimativa de biomassa desenvolvidas por Silva et al. (2009), ou seja, o “volume da haste”, cuja correlação se aproxima da biomassa, para alguns atributos.

Tabela 16. Matriz de correlação das variáveis morfológicas (L_{haste} , V_{haste} , $A_{\text{folha/haste}}$, $B(\text{g/m}^2)$, $N_{\text{folha/m}^2}$) e atributos gerados a partir do dado de magnitude do retroespalhamento (σ_{HH}^0 , σ_{HV}^0 , BMI, CSI, $\sigma_{\text{linVV}}^0/\sigma_{\text{linHH}}^0$, $\sigma_{\text{linVV}}^0/\sigma_{\text{linHV}}^0$, Span). Valores em negrito correspondem a $p < 0,05$.

	Variáveis morfológicas das macrófitas					Atributos gerados a partir do dado de magnitude do retroespalhamento						
	L_{haste}	V_{haste}	$A_{\text{folha/haste}}$	$B(\text{g/m}^2)$	$N_{\text{folha/m}^2}$	σ_{HH}^0	σ_{HV}^0	BMI	CSI	$\frac{\sigma_{\text{linVV}}^0}{\sigma_{\text{linHH}}^0}$	$\frac{\sigma_{\text{linVV}}^0}{\sigma_{\text{linHV}}^0}$	Span
L_{haste} (cm)	1	0,59	0,52	0,68	0,57	0,38	0,47	0,33	-0,42	-0,42	-0,44	0,31
V_{haste} (cm ³)		1	0,77	0,79	0,45	0,48	0,54	0,44	-0,26	-0,26	-0,33	0,47
$A_{\text{folha/haste}}$ (cm ²)			1	0,71	0,39	0,49	0,56	0,43	-0,30	-0,32	-0,36	0,48
B (g/m ²)				1	0,84	0,51	0,55	0,44	-0,45	-0,45	-0,42	0,45
$N_{\text{folha/m}^2}$					1	0,42	0,45	0,39	-0,37	-0,37	-0,35	0,35
σ_{HH}^0						1	0,84	0,87	-0,43	-0,43	-0,28	0,97
σ_{HV}^0							1	0,69	-0,50	-0,49	-0,65	0,81
BMI								1	-0,11	-0,10	-0,01	0,91
CSI									1	0,99	0,81	-0,22
$\sigma_{\text{linVV}}^0/\sigma_{\text{linHH}}^0$										1	0,81	-0,22
$\sigma_{\text{linVV}}^0/\sigma_{\text{linHV}}^0$											1	-0,13
Span												1

Tabela 17. Matriz de correlação das variáveis morfológicas (L_{haste} , V_{haste} , $A_{\text{folha/haste}}$, $B(\text{g/m}^2)$, $N_{\text{folha/m}^2}$) e atributos gerados a partir do dado de fase do retroespalhamento (α_m , A , P_v , α_{s1}). Valores em negrito correspondem a $p < 0,05$.

	Variáveis morfológicas das macrófitas					Atributos gerados a partir do dado de fase do retroespalhamento			
	L_{haste}	V_{haste}	$A_{\text{folha/haste}}$	$B(\text{g/m}^2)$	$N_{\text{folha/m}^2}$	α_m	A	P_v	α_{s1}
L_{haste} (cm)	1	0,59	0,52	0,68	0,57	0,39	-0,34	0,47	0,33
V_{haste} (cm ³)		1	0,77	0,79	0,45	0,28	-0,36	0,55	0,27
$A_{\text{folha/haste}}$ (cm ²)			1	0,71	0,39	0,29	-0,36	0,57	0,24
B (g/m ²)				1	0,84	0,41	-0,40	0,55	0,43
$N_{\text{haste/m}^2}$					1	0,35	-0,35	0,44	0,36
α_m (°)						1	-0,55	0,53	0,89
A							1	-0,70	-0,47
P_v								1	0,41
α_{s1} (°)									1

Os resultados, conforme o conjunto de etapas metodológicas apresentadas no item 5.7 (Modelagem de uma variável morfológica em função dos atributos de radar), foram:

1. Análise exploratória. A variável ‘espalhamento volumétrico’ possui uma alta correlação com a variável morfológica e por isso ela foi mantida no modelo;
2. Seleção das variáveis explicativas. A Figura 27 mostra o gráfico de R_{aj}^2 e $\sqrt{EMQ}$ versus as $p - 1$ variáveis explicativas para os dois conjunto de variáveis

dependentes em que R_{aj}^2 foi maior, até o máximo de 8 variáveis, sendo que em todos os casos, a variável ‘espalhamento volumétrico’ foi mantida. Para cada variável explicativa deve existir em torno de 6 a 10 observações. Sendo assim, para as 55 observações, o máximo permitido são 8 variáveis. Foi escolhido o modelo de regressão com 4 parâmetros pois, após a inclusão do quarto parâmetro, a curva do coeficiente de determinação ajustado e o erro médio quadrático dos resíduos se estabilizam (Figura 27).

As variáveis selecionadas, além de espalhamento volumétrico (P_v), foram: índice de biomassa (BMI), espalhamento superficial (P_s), helicidade do primeiro mecanismo de espalhamento (τ_1) e magnitude do tipo de espalhamento do terceiro mecanismo (α_{s3}).

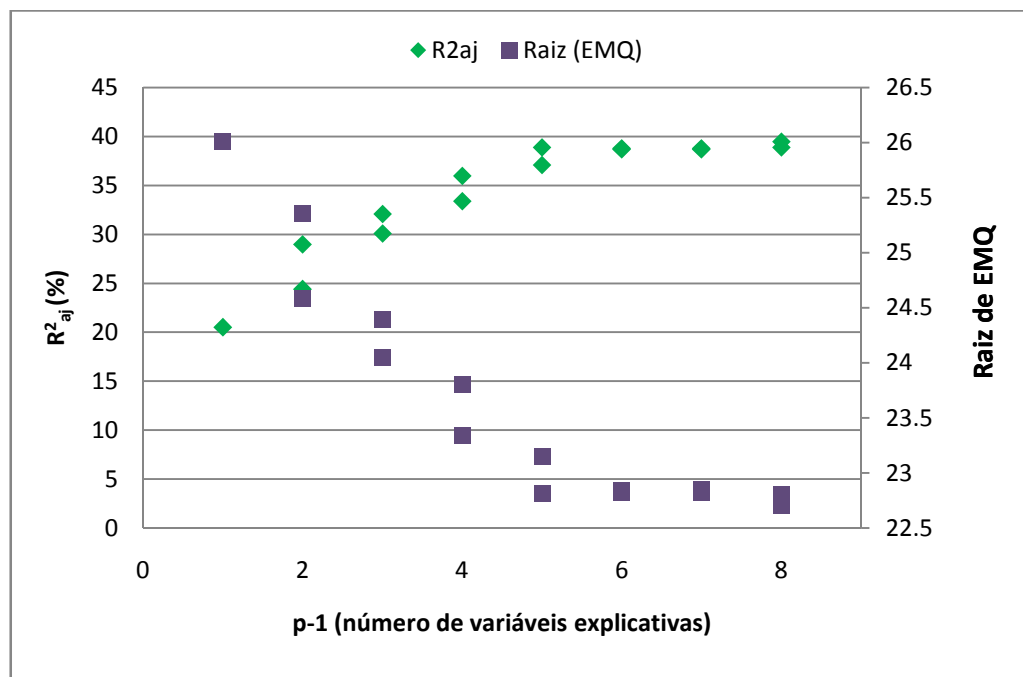


Figura 27. Coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2) e raiz do erro médio quadrático ($\sqrt{MSE}$) dos subconjuntos das variáveis explicativas que apresentaram o melhor desempenho com o atributo espalhamento volumétrico incluso.

3. Diagnósticos

a) Normalidade da variável dependente. Selecionadas as variáveis explicativas, foi realizada a transformação Box-Cox (Figura 28), a qual normaliza a variável dependente em função das explicativas e, conseqüentemente, aumenta a correlação entre elas. No eixo y da transformação é mostrada a soma dos quadrados dos resíduos e em x as diferentes estimativas de lambda, sendo a

estimativa de máxima verossimilhança de lambda (valor estimado de lambda para o qual a soma dos quadrados dos resíduos é mínima) igual a 0,32 ($\chi^2 = 19,43$; $p=0,00001$).

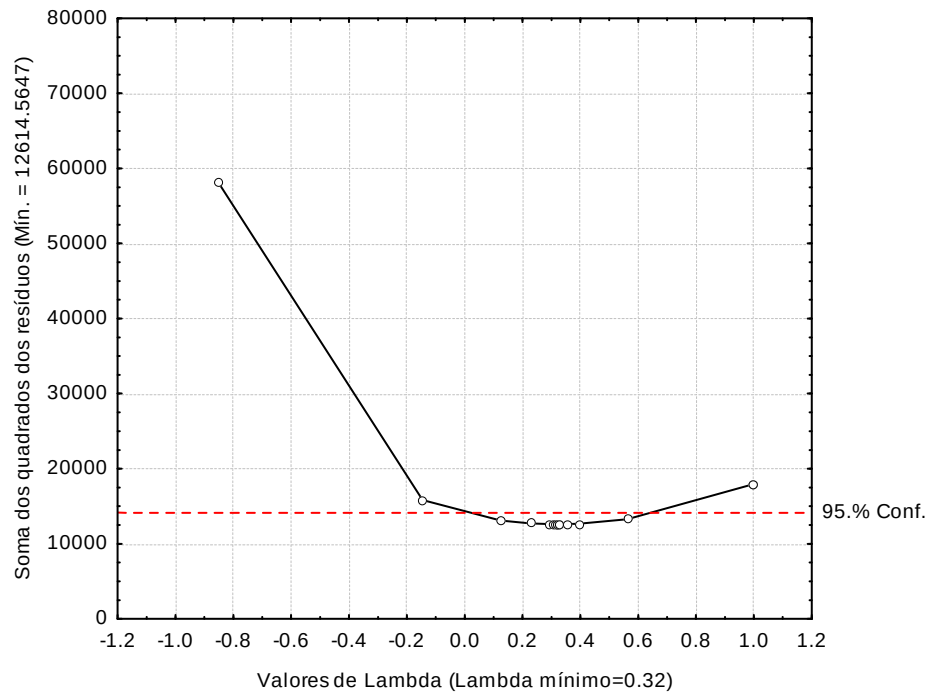


Figura 28. Comportamento da variável morfológica volume considerando 55 observações e as cinco variáveis explicativas selecionadas.

Ao invés de se utilizar o lambda 0,32, este valor foi arredondado para 0,5.

b) Análise exploratória. A Figura 29 apresenta o box-plot da variável dependente e os diagramas de dispersão entre o volume da haste medido em campo (Y) e cada atributo da imagem ($X_1, \dots, X_{p-1}$), com o respectivo valor do coeficiente de correlação linear (r).

