

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-6119-TDI/580**

**DISCRIMINAÇÃO DE PLANTAS AQUÁTICAS UTILIZANDO DADOS SAR  
MULTIPOLARIMÉTRICOS NA BANDA C**

**Mauricio Almeida Noernberg**

**Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, sob orientação da Dra.  
Evelyn Marcia Leão de Moraes Novo, e Dra. Thelma Krug, aprovada em agosto de 1996.**

**INPE  
São José dos Campos  
Agosto de 1996**

528.711.7:526.32

NOERNBERG, M.A.

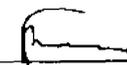
Discriminação de plantas aquáticas  
utilizando dados SAR multipolarimétricos  
na banda C / M.A. Noernberg. - São José  
dos Campos: INPE, 1996.

131p. - (INPE-6119-TDI/580)

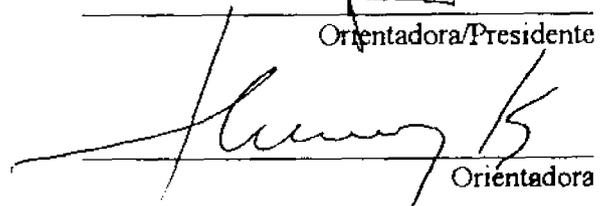
1. Plantas aquáticas. 2. Radar de  
abertura sintética (SAR). 3. Banda C.  
4. Fotografia aérea. I. Título.

Aprovada pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de Mestre em  
Sensoriamento Remoto

Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo

  
Orientadora/Presidente

Dra. Thelma Krug

  
Orientadora

Dra. Corina da Costa Freitas Yanasse

  
Membro da Banca

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro

  
Membro da Banca

Dra. Maria Victória Ramos Ballester

  
Membro da Banca  
- Convidada -

Candidato: Maurício Almeida Noernberg

São José dos Campos, 21 de agosto de 1996



Dedico este trabalho à meus pais Daltro e Ruth, que mesmo num país carente de princípios baseados na educação, acreditaram na minha capacidade, e com esforço e sacrifícios nunca descuidaram da educação de seus filhos.



## AGRADECIMENTOS

À Dra. Evlyn