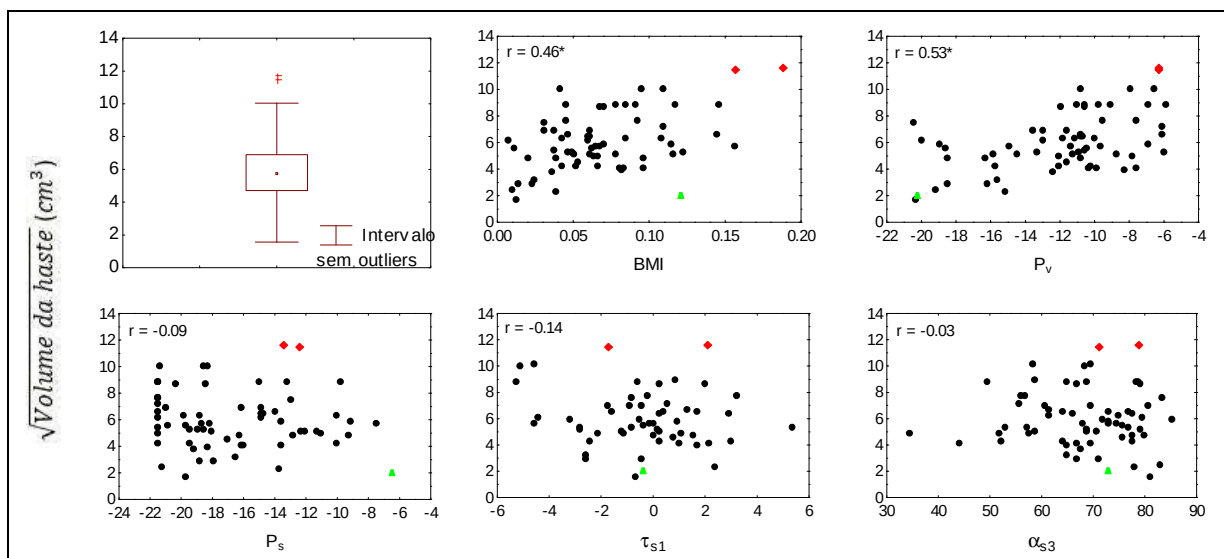


Figura 29. Box-plot da variável dependente (raiz do volume da haste); diagramas de espalhamento e coeficiente de correlação linear entre a variável dependente e cada variável exploratória. (*) ao lado do valor do coeficiente de correlação linear indica correlação ao nível de 0,10.

c) Normalidade e homocedasticidade dos resíduos. A Figura 30 mostra o diagrama de dispersão entre o resíduo e o volume ajustado (Figura 30a) e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Figura 30 b).

Os resíduos estão distribuídos aleatoriamente (Figura 30a), sem demonstrar um comportamento definido, o que indica que há homocedasticidade. Isso é confirmado pelo teste Levene modificado aplicado para todas as variáveis integrantes do modelo ao nível de significância 5% ($p(BMI) = 0,67$; $p(P_v) = 0,48$; $p(P_s) = 0,69$; $p(\tau_1) = 0,36$; $p(\alpha_{s3}) = 0,86$).

O padrão de dispersão é aproximadamente linear (Figura 30b), sendo que o teste Shapiro-Wilk confirma a distribuição normal dos resíduos ao nível de significância 5% (S-W = 0,97, p-valor = 0,15).

A observação L0447d_1 (valor de resíduo próximo de 4 na Figura 30a) foi eliminada da modelagem devido ao seu alto valor de resíduo. Após eliminá-la, os resíduos continuaram homocedástico ($p(BMI) = 0,4$; $p(P_v) = 0,26$; $p(P_s) = 0,58$; $p(\tau_1) = 0,59$; $p(\alpha_{s3}) = 0,84$ e com distribuição normal ao nível de significância 5% (S-W = 0,96, p-valor = 0,1).

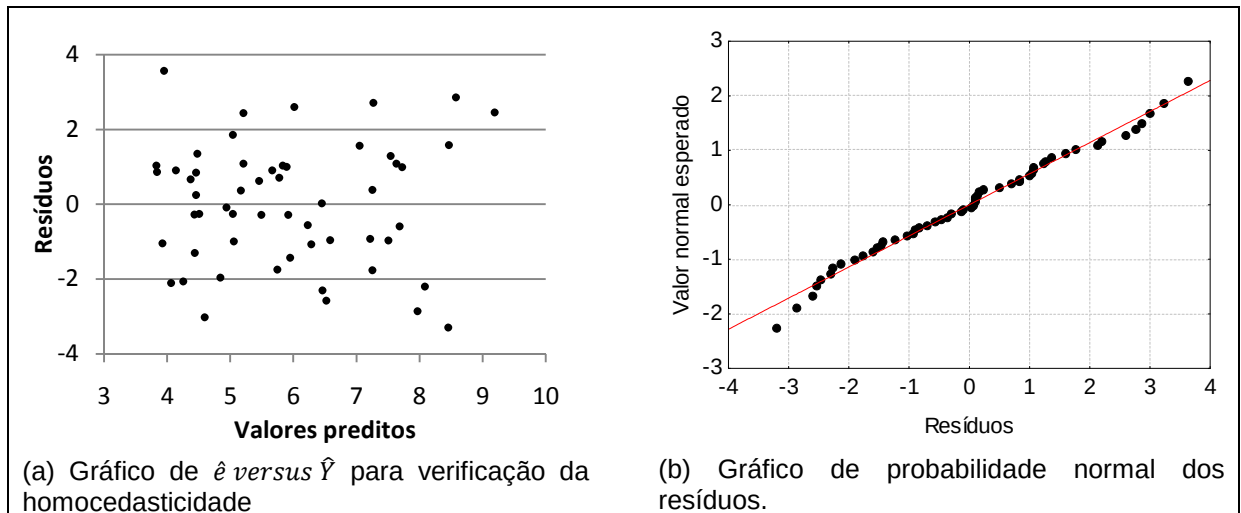


Figura 30. Gráficos de resíduos.

d) Outliers influentes. Se $F(D.Cook; 6; 48) > 10\%$ ou 20% o outlier é considerado influente. Os dois casos mais influentes foram: L0888 (1,5%) e L0670 (1%). Se $|DFFITS| > 1$, considera-se o outlier influente. O caso L0888 possui $|DFFITS| = 1$. Como os valores da porcentagem referente à distância Cook e do $DFFITS$ são inferiores ao valor considerado influente, nenhum caso foi eliminado.

e) Termos de interação. Os resíduos do modelo de regressão foram plotados contra cada termo de interação (Figura 31). A análise visual indica que não há nenhum padrão sistemático. Assim, não há necessidade de inclusão de nenhum dos termos de interação no modelo.

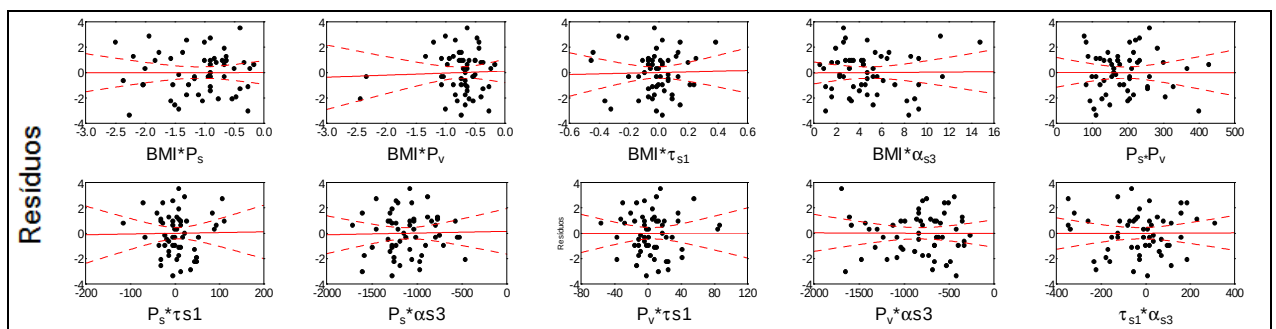


Figura 31. Diagrama de dispersão entre os resíduos e cada termo de interação.

f) Multicolinearidade. O modelo não apresenta colinearidade entre as variáveis, como pode ser observado pelos valores dos fatores de inflação da variância (Tabela 18).

Tabela 18. Fatores de inflação da variância.

Variável	BMI	P_s	P_v	τ_1	α_{s3}
VIF	3,7	2,3	3,6	1	1,4

g) Autocorrelação espacial. O diagrama de espalhamento de Moran (Figura 32) mostra que as observações apresentaram resíduos com correlação espacial não significativa ($p=0,26$) o que indica que o valor do resíduo de uma observação não foi dependente do valor de resíduo nas localizações vizinhas. Há uma pequena tendência a associações espaciais positivas o que significa que uma observação possui vizinhos com valores semelhantes. Seriam valores distintos caso a correlação fosse negativa.

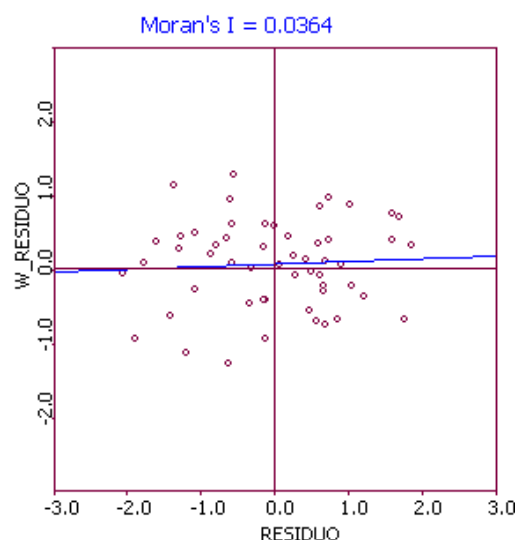


Figura 32. Diagrama de espalhamento de Moran para os resíduos do modelo da variável volume.

Os diagnósticos aplicados indicaram não haver problemas com o modelo de regressão:

$$\widehat{\sqrt{V}} = -0,4319 + 21,4553BMI - 0,1773P_s + 0,2189P_v - 0,1966\tau_1 + 0,0638\alpha_{s3} \quad (46)$$

4. Validação. Entre as medidas de avaliação (Tabela 19) do modelo de regressão estão: os coeficientes de regressão padronizados estimados (β), os coeficientes de regressão, os respectivos p-valor, o SQR, o MSE, o PRESS e o coeficiente de determinação sem ajuste e com ajuste.

Tabela 19. Resultado do modelo de regressão para a variável volume da haste.

	β	B	p-valor	SQR	MSE	PRESS	R^2	R^2_{aj}
Intercepto		-0,432	0,895	130,201	2,713	166,729	49%	44%
BMI	0,4	21,455	0,049					
P_S	-0,341	-0,177	0,035					
P_v	0,407	0,219	0,042					
τ_1	-0,199	-0,197	0,063					
α_{s3}	0,307	0,064	0,017					

A avaliação do teste t mostrou que as variáveis selecionadas têm importância significativa ao nível de 7%.

O valor de PRESS (166,729) é 28% maior que o SQR (130,201). Já que esta diferença é próxima, o MSE pode ser considerado um estimador do desvio padrão, ou seja, o MSE correspondente a 2,713 representa um erro de predição de $1,647 \sqrt{cm^3}^{12}$. Para a variável estimada média ($6,4 \sqrt{cm^3}$) esse erro corresponde a 25% e para a variável estimada máxima ($11,65 \sqrt{cm^3}$) corresponde a 14%.

Apesar do baixo valor do coeficiente de determinação ajustado (R^2), os 10 elementos amostrais reservados para a validação do modelo (Figura 33) caíram dentro do intervalo de predição de 95% de confiança.

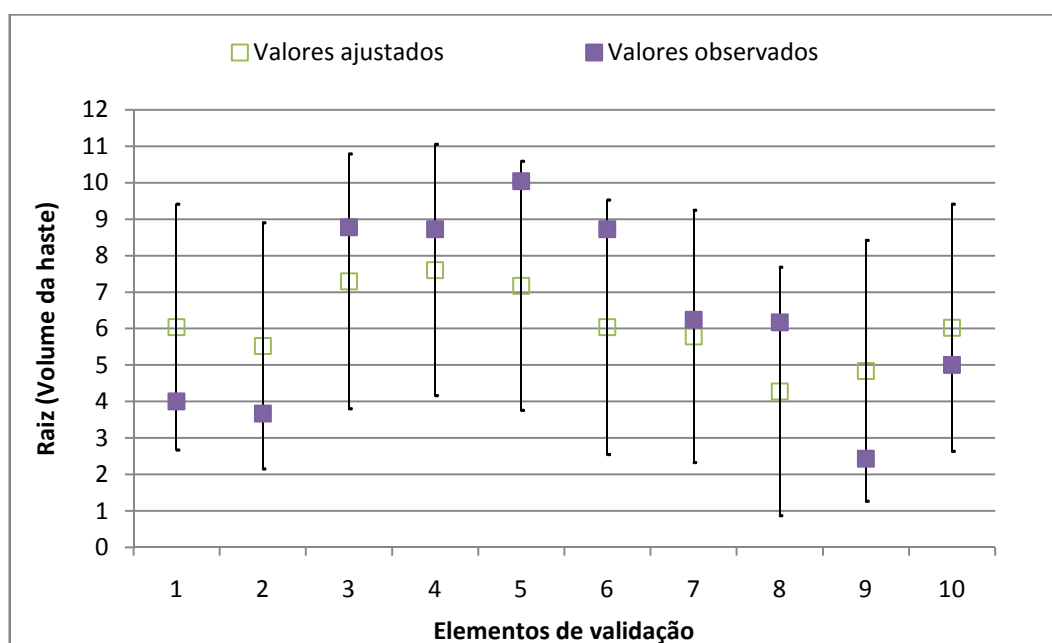


Figura 33. Valores de volume observados e estimados para 6 elementos de *P. repens* (1 a 6), 2 elementos de *P. elephantipes* (7 e 8) e 2 elementos de *H. amplexicaulis* (8 e 10). A barra vertical corresponde ao intervalo de predição com nível de confiança de 95%.

¹² $\sqrt{cm^3}$: lembrar que o volume da haste passou pela transformação box-cox e foi elevado a 0,5. Por isso, a unidade apresenta a função raiz quadrada.

Capítulo 7 - Conclusões

O presente trabalho avaliou o potencial da imagem SAR polarimétrica banda L (ALOS/PALSAR) procurando mostrar, principalmente, a importância da informação de fase, que é o diferencial dos dados polarimétricos em relação aos convencionais, em relação à discriminação e mapeamento de espécies de macrófitas e à estimativa de parâmetros morfológicos dessas plantas. Trata-se de um estudo de caso feito na planície de inundação do Lago Grande de Monte Alegre, Pará (região amazônica) em que foram encontradas, principalmente, três espécies de macrófitas: *Paspalum repens*, *Hymenachne amplexicaulis* e *Panicum elephantipes*, vulgarmente conhecidas como premembaça, rabo de rato e taboca.

A partir dos resultados, foi verificado que é possível discriminar as espécies de macrófitas usando dados polarimétricos, banda L. Tal afirmação deve-se, primeiramente, à sensibilidade dos atributos polarimétricos às diferenças entre as geometrias das espécies de macrófitas. Esses atributos polarimétricos permitiram descrever a densidade da copa, orientação predominante das hastes (horizontal ou vertical), biomassa e a medida sobre o ângulo de orientação do alvo. Em segundo lugar, esta afirmação concretiza-se com a identificação de um conjunto de atributos e os intervalos com potencial para a discriminação entre as espécies e a aplicação destes na classificação baseada em regras. A importância da informação polarimétrica é, então, evidenciada, já que nesta classificação (87,18% de acurácia global), cinco dos nove atributos utilizados para a discriminação foram extraídos a partir da informação de fase.

Os parâmetros de Touzi foram importantes para a discriminação, já que 4 dos 5 atributos provenientes da informação de fase foram gerados a partir da decomposição de Touzi: fase do primeiro mecanismo de espalhamento, ângulo de orientação do primeiro mecanismo de espalhamento, helicidade do terceiro mecanismo de espalhamento e magnitude do segundo mecanismo de espalhamento.

Entre as cinco classificações, duas (baseada em regras e a supervisionada baseada na distância Wishart) foram sensíveis às três diferentes espécies permitindo a discriminação entre elas. O melhor desempenho pode estar

associado ao fato de que ambas possuem a intervenção do analista, o que não ocorre nas outras três classificações que são baseadas em modelos de decomposição. A classificação baseada em regras foi realizada através da análise da imagem orientada a objetos (*Geographic object-based image analysis* - GEOBIA), a qual, por lidar com classes semânticas (classes representadas através dos objetos da imagem e suas relações mútuas) apresentou um desempenho superior que a classificação supervisionada baseada na distância Wishart. Esse desempenho superior também está associado à segmentação multiresolução por combinar não apenas o critério espectral, mas também o espacial. Além disso, a classificação orientada a objetos permite que os resultados de uma etapa sejam usados em etapas posteriores com um conjunto de atributos adequados para cada etapa.

A importância da informação de fase é novamente reforçada no modelo de regressão múltipla estimado para a variável da macrófita, sendo que os atributos de Freeman-Durden e, novamente, os de Touzi se destacam. Dentre as cinco variáveis independentes do modelo, quatro são geradas a partir da decomposição de alvos, sendo duas provenientes da decomposição de Freeman-Durden (espalhamento volumétrico (P_v), espalhamento superficial (P_s)) e duas da decomposição de Touzi (helicidade do primeiro mecanismo de espalhamento (τ_1) e magnitude do tipo de espalhamento do terceiro mecanismo (α_{s3})). A quinta variável é o parâmetro de Pope índice de biomassa (BMI).

Apesar do modelo não ter apresentado um elevado coeficiente de determinação (44%), o seu desempenho se mostrou com boa capacidade preditiva, já que todos os elementos de validação caíram dentro do intervalo de predição de 95% de confiança. Conclui-se, então, que o modelo pode ser utilizado para a estimativa do volume da haste e, conseqüentemente, para a determinação de biomassa, auxiliando, assim, na estimativa da contribuição das macrófitas no ciclo global do carbono.

A possibilidade de discriminação entre as espécies permite conhecer melhor a planície de inundação amazônica em termos da proliferação de doenças de veiculação hídrica e conter danos à saúde pública.

Para um próximo trabalho, recomenda-se que sejam construídos modelos de biomassa em função dos atributos polarimétricos para cada espécie de macrófita separadamente, pois a produtividade depende do tipo da espécie. Neste

trabalho, isso não foi possível devido à pequena quantidade de elementos coletados para *H. amplexicaulis* e *P. elephantipes*.

Outra sugestão é que sejam comparados três modelos para a mesma variável morfológica. Um modelo com atributos gerados apenas com a informação de amplitude, outro com atributos gerados apenas com a informação da fase e outro combinando ambas as informações.

Recomenda-se realizar a decomposição de van Zyl a qual não sofre a falha que ocorre na decomposição de Cloude-Pottier e Freeman-Durden, em que alguns componentes do espalhamento resultam em valores negativos (VAN ZYL e KIM, 2008; VAN ZYL et al., 2011).

Referências bibliográficas

- ALBERGA, V. *Comparison of polarimetric methods in image classification and SAR interferometry applications*. 2004. 195p. Tese. Institut fur Hochfrequenztechnik und Radarsysteme Oberpfaffenhofen.
- ALOS, 2008. Acessado em fev/2008, site < <http://www.asf.alaska.edu>>.
- ANA, 2008. Acessado em fev/2008, site <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>.
- ANSELIN, L. The Moran scatterplot as ESDA tool to assess local instability in spatial association. In: FISHER, M. et al. *Spatial analytical perspectives on GIS*. London: Taylor and Francis, 1996. p. 111-126.
- ANTON e RORRES. *Álgebra linear com aplicações*. Bookman. Porto Alegre, 2001, 571.
- ANTUNES, A. F. B. *Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto em imagens de alta resolução espacial*. 2003. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- APARICIO, C. *Análise da resposta espectral de espécies de macrófitas*. 2007. Tese (Doutorado em Ciências na área de ecologia de ecossistemas terrestres e aquáticos) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multi-resolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: J. STROBL et al., Editors, *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*. Beiträge zum AGIT-Symposium. Salzburg 2000, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe (2000), pp. 12–23.
- BAATZ, M. HOFMANN, C.; WILLHAUCK, G. Progressing from object-based to object-oriented image analysis. In: BLASCHKE, T., LANG, S., HAY, G.J. (Eds.), *Object based image analysis: spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*. Springer, Heidelberg, Berlin, New York, pp. 29–42, 2008.
- BARTLETT, K.B., CRILL, P. M., BONASSI, J.A., RICHEY, J. E., HARRISS, R. C. 1990. Methane flux from the Amazon River floodplain – emissions during high water. *Journal of Geophysical Research* 95 (D10) 16773–16788.
- BENZ, U.C.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, M. Multi-Resolution, Object-Oriented Fuzzy Analysis of Remote Sensing Data for GIS-Ready Information. *SPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol 58, pp239–258. Amsterdam: Elsevier Science. 2004,
- BOERNER, W. M.; EL-ARINI, M. B., CHAN, C. Y., MASTORIS, P. M. Polarization dependence in electromagnetic inverse problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-29 (2): pag 262-271, Mar/1981.

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

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING. *Advanced radar polarimetry tutorial*, 2003. 97p. Disponível no site <www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/polarim/pdf/polarim_e.pdf> consultado dia 10/set/2007.

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

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 1, pp. 68-78, Jan.1997.

CORREIA, A.H.; FREITAS, C.C.; FRERY, A.C.; SANT'ANNA, S.J.S. A user friendly statistical system for polarimetric SAR imagem classification. *Revista de Teledetectecion*, n. 10, Diciembre 1998.

COSTA, M.P.F. *Net primary procuctivity of Aquatic Vegetation of the Amazon Floodplain: a Multi-SAR Satellite Approach*. 2000. 266 p. Tese (Doctor of Philosophy) - University of Victoria, Victoria, Canadá.

COSTA, M.P.F.; NIEMANN, O.; NOVO, E.; AHERN, F. Biophysical properties and mapping cycle of the Amazon floodplain using JERS-1 and Radarsat. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 23, no.7, pp. 1401-1426, 2002.

COSTA, M.P. Use of SAR satellites for mapping zonation of vegetation communities in the Amazon floodplain. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no. 10, pp. 1817-1835, 2004.

COSTA, M.P. Estimate of net primary productivity of aquatic vegetation of the Amazon floodplain using Radarsat and JERS-1. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, no. 20, pp. 4527-4536, 2005.

DEFINIENS. 2009. *Definiens Developer 8.0 User Guide*. Document version 1.2.0. München, GB: Definiens Imaging.

DEVOL, A. H., RICHEY, J. E., CLARK, W. A., KING, S. L., MARTINELL, L. A. Methane emissions to the troposphere from the Amazon floodplain. *Journal of Geophysical Research*, v. 93, n. D2, p. 1583-1592. 1988.

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*, vol. 26, no. 6, pp. 774-789, Nov.1988.

FEITOSA, R. Q.; MATTOS, C.; SANTOS, R. V. 1; REGO, L. F. G.; PEREIRA, A. A. C. Impacto de técnicas baseadas em conhecimento na análise de imagens de média resolução para mapeamento do desflorestamento na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005. p. 4065 - 4072. 1 CD-ROM.

FREEMAN, A.; DURDEN, S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 963-973, 1998.

GONÇALVES, F.G.; SANTOS, J.R.; TREUHAFT, R.N. Stem volume of tropical forests from polarimetric radar, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, no. 2, pp. 503-522, jan/2011.

GOODMAN, J.W. Some fundamental properties of speckle, *Journal of the Optical Society of America*, 66(11), 1145–1150, 1976.

HASLAM, S. M. 2003. *Understanding wetlands: fen, bog and marsh*. Taylor & Francis, New York, USA. 296 pp.

HELLMANN M.P. *SAR Polarimetry Tutorial* (Beta version 0.1a). University of Rennes. Rennes: France, 2001. 109p.

HESS, L.; MELACK, J.; FILOSO, S. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no 4, pp 896-904, 1995.

HESS, L.; et al., Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote Sensing of Environment*, vol. 87, no. 4, pp. 404-428, 2003.

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

HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. Radar detection of wetland ecosystems: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 29, pp. 5809–5835, 2008.

HOFMANN, P. Detecting urban features from IKONOS data using an object oriented approach. In: Annual Conference of the Remote Sensing & Photogrammetry Society, 1., 2001, London. *Proceedings...* London: Remote Sensing & Photogrammetry Society, 2001. p.2833.

IEEE Test antenna standard, p. 76, IEEE, 1979.

IPCC, 2007. *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p.996. Disponível em <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm>

JUNK, W.J.; BAYLEY, P.B.; SPARKS, R.E. The flood pulse concept in river-floodplain systems, *Canadian Special Publications in Fisheries and Aquatic Sciences*, 106, 110-127, 1989.

JUNK, W. J. Os recursos hídricos da Amazônia. In: PAVAN C, organizador. *Uma estratégia latino-americana para a Amazônia 2*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal; 1996. P. 247-259.

JUNK, W. J. 1997. General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian floodplains. In: JUNK, W. J. (ed.). *The Central Amazon Floodplain*. p. 3–22. Springer, Berlin, Germany.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F. 1997. Plant life in the floodplain with special reference to herbaceous plants. p. 147–186. In: JUNK, W. J. (ed.). *The Central Amazon Floodplain*. p. 147–186. Springer, Berlin, Germany.

JUNK, W. J.; WANTZEN, K. M. The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications - an update, In: *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries*. FAO, Bangkok, pp.: 117-149, 2004 <Disponível em <http://www.fao.org/docrep/007/ad526e/ad526e0c.htm>>

LANG, S. Object-based image analysis for remote sensing applications: modeling reality – dealing with complexity. In: BLASCHKE, T., LANG, S., HAY, G.J. (Eds.), *Object based image analysis: spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*. Springer, Heidelberg, Berlin, New York, pp. 29–42, 2008.

LEE, J. Refined filtering of image noise using local statistics. *Computer graphics and image processing* 15, 380-389, 1981.

LEE, J.; GRUNES, M. R. Classification of multilook polarimetric SAR data based on complex Wishart distribution. *Telesystem conference*, 1992.

LEE, J.; GRUNES, M. R. Classification of multilook polarimetric SAR imagery based on the complex Wishart distribution. *International J. Remote Sensing*, vol. 15, no.11, pp. 2299-2311, 1994.

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

LEE, J. S; GRUNES, M.R.; POTTIER, 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.; POTTIER, E. *Polarimetric radar imaging from basics to applications*. New York: CRC Press, 2009.

McNAIRN, H.; DUGUAY, C.; BRISCO, B.; PULTZ, T.J. The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response, *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, pp. 308-320, 2002.

MEIER, E.; FREI, U.; NÜESCH, D. Precise terrain correct geocoded images. In: SAR geocoding: data and systems. Kalsruhe: Wichmann Verlag, pp. 173-186, 1993.

MELACK, J.M.; HESS, L.L.; GASTIL, M. ; FORSBERG, B.R.; HAMILTON, S.K.; LIMA, I.B.T.; NOVO, E.M.L.M. Regionalization of methane emissions in the Amazon basin with microwave remote sensing, *Global Change Biology*, vol. 10, pp. 530-544, 2004.

MELACK, J.M.; HESS, L.L. Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon basin. In JUNK, W. J. et al. *Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management*. Springer Verlag, 2010.

MITSCH, W. J., GOSSELINK, J. G. *Wetlands*. 3d. edition. John Wiley & Sons, Hoboken, USA. 2000. 920 pp.

MURA, J. C. Algoritmos e metodologia de processamento para síntese de imagens de radar de abertura sintética (SAR). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, 24-29 jun.1990. *Anais...* São José dos Campos, INPE, 1990, v.1, p.188-196.

NARVAES, I. *Avaliação de dados SAR polarimétricos para estimativa de biomassa em diferentes fitofisionomias de florestas tropicais*. 2010. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

NETER, J.; KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; LI, W. *Applied Linear Statistical Models* 5 ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

NOVO, E.M.L.M.; COSTA, M.P.F.; MANTOVANI, J.E.; LIMA, I.B.T. Relationship between macrophyte stand variables and radar backscatter at L and C band, Tucuruí reservoir, Brazil. *Int. J. Remote Sensing*, vol.23, no.7, pp. 1241-1260, 2002.

NOVO, E. M. L. M.; COSTA, M. P. F. Fundamentos e aplicações de radar no estudo de áreas alagáveis. In: SOUZA, R. B. *Oceanografia por satélites*. São Paulo: Oficina de textos, 2005. Cap 16, pág 236-258.

PEDRALLI, G. Macrófitas aquáticas como bioindicadoras da qualidade da água: alternativas para usos múltiplos de reservatórios. In: THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. *Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas*. UEM: Maringá, 2003, cap.8, p. 171-188.

PINHO, C. M. D. *Análise orientada a objetos de imagens de satélite de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos/SP*. 2005. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

POPE, K.O.; REY-BENAYAS, J.M.; PARIS, J.F. Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics. *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, no. 2, pp. 205-219, 1994.

POPE, K.O.; REJMANKOVA, E.; PARIS, J.F.; WOODRUFF, R. Detecting seasonal flooding cycles in marshes of the Yucatan peninsula with SIR-C polarimetric radar imagery. *Remote Sensing of Environment*, vol.59, pp.157-166, 1997.

REIGBER, A.; JÄGER, M.; NEUMANN, M.; FERRO-FAMIL, L. Polarimetric fuzzy k-means classification with consideration of spatial context. In: POLINSAR 2007, Frascati, Italy. *Proceedings...* Frascati: ESA 2007.

RICHEY, J.E.; MELACK, J.M.; AUFDENKAMPE, A.K. BALLESTER, V.M. HESS, L.L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂, *Nature*, vol. 416, pp. 617–620, 2002.

SANT'ANNA, S. J. S. *Avaliação do desempenho de filtros redutores de speckle em imagens de radar de abertura sintética*. 1995. 210f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SANTOS, J. R.; NARVAES, I. S.; GRAÇA, P. M. L. A.; GONÇALVES, F. G. Polarimetric responses and scattering mechanisms of tropical forests in the Brazilian Amazon.. In: JEDLOVEC, G. (NASA/MSFC-USA). (Org.). *Advances on geosciences and remote sensing*. 1 ed. Vukovar, Croatia: In-Tech, 2009. v. 8, p. 183-206.

SHAPIRO, S. S. et al. A comparative study of various tests of normality. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, p. 1343-1372, 1968.

SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR radiometric and geometric calibration, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, p.1-18, 2009.

SILVA, T.S.F.; COSTA, M.P.F.; MELACK, J.M. Annual net primary productivity of macrophytes in the Eastern Amazon floodplain, *Wetlands*, vol. 29, no. 2, pp. 747-758, 2009.

SILVA, T.S.F.; COSTA, M.P.F.; MELACK, J.M. Assessment of two biomass estimation methods for aquatic vegetation growing on the Amazon floodplain, *Aquatic Botany*, vol. 92, no. 3, pp. 161-167, 2010a.

SILVA, T.S.F.; COSTA, M.P.F.; MELACK, J.M. Spatial and temporal variability of macrophyte cover and productivity in the eastern Amazon floodplain: A remote sensing approach, *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, p. 1998-2010, 2010b.

SIOLI, H. *Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region*. Amazoniana 1:74-83, 1984.

STRANG, G.; BORRE, K. *Linear algebra, geodesy and GPS*. Wellesley – Cambridge Press: Estados Unidos, 624p., 1997.

STORY, M.; CONGALTON, R. G. Accuracy assesment: a user's perspective. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, v. 52, n.3, p.397-399, 1986.

THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. Análise crítica dos estudos sobre macrófitas aquáticas desenvolvidos no Brasil. In: THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. *Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas*. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2003. p.19-38.

TOCKNER, K.; MALARD, F.; WARD, J.V. An extension of the flood pulse concept, *Hydrological Processes*, vol. 14, no. 16-17, pp. 2861-2883, 2000.

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. *Can. J. Remote Sensing*. Canadá, v.30, n.3, p.380-407, jun/jul 2004.

TOUZI, R. Target scattering decomposition in terms of *roll-invariant* target parameters, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 1, pp. 73-84, 2007.

TOUZI, R.; DESCHAMPS, A.; ROTHER, G. Wetland characterization using polarimetric RADARSAT-2 capability, *Can. J. Remote Sensing*, vol. 33, suppl. 1, pp. S56-S67, 2007.

TOUZI, R.; DESCHAMPS, A.; ROTHER, G. Phase of target scattering for wetland characterization using polarimetric C-band SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 9, pp. 3241-3261, 2009.

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

VAN ZYL, J.J. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 27, No. 1, pp. 37-45. 1989.

VAN ZYL, J.J.; KIM, Y. Requirements for model-based polarimetric decompositions, In *Proc. IGARSS*, Boston, MA, Jul. 2008, pp. V-417-V420.

VAN ZYL, J.J.; ARII, M. KIM, Y. Model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices constrained for nonnegative eigenvalues. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011.

VASCONCELOS, C.H.; NOVO, E.M.L.M; DONALISIO, M.R. Uso do sensoriamento remoto para estudar a influência de alterações ambientais na distribuição da malária na Amazônia brasileira. *Cadernos de Saúde Pública* 2006, 22:517-526.

VIEIRA, P. R.; YANASSE, C. C. F.; FRERY, A. C. O.; SANT'ANNA, S. J. S. Um sistema de análise e classificação estatísticas para imagens SAR. In: LATINO-AMERICAN SEMINAR ON RADAR SENSING, 1., 1996, Buenos Aires, AR. *Anais... Image Processing Techniques*. 1997. p. 179-185.

WOODHOUSE, I. *Introduction to microwave remote sensing*. CRC Press, 2006. 369 p.

WUEBBLES, D., HAYHOE, K. 2002. Atmospheric methane and global change. *Earth–Science Reviews* 57: 177–210. Disponível em <<http://www.atmosresearch.com/ESR 2002.pdf>>

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

Apêndice A – Exemplo de planilha de campo e fotos de um ponto amostral

Para cada elemento amostral observado em campo foi preenchida uma planilha de campo (Figura 01), tomada uma fotografia do ponto e nas direções norte, leste, sul e oeste do elemento amostral (Figura 02).

Planilha de campo para o levantamento dos pontos de macrófitas.

1. Identificação do ponto

Ponto - ID	Latitude	Longitude	Data	Hora
05-SP	22.0422.1	54.0915.3	25/04/2023	12:56

2. Características da vegetação no ponto

Planta	Espécie: <i>Paratuberosa</i>	Observações:
Altura: 12		Paratuberosa + pe' de sapo faca maridada folhas com lacrimação
Fenologia: <i>Arbustiva</i>		
Haste: Altura: 12		
Diâmetro: 0.5		
Densidade: 50		
Inclinação: 20		
Folhas	Quantia/haste:	
Compr.: 8		
Largura: 6		
Inclinação: 80		Fotos: 300

3. Características da vegetação ao redor do ponto

Espécie predominante: *Paratuberosa* + *pe' de sapo*

	Espécie	Fenologia	Densidade (qualitativa)	Foto
Norte	<i>Paratuberosa</i> + <i>pe' de sapo</i>			34
Leste	<i>Paratuberosa</i>			35
Oeste	<i>Paratuberosa</i> + <i>pe' de sapo</i>			37
Sul	<i>Paratuberosa</i>			36

Outras espécies:

4. Descrição geral do entorno amostral

Outras fotos:

pe' de sapo *Paratuberosa*

Figura 01. Planilha de campo.



Ponto L0662



Norte do ponto L0662



Leste do ponto L0662



Sul do ponto L0662



Oeste do ponto L0662

Figura 02. Fotografia do elemento amostral L0662 (no topo) e fotografias ao norte, leste, sul e oeste do elemento.

Apêndice B – Determinação da média espacial 7x1 pixels aplicada na matriz de covariância

A média espacial de 7x1 foi determinada da seguinte maneira: a imagem de radar é adquirida em *slant range* (S), com espaçamento linear e em pixel de 3,588 m e 9,3685 m, respectivamente. Portanto, cada pixel corresponde a uma dimensão retangular do terreno. Para determinar a dimensão aproximadamente quadrada, a imagem deveria ser projetada para o plano do terreno (Sq). A imagem, na direção do espaçamento em pixel, é influenciada pelo ângulo de incidência (Figura 01).

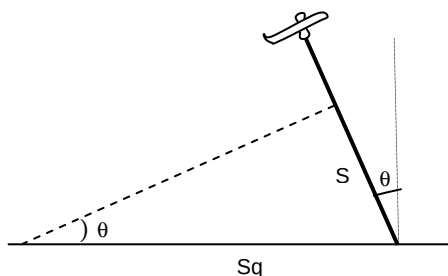


Figura 01. Geometria de aquisição da imagem.

θ é o ângulo de incidência de $23,985^{\circ}$. A fórmula para projetar a imagem de *slant range* (S) para o plano do terreno (Sq) para o espaçamento em pixel (resolução em range) é:

$$\begin{aligned} Sq &= S/\sin\theta \\ Sq &= 9,3685/\sin(23,985) \\ Sq &= 9,3685/0,406497 \\ Sq &= 23,04688 \text{ m} \end{aligned}$$

Portanto, o espaçamento linear (resolução azimuthal) deveria ser multiplicado por 7 para tornar o mais próximo possível da resolução em range:

$$3.588 * 7 = 25.116 \text{ m}$$

De forma resumida, a média espacial converte o espaçamento de 3,59 m em azimuth x 9,37 m em range para 25,12 m em azimuth x 23,04 m em range da imagem em *slant range* projetada no terreno.

Apêndice C – Quantidade de pixels dos elementos amostrais de treinamento e validação para a classificação

A seguir são apresentadas Tabelas com a quantidade de pixels de cada elemento amostral utilizado na classificação: a Tabela 1 e a Tabela 2 referem-se aos elementos amostrais de treinamento e validação, respectivamente, para a espécie *P. repens*; a Tabela 3 e a Tabela 4 referem-se aos elementos amostrais de treinamento e validação, respectivamente, para a espécie *H. amplexicaulis*; a Tabela 5 e a Tabela 6 referem-se aos elementos amostrais de treinamento e validação, respectivamente, para a espécie *P. elephantipes*.

Tabela 01. Quantidade de pixel dos elementos amostrais de treinamento para a espécie *P. repens*.

<i>P. repens</i> – Elementos de treinamento			
Elemento	n. pixels	Elemento	n. pixels
L0111	30	L0446	35
L0222	25+25	L0447	24
L0328	8	L0551	9
L0329	28	L0662	164
L0332	16	L0777	8
L0334	16	L0778	12
L0434	25	L0779	60
L0435	8	L0785	27
L0439 e L0439_d1	30	L0892	30
L0441_d1 e L0441_d2	26	L0995	30
L0442_d1 e L0442_d2	49	L0995_d1	20
L0444_d1 e L0444_d2	72	L0996	29
L0445_d1 e L0445_d2	100	L09101	13
...	...	Total	919

Tabela 02. Quantidade de pixel dos elementos amostrais de validação para a espécie *P. repens*.

<i>P. repens</i> – Elementos de validação			
Elemento	n. pixels	Elemento	n. pixels
L0219	40	L0780	100
L0223 e L0223_d2	29	L0783_d1 e L0783_d2	27
L0775_d1 e L0775_d2	132	L0887_d1 e L0887_d2	81
...	...	Total	409

Tabela 03. Quantidade de pixel dos elementos amostrais de treinamento para a espécie *H. amplexicaulis*.

<i>H. amplexicaulis</i> – Elementos de treinamento	
Elemento	n. pixels
L3104 e L3105	38
L0225	55
L0325	28
L0550	64
L0552	21
L0554	59
L0559	25
L0661	25
L0440	25
Total	340

Tabela 04. Quantidade de pixel dos elementos amostrais de validação para a espécie *H. amplexicaulis*.

<i>H. amplexicaulis</i> – Elementos de validação	
Elemento	n. pixels
L0109_d1 e L0109_d2	40
L0110	42
L0116	10
L0668	35
Total	127

Tabela 05. Quantidade de pixel dos elementos amostrais de treinamento para a espécie *P. elephantipes*.

<i>P. elephantipes</i> – Elementos de treinamento	
Elemento	n. pixels
L0665	30
L0667	25
L0670	25
L0886_1	35
L0888	30
L0891	28
Total	173

Tabela 06. Quantidade de pixel dos elementos amostrais de validação para a espécie *P. elephantipes*.

<i>P. elephantipes</i> – Elementos de validação	
Elemento	n. pixels
L0776	10
L0889	20
L0890_d1	35
Total	65

Apêndice D – Valores dos atributos para cada elemento amostral

Na Tabela 01 são apresentados os valores dos atributos para cada elemento amostral. Estes valores correspondem à média dos pixels na área de 50 m x 50 m em torno da coordenada coletada em campo. Também, são apresentados os valores de média e desvio padrão para cada conjunto de elemento de treinamento (trein) e validação (valid), por espécie (PR: *Paspalum repens*, HA: *Hymenachne amplexicaulis* e PE: *Panicum elephantipes*).

Tabela 01. Valores dos atributos para cada elemento amostral. Média e desvio padrão para cada conjunto de elemento de treinamento e validação, por espécie.

Elemento	Espécie	σ_{linHH}^0	σ_{linHV}^0	σ_{linVV}^0	$\frac{\sigma_{linHH}^0}{\sigma_{linHV}^0}$	$\frac{\sigma_{linVV}^0}{\sigma_{linHH}^0}$	$\frac{\sigma_{linVV}^0}{\sigma_{linHV}^0}$	Span	BMI	CSI	VSI
<i>Paspalum repens</i> – Elementos de treinamento											
L0222_1	PR_trein	0.080	0.014	0.027	3.329	0.583	1.935	0.121	0.054	0.251	0.212
L0434d	PR_trein	0.086	0.022	0.108	2.878	1.116	3.209	0.216	0.097	0.558	0.183
L0329d_1	PR_trein	0.148	0.032	0.038	3.057	0.504	1.544	0.218	0.093	0.206	0.253
L0447d_1	PR_trein	0.028	0.002	0.035	4.925	1.137	5.602	0.066	0.032	0.562	0.069
L0785d	PR_trein	0.185	0.045	0.061	2.880	0.570	1.638	0.291	0.123	0.248	0.267
L0435d	PR_trein	0.170	0.062	0.121	2.386	0.845	2.008	0.353	0.145	0.416	0.298
L0441d_1	PR_trein	0.084	0.022	0.038	2.784	0.673	1.872	0.143	0.061	0.312	0.263
L0441d_2	PR_trein	0.085	0.022	0.039	2.814	0.678	1.908	0.145	0.062	0.313	0.259
L0442d_1	PR_trein	0.071	0.012	0.022	3.494	0.558	1.945	0.105	0.047	0.238	0.202
L0442d_2	PR_trein	0.080	0.012	0.018	3.666	0.471	1.738	0.111	0.049	0.182	0.201
L0111d	PR_trein	0.059	0.017	0.026	2.530	0.720	1.766	0.102	0.042	0.304	0.288
L0334d	PR_trein	0.214	0.054	0.079	2.840	0.607	1.723	0.348	0.147	0.271	0.270
L0328	PR_trein	0.097	0.037	0.067	2.275	0.825	1.873	0.202	0.082	0.410	0.312
L0445_2	PR_trein	0.129	0.019	0.041	3.659	0.563	2.061	0.189	0.085	0.241	0.185
L0445d	PR_trein	0.159	0.025	0.058	3.577	0.601	2.151	0.242	0.108	0.266	0.191
L0892d_1	PR_trein	0.148	0.035	0.086	2.950	0.762	2.253	0.269	0.117	0.367	0.231
L0332d	PR_trein	0.094	0.017	0.030	3.479	0.568	1.965	0.141	0.062	0.240	0.216
L0439	PR_trein	0.036	0.006	0.043	3.455	1.095	3.780	0.084	0.039	0.546	0.135
L0439d_1	PR_trein	0.020	0.004	0.022	3.299	1.047	3.449	0.045	0.021	0.523	0.151
L0444d_1	PR_trein	0.107	0.016	0.035	3.670	0.568	2.084	0.158	0.071	0.243	0.185
L0444d_2	PR_trein	0.102	0.019	0.034	3.292	0.573	1.892	0.155	0.068	0.247	0.220
L0777d_1	PR_trein	0.065	0.008	0.057	4.563	0.920	4.346	0.129	0.061	0.467	0.110
L0996d	PR_trein	0.103	0.016	0.027	3.635	0.515	1.847	0.145	0.065	0.205	0.195
L0995d	PR_trein	0.064	0.015	0.023	2.794	0.666	1.806	0.101	0.043	0.261	0.254
L0995d_1	PR_trein	0.080	0.022	0.026	2.913	0.571	1.666	0.128	0.053	0.247	0.294
L0446d	PR_trein	0.064	0.022	0.028	2.408	0.670	1.601	0.114	0.046	0.303	0.325
L0551d_1	PR_trein	0.219	0.049	0.096	2.993	0.677	1.964	0.363	0.157	0.306	0.236
L0779d	PR_trein	0.094	0.020	0.032	3.063	0.586	1.796	0.146	0.063	0.255	0.245
L0662d_1	PR_trein	0.096	0.024	0.041	2.888	0.646	1.897	0.161	0.068	0.297	0.261
L09101_1	PR_trein	0.158	0.055	0.061	2.420	0.620	1.510	0.274	0.110	0.280	0.333
L0778d	PR_trein	0.179	0.015	0.134	5.116	1.047	5.350	0.328	0.156	0.429	0.087
<i>Paspalum repens</i> – Elementos de validação											
L0219_1	PR_valid	0.054	0.013	0.019	2.847	0.604	1.704	0.086	0.037	0.257	0.259
L0223d	PR_valid	0.177	0.043	0.042	2.867	0.485	1.396	0.263	0.110	0.193	0.283
L0223d_2	PR_valid	0.145	0.036	0.047	2.888	0.571	1.658	0.228	0.096	0.245	0.275
L0775d_1	PR_valid	0.126	0.021	0.031	3.441	0.510	1.724	0.179	0.079	0.198	0.214
L0775d_2	PR_valid	0.137	0.033	0.034	2.867	0.503	1.441	0.204	0.086	0.202	0.279
L0780_1	PR_valid	0.067	0.018	0.026	2.688	0.624	1.674	0.111	0.046	0.279	0.286
L0783d_1	PR_valid	0.119	0.023	0.044	3.197	0.612	1.930	0.186	0.081	0.269	0.223
L0783d_2	PR_valid	0.127	0.022	0.040	3.437	0.566	1.944	0.189	0.084	0.241	0.204
L0887d_1	PR_valid	0.142	0.020	0.040	3.787	0.525	1.990	0.202	0.091	0.219	0.178
L0887d_2	PR_valid	0.177	0.031	0.058	3.371	0.571	1.923	0.266	0.117	0.246	0.210

Tabela 1. continuação

Elemento	Espécie	σ_{linHH}^0	σ_{linHV}^0	σ_{linVV}^0	$\frac{\sigma_{linHH}^0}{\sigma_{linHV}^0}$	$\frac{\sigma_{linVV}^0}{\sigma_{linHH}^0}$	$\frac{\sigma_{linVV}^0}{\sigma_{linHV}^0}$	Span	BMI	CSI	VSI
<i>Hymenachne amplexicaulis</i> – Elementos de treinamento											
L0559d	HA_trein	0.056	0.025	0.019	2.015	0.605	1.175	0.100	0.037	0.249	0.405
L0661d	HA_trein	0.104	0.017	0.027	3.604	0.505	1.806	0.147	0.065	0.204	0.207
L3104d_1	HA_trein	0.032	0.007	0.017	3.044	0.721	2.200	0.056	0.024	0.344	0.222
L3105d	HA_trein	0.057	0.008	0.022	3.847	0.626	2.408	0.088	0.040	0.282	0.164
L0440d_1	HA_trein	0.078	0.018	0.015	3.126	0.470	1.480	0.111	0.046	0.165	0.275
L0552d	HA_trein	0.281	0.051	0.095	3.354	0.585	1.949	0.427	0.188	0.253	0.215
L0554d	HA_trein	0.142	0.049	0.088	2.408	0.782	1.885	0.279	0.115	0.382	0.299
L0325	HA_trein	0.015	0.004	0.010	2.848	0.814	2.330	0.028	0.012	0.405	0.225
L0225d	HA_trein	0.008	0.003	0.007	2.494	0.981	2.423	0.018	0.008	0.480	0.248
L0550d	HA_trein	0.138	0.036	0.055	2.780	0.626	1.736	0.229	0.096	0.283	0.273
<i>Hymenachne amplexicaulis</i> – Elementos de validação											
L0109d_1	HA_valid	0.035	0.006	0.013	3.382	0.617	2.082	0.054	0.024	0.274	0.204
L0109d_2	HA_valid	0.022	0.004	0.007	3.527	0.576	2.029	0.033	0.015	0.250	0.198
L0116	HA_valid	0.015	0.003	0.007	3.118	0.679	2.117	0.025	0.011	0.317	0.220
L0110	HA_valid	0.016	0.002	0.011	3.647	0.830	3.038	0.029	0.013	0.406	0.157
L0668_1	HA_valid	0.133	0.015	0.025	4.174	0.456	1.840	0.172	0.079	0.156	0.157
<i>Paspalum elephantipes</i> – Elementos de treinamento											
L0667d	PE_trein	0.041	0.011	0.022	2.741	0.727	1.991	0.075	0.032	0.347	0.263
L0670	PE_trein	0.093	0.002	0.149	8.989	1.267	11.360	0.245	0.121	0.615	0.020
L0886_1	PE_trein	0.061	0.003	0.080	6.159	1.145	7.100	0.144	0.070	0.569	0.045
L0888	PE_trein	0.065	0.007	0.069	4.393	1.031	4.510	0.141	0.067	0.514	0.093
L0891	PE_trein	0.052	0.009	0.051	3.311	1.004	3.329	0.113	0.052	0.493	0.155
L0665d	PE_trein	0.042	0.013	0.035	2.552	0.908	2.313	0.090	0.038	0.452	0.251
<i>Paspalum elephantipes</i> – Elementos de validação											
L0776d	PE_valid	0.056	0.015	0.031	2.761	0.744	2.046	0.102	0.044	0.358	0.252
L0889	PE_valid	0.083	0.039	0.050	2.071	0.775	1.594	0.172	0.067	0.379	0.370
L0890d_1	PE_valid	0.049	0.013	0.072	2.767	1.165	3.304	0.135	0.061	0.596	0.176
Média e desvio padrão para os elementos de treinamento e validação para cada espécie											
Média	PR_trein	0.106	0.024	0.050	3.227	0.709	2.328	0.180	0.078	0.322	0.223
Desvio pad		0.052	0.015	0.031	0.685	0.196	1.071	0.088	0.038	0.111	0.066
Média	PR_valid	0.127	0.026	0.038	3.139	0.557	1.738	0.192	0.083	0.235	0.241
Desvio pad		0.040	0.009	0.011	0.359	0.049	0.209	0.058	0.025	0.030	0.040
Média	HA_trein	0.091	0.022	0.035	2.952	0.671	1.939	0.148	0.063	0.305	0.253
Desvio pad		0.081	0.018	0.032	0.563	0.155	0.412	0.129	0.056	0.097	0.066
Média	HA_valid	0.044	0.006	0.013	3.570	0.632	2.221	0.063	0.028	0.280	0.187
Desvio pad		0.050	0.005	0.007	0.391	0.138	0.469	0.062	0.029	0.092	0.029
Média	PE_trein	0.059	0.008	0.068	4.691	1.014	5.101	0.134	0.063	0.498	0.138
Desvio pad		0.019	0.004	0.045	2.490	0.187	3.581	0.061	0.032	0.094	0.103
Média	PE_valid	0.063	0.022	0.051	2.533	0.895	2.315	0.136	0.057	0.444	0.266
Desvio pad		0.018	0.015	0.021	0.400	0.234	0.887	0.035	0.012	0.132	0.097

Tabela 1. continuação

Elemento	Espécie	α_m	H	A	P_D	P_S	P_V	$\phi_{HH} - \phi_{VV}$	γ
<i>Paspalum repens</i> – Elementos de treinamento									
L0222_1	PR_trein	43.836	0.745	0.319	-18.764	-17.051	-11.599	-4.960	0.500
L0434d	PR_trein	24.600	0.622	0.281	-20.884	-9.198	-10.786	-134.017	0.242
L0329d_1	PR_trein	46.713	0.718	0.296	-18.723	-21.492	-7.498	-166.982	0.433
L0447d_1	PR_trein	19.121	0.445	0.570	-21.492	-12.921	-20.399	1.069	0.564
L0785d	PR_trein	48.156	0.780	0.291	-21.492	-18.479	-5.914	162.769	0.455
L0435d	PR_trein	43.384	0.863	0.257	-16.120	-13.920	-6.064	-83.538	0.252
L0441d_1	PR_trein	42.784	0.797	0.310	-19.451	-14.731	-10.685	-10.027	0.345
L0441d_2	PR_trein	43.993	0.806	0.279	-19.412	-14.775	-10.726	-166.149	0.387
L0442d_1	PR_trein	47.752	0.710	0.283	-14.729	-19.379	-13.309	0.929	0.584
L0442d_2	PR_trein	41.570	0.589	0.179	-21.492	-18.957	-10.889	-153.595	0.564
L0111d	PR_trein	47.605	0.842	0.281	-20.047	-21.373	-10.793	3.423	0.384
L0334d	PR_trein	45.022	0.784	0.288	-21.492	-14.945	-5.857	-76.292	0.387
L0328	PR_trein	46.414	0.867	0.357	-16.913	-18.212	-8.189	12.061	0.259
L0445_2	PR_trein	41.953	0.690	0.366	-19.298	-10.017	-11.146	172.632	0.544
L0445d	PR_trein	50.044	0.714	0.428	-8.967	-18.769	-10.006	-168.394	0.657
L0892d_1	PR_trein	44.771	0.833	0.419	-12.971	-12.217	-8.648	171.765	0.475
L0332d	PR_trein	46.034	0.714	0.368	-20.454	-14.774	-11.533	6.187	0.564
L0439	PR_trein	22.849	0.580	0.367	-21.480	-12.802	-16.309	-93.086	0.337
L0439d_1	PR_trein	30.985	0.700	0.510	-21.318	-16.283	-18.394	-3.963	0.477
L0444d_1	PR_trein	48.052	0.738	0.392	-11.052	-18.433	-11.951	-82.596	0.632
L0444d_2	PR_trein	47.426	0.759	0.297	-13.796	-20.355	-10.585	-82.742	0.549
L0777d_1	PR_trein	28.161	0.590	0.602	-18.220	-11.211	-15.806	-78.885	0.587
L0996d	PR_trein	42.246	0.669	0.258	-21.492	-11.008	-12.075	-168.514	0.518
L0995d	PR_trein	47.466	0.808	0.350	-18.008	-21.492	-12.026	169.288	0.439
L0995d_1	PR_trein	44.794	0.742	0.242	-21.318	-19.401	-10.193	-144.499	0.425
L0446d	PR_trein	41.457	0.801	0.176	-21.492	-21.492	-9.544	-117.315	0.208
L0551d_1	PR_trein	40.446	0.728	0.328	-17.339	-12.343	-6.270	-3.044	0.371
L0779d	PR_trein	48.061	0.782	0.323	-14.606	-20.803	-10.464	-156.456	0.537
L0662d_1	PR_trein	41.697	0.758	0.358	-18.514	-18.661	-9.580	81.874	0.360
L09101_1	PR_trein	46.916	0.819	0.213	-18.998	-21.492	-6.081	27.472	0.343
L0778d	PR_trein	19.181	0.418	0.546	-18.666	-7.468	-14.853	-168.447	0.555
<i>Paspalum repens</i> – Elementos de validação									
L0219_1	PR_valid	44.425	0.729	0.299	-19.459	-19.131	-12.327	-77.372	0.377
L0223d	PR_valid	45.860	0.738	0.190	-21.492	-18.263	-6.507	-80.950	0.332
L0223d_2	PR_valid	49.865	0.757	0.172	-18.749	-18.550	-7.897	-73.278	0.477
L0775d_1	PR_valid	52.746	0.701	0.225	-15.205	-21.492	-9.703	-168.788	0.616
L0775d_2	PR_valid	53.282	0.660	0.229	-21.492	-21.492	-6.919	-151.162	0.581
L0780_1	PR_valid	47.596	0.826	0.226	-17.876	-21.492	-10.499	5.214	0.394
L0783d_1	PR_valid	45.819	0.775	0.315	-16.851	-13.618	-10.299	-164.829	0.507
L0783d_2	PR_valid	44.592	0.726	0.334	-16.757	-16.098	-9.830	-172.243	0.536
L0887d_1	PR_valid	44.409	0.694	0.324	-18.868	-9.754	-11.038	-84.729	0.588
L0887d_2	PR_valid	46.908	0.758	0.317	-13.990	-13.225	-9.040	-2.040	0.553

Tabela 1. continuação

Elemento	Espécie	α_m	H	A	P_D (dB)	P_S (dB)	P_V (dB)	$\phi_{HH} - \phi_{VV}$	γ
<i>Hymenachne amplexicaulis</i> – Elementos de treinamento									
L0559d	HA_trein	49.125	0.836	0.336	-21.492	-21.492	-10.539	39.912	0.178
L0661d	HA_trein	46.095	0.705	0.283	-16.269	-18.135	-11.359	-0.018	0.547
L3104d_1	HA_trein	39.943	0.777	0.369	-21.492	-16.518	-15.585	83.204	0.402
L3105d	HA_trein	41.839	0.720	0.482	-18.955	-13.655	-15.105	-176.477	0.600
L0440d_1	HA_trein	49.415	0.651	0.321	-19.924	-21.492	-10.789	-154.760	0.579
L0552d	HA_trein	45.615	0.759	0.316	-14.064	-13.386	-6.306	84.509	0.522
L0554d	HA_trein	39.796	0.830	0.169	-20.566	-13.559	-6.818	-148.447	0.174
L0325	HA_trein	43.457	0.775	0.348	-21.373	-19.621	-18.588	167.971	0.425
L0225d	HA_trein	49.211	0.874	0.451	-21.492	-21.492	-19.903	-167.151	0.506
L0550d	HA_trein	42.377	0.786	0.203	-21.492	-15.949	-7.586	-159.048	0.314
<i>Hymenachne amplexicaulis</i> – Elementos de validação									
L0109d_1	HA_valid	44.444	0.738	0.318	-18.604	-18.768	-16.141	-84.883	0.526
L0109d_2	HA_valid	42.023	0.719	0.315	-21.492	-17.829	-18.438	-168.806	0.515
L0116	HA_valid	47.396	0.815	0.412	-20.616	-21.224	-19.156	-161.120	0.555
L0110	HA_valid	41.180	0.775	0.587	-20.690	-19.645	-20.228	-171.749	0.618
L0668_1	HA_valid	46.319	0.603	0.330	-16.641	-18.065	-11.172	4.979	0.665
<i>Paspalum elephantipes</i> – Elementos de treinamento									
L0667d	PE_trein	47.257	0.836	0.373	-16.204	-20.941	-13.550	-153.416	0.479
L0670	PE_trein	9.878	0.153	0.455	-21.492	-6.406	-20.109	80.299	0.611
L0886_1	PE_trein	12.343	0.315	0.499	-21.198	-9.071	-18.876	-83.716	0.528
L0888	PE_trein	20.874	0.536	0.549	-18.898	-10.043	-15.704	79.733	0.532
L0891	PE_trein	23.804	0.603	0.342	-20.705	-12.052	-14.486	16.968	0.294
L0665d	PE_trein	42.986	0.859	0.393	-19.144	-16.088	-12.899	-156.229	0.413
<i>Paspalum elephantipes</i> – Elementos de validação									
L0776d	PE_valid	46.722	0.814	0.320	-17.494	-19.804	-11.810	-161.984	0.465
L0889	PE_valid	45.414	0.885	0.202	-21.492	-21.492	-7.725	-93.588	0.159
L0890d_1	PE_valid	32.650	0.625	0.466	-21.492	-14.805	-12.978	88.871	0.377
Média e desvio padrão para os elementos de treinamento e validação para cada espécie									
Média	PR_trein	41.080	0.723	0.340	-18.355	-16.273	-10.909	-40.453	0.449
Desvio padrão	PR_trein	8.981	0.109	0.105	3.320	4.139	3.528	108.655	0.121
Média	PR_valid	47.550	0.737	0.263	-18.074	-17.311	-9.406	-97.018	0.496
Desvio padrão	PR_valid	3.331	0.046	0.061	2.462	4.043	1.840	65.972	0.098
Média	HA_trein	44.687	0.771	0.328	-19.712	-17.530	-12.258	-43.031	0.425
Desvio padrão	HA_trein	3.753	0.067	0.097	2.593	3.388	4.836	131.539	0.157
Média	HA_valid	44.272	0.730	0.392	-19.609	-19.106	-17.027	-116.316	0.576
Desvio padrão	HA_valid	2.674	0.080	0.116	1.971	1.379	3.600	76.707	0.064
Média	PE_trein	26.190	0.550	0.435	-19.607	-12.433	-15.937	-36.060	0.476
Desvio padrão	PE_trein	15.606	0.280	0.079	1.979	5.277	2.937	109.767	0.111
Média	PE_valid	41.595	0.775	0.329	-20.159	-18.700	-10.837	-55.567	0.334
Desvio padrão	PE_valid	7.775	0.134	0.132	2.308	3.477	2.758	129.677	0.158

Tabela 1. continuação

Elemento	Espécie	α_{s1}	α_{s2}	α_{s3}	α_{sm}	ϕ_{as1}	ϕ_{as2}	ϕ_{as3}	ϕ_{asm}
<i>Paspalum repens</i> – Elementos de treinamento									
L0222_1	PR_trein	33.848	56.742	75.648	42.957	-4.549	6.003	30.897	1.315
L0434d	PR_trein	4.724	73.087	57.729	18.881	-5.019	-17.435	9.374	-5.236
L0329d_1	PR_trein	38.727	58.139	56.260	44.135	-7.440	-2.730	-11.914	-6.860
L0447d_1	PR_trein	7.816	78.654	83.430	18.213	-27.664	22.662	-2.824	-21.463
L0785d	PR_trein	40.380	57.031	68.945	47.736	-18.290	19.243	18.160	-6.082
L0435d	PR_trein	17.895	63.302	64.253	36.510	-12.360	7.458	50.371	0.668
L0441d_1	PR_trein	27.232	64.985	73.098	41.548	15.795	-15.916	-6.948	5.649
L0441d_2	PR_trein	29.985	60.352	77.107	42.855	18.937	-22.316	-16.161	5.613
L0442d_1	PR_trein	42.354	47.312	76.935	46.846	-27.529	22.761	3.116	-14.884
L0442d_2	PR_trein	35.332	50.880	52.958	38.401	-7.742	2.190	-41.733	-9.005
L0111d	PR_trein	30.584	58.661	68.374	45.009	9.067	7.257	37.240	13.736
L0334d	PR_trein	33.094	56.137	58.709	41.491	9.759	-6.435	-28.552	2.308
L0328	PR_trein	28.435	50.733	65.014	39.799	-38.267	26.393	-3.961	-13.427
L0445_2	PR_trein	32.591	58.831	77.607	41.350	-14.333	9.076	22.685	-6.669
L0445d	PR_trein	48.275	38.146	66.071	47.696	-27.041	17.896	-52.800	-20.076
L0892d_1	PR_trein	28.770	61.945	79.242	44.067	-15.479	15.860	-29.715	-8.414
L0332d	PR_trein	38.510	51.743	69.767	44.279	-9.013	-1.647	-31.976	-8.851
L0439	PR_trein	6.029	79.266	80.049	21.089	-18.485	19.874	35.605	-9.681
L0439d_1	PR_trein	6.488	63.189	77.665	24.370	-42.744	56.485	-4.590	-15.699
L0444d_1	PR_trein	43.267	45.928	66.740	45.950	-9.418	7.707	-60.605	-10.794
L0444d_2	PR_trein	40.672	50.015	79.289	46.905	-17.580	18.311	17.353	-6.376
L0777d_1	PR_trein	12.200	70.649	70.877	25.975	7.250	-12.189	-33.983	3.764
L0996d	PR_trein	33.408	52.057	52.018	38.483	-15.139	13.001	-11.883	-10.790
L0995d	PR_trein	35.827	51.066	52.197	41.577	-2.568	5.746	13.911	-0.493
L0995d_1	PR_trein	35.309	62.963	64.094	43.465	12.696	-13.278	-24.745	4.625
L0446d	PR_trein	23.026	46.077	56.756	32.465	-12.796	15.161	0.430	-5.453
L0551d_1	PR_trein	23.192	66.293	71.198	38.303	12.968	-10.334	-14.366	4.106
L0779d	PR_trein	41.998	49.245	75.677	47.393	3.410	0.381	31.923	5.505
L0662d_1	PR_trein	28.130	62.158	68.125	39.424	-2.269	9.893	-1.467	3.078
L09101_1	PR_trein	34.160	55.703	55.685	41.877	17.294	-24.852	35.292	11.264
L0778d	PR_trein	9.139	70.068	73.037	17.015	17.428	-17.962	21.159	13.033
<i>Paspalum repens</i> – Elementos de validação									
L0219_1	PR_valid	35.511	51.752	67.692	42.330	-27.902	15.936	30.102	-11.832
L0223d	PR_valid	35.068	72.563	58.345	44.484	-7.408	-29.617	7.491	-9.831
L0223d_2	PR_valid	43.094	49.029	69.763	47.991	-19.324	15.843	37.723	-5.910
L0775d_1	PR_valid	51.588	39.737	65.059	50.672	-16.799	27.838	39.494	-2.734
L0775d_2	PR_valid	51.093	55.802	49.598	51.654	-25.765	41.383	21.948	-10.924
L0780_1	PR_valid	37.153	53.696	68.651	45.544	-16.536	7.251	-4.362	-9.119
L0783d_1	PR_valid	35.742	52.860	69.621	43.602	-16.600	15.070	-22.395	-9.867
L0783d_2	PR_valid	36.253	52.424	66.998	42.580	-17.545	14.790	-10.657	-9.987
L0887d_1	PR_valid	36.898	52.470	78.349	43.590	-7.694	7.307	-25.293	-6.421
L0887d_2	PR_valid	39.852	50.216	78.760	46.232	-11.202	9.827	24.496	-2.781

Tabela 1. continuação

Elemento	Espécie	α_{s1}	α_{s2}	α_{s3}	α_{sm}	ϕ_{as1}	ϕ_{as2}	ϕ_{as3}	ϕ_{asm}
<i>Hymenachne amplexicaulis</i> – Elementos de treinamento									
L0559d	HA_trein	32.753	57.949	57.183	43.253	-17.809	12.398	14.059	-3.317
L0661d	HA_trein	39.697	54.458	72.970	45.688	-8.049	5.734	11.125	-4.068
L3104d_1	HA_trein	22.405	63.540	65.172	36.418	4.106	-2.108	48.092	7.308
L3105d	HA_trein	30.706	58.052	78.001	40.638	-3.199	4.839	-6.279	-1.444
L0440d_1	HA_trein	44.253	51.175	61.361	47.124	8.084	-19.730	7.992	3.796
L0552d	HA_trein	36.391	53.794	78.732	44.832	-3.109	1.902	-18.222	-4.970
L0554d	HA_trein	15.710	72.638	71.847	36.850	5.791	-26.006	21.912	1.802
L0325	HA_trein	28.794	45.899	74.434	38.005	-27.185	18.469	4.590	-10.806
L0225d	HA_trein	40.167	48.856	79.465	47.824	-19.354	21.723	15.203	-3.049
L0550d	HA_trein	27.802	57.323	44.042	35.621	-8.800	10.127	15.571	-1.177
<i>Hymenachne amplexicaulis</i> – Elementos de validação									
L0109d_1	HA_valid	35.033	53.335	67.000	42.090	-26.434	25.351	-52.847	-19.108
L0109d_2	HA_valid	31.440	57.644	71.220	40.458	-3.129	2.509	-33.623	-4.978
L0116	HA_valid	38.552	51.587	83.061	47.066	0.521	-0.073	20.548	2.336
L0110	HA_valid	23.153	66.634	81.236	40.559	-36.043	35.542	-13.296	-12.450
L0668_1	HA_valid	42.303	50.100	58.992	44.544	-13.995	17.417	31.324	-5.037
<i>Paspalum elephantipes</i> – Elementos de treinamento									
L0667d	PE_trein	36.132	51.605	60.952	43.465	-22.887	20.962	-23.732	-9.782
L0670	PE_trein	7.177	80.411	73.231	9.681	-7.706	8.553	-37.488	-7.642
L0886_1	PE_trein	4.805	83.670	85.419	12.026	-4.158	13.464	2.673	-2.806
L0888	PE_trein	5.088	68.464	77.800	17.781	-45.022	41.913	4.003	-29.606
L0891	PE_trein	5.828	77.947	68.832	21.008	-1.525	13.460	38.760	3.834
L0665d	PE_trein	16.158	70.356	80.898	40.831	-27.539	16.873	21.005	-7.136
<i>Paspalum elephantipes</i> – Elementos de validação									
L0776d	PE_valid	36.148	48.942	75.072	44.265	-44.691	37.343	-26.352	-22.124
L0889	PE_valid	24.414	43.633	34.751	31.066	-21.557	5.043	-12.645	-13.488
L0890d_1	PE_valid	13.389	58.738	61.670	24.371	3.279	-18.288	1.808	-9.584
Média e desvio padrão para os elementos de treinamento e validação para cada espécie									
Média	PR_trein	28.755	58.431	68.211	38.260	-6.810	5.105	-1.636	-3.406
Desvio padrão	PR_trein	12.311	9.690	9.235	9.404	16.542	17.400	28.136	9.281
Média	PR_valid	40.225	53.055	67.284	45.868	-16.678	12.563	9.855	-7.941
Desvio padrão	PR_valid	6.332	8.115	8.599	3.281	6.774	18.073	24.335	3.284
Média	HA_trein	31.868	56.368	68.321	41.625	-6.952	2.735	11.404	-1.593
Desvio padrão	HA_trein	8.710	7.642	11.400	4.692	11.668	15.364	17.460	5.027
Média	HA_valid	34.096	55.860	72.302	42.944	-15.816	16.149	-9.579	-7.847
Desvio padrão	HA_valid	7.330	6.653	10.025	2.835	15.436	15.096	35.513	8.183
Média	PE_trein	12.532	72.076	74.522	24.132	-18.140	19.204	0.870	-8.856
Desvio padrão	PE_trein	12.319	11.605	8.813	14.547	16.817	11.862	28.038	11.256
Média	PE_valid	24.650	50.438	57.164	33.234	-20.990	8.033	-12.396	-15.065
Desvio padrão	PE_valid	11.381	7.662	20.535	10.123	23.990	27.936	14.081	6.417

Tabela 1. continuação

Elemento	Espécie	τ_1	τ_2	τ_3	τ_m	ψ_{t1}	ψ_{t2}	ψ_{t3}	ψ_{tm}
<i>Paspalum repens</i> – Elementos de treinamento									
L0222_1	PR_trein	0.824	4.349	-6.583	0.876	1.517	82.127	-52.395	12.545
L0434d	PR_trein	-2.103	32.891	2.253	3.424	-1.003	9.208	-49.048	-2.359
L0329d_1	PR_trein	-0.156	-18.617	19.230	-1.591	6.309	74.738	-65.222	11.776
L0447d_1	PR_trein	-0.780	-14.948	14.471	-1.900	-72.263	0.340	43.500	-60.435
L0785d	PR_trein	0.162	-1.062	6.246	0.682	-0.387	70.471	-58.405	8.190
L0435d	PR_trein	1.688	23.591	-12.798	4.224	12.662	-1.893	-49.661	1.537
L0441d_1	PR_trein	0.411	6.357	-10.106	0.221	5.113	77.907	-52.445	15.029
L0441d_2	PR_trein	-1.584	8.229	-8.089	-0.040	-0.698	3.403	5.418	-1.017
L0442d_1	PR_trein	-0.777	-3.485	-2.206	-1.837	1.184	38.223	-26.477	5.124
L0442d_2	PR_trein	-2.771	-2.009	1.742	-2.727	7.125	-83.833	3.677	-2.418
L0111d	PR_trein	-5.075	6.399	-8.025	-2.749	3.961	36.444	-50.358	3.620
L0334d	PR_trein	0.858	12.384	-11.505	2.619	5.221	-45.073	15.312	-4.839
L0328	PR_trein	1.722	-7.149	19.923	2.235	-15.611	-44.764	55.465	-15.009
L0445_2	PR_trein	2.920	-3.399	15.009	2.785	0.120	79.478	-50.597	10.568
L0445d	PR_trein	0.239	-8.805	14.335	-0.906	3.191	41.354	-24.133	9.976
L0892d_1	PR_trein	-2.775	-3.979	8.502	-2.044	0.265	42.661	-25.737	10.247
L0332d	PR_trein	-1.696	10.617	-22.034	-1.274	-1.250	-78.907	55.637	-11.443
L0439	PR_trein	0.073	22.564	-16.552	2.283	-70.151	-1.092	41.062	-53.249
L0439d_1	PR_trein	1.538	36.519	4.130	9.845	13.404	-12.360	-3.623	4.001
L0444d_1	PR_trein	0.288	-6.620	33.363	2.008	2.267	-0.891	-53.992	-4.137
L0444d_2	PR_trein	1.992	3.093	-9.508	0.922	1.046	-41.925	0.652	-8.308
L0777d_1	PR_trein	-1.153	6.361	4.058	1.789	-24.659	24.659	42.844	-16.026
L0996d	PR_trein	-1.091	3.291	-12.627	-1.732	2.589	-82.879	68.446	-4.916
L0995d	PR_trein	2.998	-7.248	18.828	1.433	-1.226	-2.542	-9.005	-4.165
L0995d_1	PR_trein	-2.436	-13.798	16.482	-2.527	8.967	-2.863	-28.902	1.445
L0446d	PR_trein	3.222	-3.432	5.804	2.923	-0.308	-29.192	76.982	5.902
L0551d_1	PR_trein	-1.715	9.892	-10.969	-0.250	2.086	1.250	-20.266	-0.769
L0779d	PR_trein	-0.375	-6.688	16.533	0.129	4.338	-76.059	57.080	-7.836
L0662d_1	PR_trein	0.010	-2.120	-6.082	-1.366	-4.517	42.056	2.512	3.668
L09101_1	PR_trein	0.591	6.208	11.917	3.337	7.476	5.174	39.378	10.813
L0778d	PR_trein	-0.084	-6.384	19.166	-0.405	-56.092	-15.460	47.067	-47.857
<i>Paspalum repens</i> – Elementos de validação									
L0219_1	PR_valid	-0.783	-3.936	2.325	-0.446	6.027	-8.250	-58.836	-5.036
L0223d	PR_valid	1.489	18.514	-0.912	4.247	2.006	-17.094	52.323	5.041
L0223d_2	PR_valid	-4.531	6.171	-13.521	-3.960	5.709	8.619	-18.173	2.653
L0775d_1	PR_valid	-2.565	7.303	-14.439	-2.125	4.082	38.970	-55.134	5.255
L0775d_2	PR_valid	-5.265	3.524	-5.872	-3.842	10.218	69.765	-59.852	12.521
L0780_1	PR_valid	-4.283	2.442	-6.440	-2.943	-0.187	-35.290	24.841	-5.558
L0783d_1	PR_valid	1.070	8.488	-21.180	0.018	2.491	-81.631	57.713	-9.839
L0783d_2	PR_valid	1.587	13.736	-23.790	1.471	-0.422	-37.321	24.708	-6.845
L0887d_1	PR_valid	-0.995	0.348	0.105	-0.975	1.819	44.633	-22.759	8.611
L0887d_2	PR_valid	-0.598	-5.797	19.681	0.522	-0.205	-1.752	0.109	-0.536

Tabela 1. continuação

Elemento	Espécie	τ_1	τ_2	τ_3	τ_m	ψ_{t1}	ψ_{t2}	ψ_{t3}	ψ_{tm}
<i>Hymenachne amplexicaulis</i> – Elementos de treinamento									
L0559d	HA_trein	5.365	1.080	-0.316	3.604	0.550	-36.215	39.848	-8.168
L0661d	HA_trein	0.982	-1.397	4.335	0.922	1.889	76.697	-53.717	9.480
L3104d_1	HA_trein	-2.589	-16.112	31.485	-1.951	-5.455	0.833	32.195	-0.663
L3105d	HA_trein	2.430	-7.261	-7.768	-0.390	-0.630	-42.450	5.357	-9.628
L0440d_1	HA_trein	1.347	-9.007	18.010	1.126	6.600	-1.325	0.371	3.845
L0552d	HA_trein	2.076	0.103	3.911	1.865	-1.708	-42.226	22.491	-6.582
L0554d	HA_trein	-3.167	-19.482	13.074	-4.201	-7.190	-70.226	62.823	-10.191
L0325	HA_trein	-4.581	2.668	16.856	-2.212	9.758	72.504	-49.170	21.677
L0225d	HA_trein	-4.380	-1.941	13.070	-1.514	6.599	3.950	-41.974	0.946
L0550d	HA_trein	2.187	21.527	-32.092	1.405	5.320	-39.120	-36.716	-9.177
<i>Hymenachne amplexicaulis</i> – Elementos de validação									
L0109d_1	HA_valid	-2.589	-4.797	10.508	-1.412	3.058	-0.578	-26.350	-1.208
L0109d_2	HA_valid	-0.455	6.004	-18.587	-1.195	3.697	1.187	8.525	5.289
L0116	HA_valid	-0.840	-1.304	8.123	0.012	5.160	-85.621	5.288	-19.335
L0110	HA_valid	-0.684	-8.804	6.100	-2.970	7.533	43.749	-45.236	13.214
L0668_1	HA_valid	-1.202	5.896	-17.546	-1.434	2.811	35.985	-60.156	3.213
<i>Paspalum elephantipes</i> – Elementos de treinamento									
L0667d	PE_trein	-0.389	-8.404	19.210	0.104	7.605	-40.695	-42.990	-13.155
L0670	PE_trein	-0.360	11.176	-17.498	-0.247	-1.041	-3.125	22.824	-1.664
L0886_1	PE_trein	-0.461	17.011	-24.198	0.228	-79.148	2.640	1.601	-71.948
L0888	PE_trein	0.266	20.056	21.585	3.202	17.219	25.938	-45.644	17.344
L0891	PE_trein	0.291	17.513	-22.029	0.591	22.623	26.672	-25.700	20.009
L0665d	PE_trein	-0.906	-19.958	-23.643	-9.628	19.366	2.880	-41.114	5.270
<i>Paspalum elephantipes</i> – Elementos de validação									
L0776d	PE_valid	2.243	14.361	-20.173	2.409	1.137	-72.688	53.676	-10.256
L0889	PE_valid	1.095	-29.303	37.408	-0.659	14.454	-82.374	-63.176	-24.126
L0890d_1	PE_valid	1.617	-24.506	-2.003	-5.579	37.723	13.377	-36.715	17.567
Média e desvio padrão para os elementos de treinamento e validação para cada espécie									
Média	PR_trein	-0.162	2.677	3.061	0.658	-5.140	3.541	-2.104	-4.205
Desvio padrão	PR_trein	1.871	12.938	13.623	2.656	21.628	48.676	44.233	18.438
Média	PR_valid	-1.487	5.079	-6.404	-0.803	3.154	-1.935	-5.506	0.627
Desvio padrão	PR_valid	2.558	7.487	12.760	2.556	3.405	44.821	44.628	7.358
Média	HA_trein	-0.033	-2.982	6.057	-0.135	1.573	-7.758	-1.849	-0.846
Desvio padrão	HA_trein	3.390	11.360	17.318	2.337	5.523	49.345	41.479	10.326
Média	HA_valid	-1.154	-0.601	-2.280	-1.400	4.452	-1.056	-23.586	0.235
Desvio padrão	HA_valid	0.847	6.543	14.500	1.061	1.949	51.323	30.326	12.124
Média	PE_trein	-0.260	6.232	-7.762	-0.958	-2.229	2.385	-21.837	-7.357
Desvio padrão	PE_trein	0.461	16.487	21.952	4.425	38.670	24.622	28.088	33.931
Média	PE_valid	1.652	-13.150	5.077	-1.276	17.772	-47.228	-15.405	-5.605
Desvio padrão	PE_valid	0.575	23.945	29.436	4.029	18.518	52.708	61.271	21.232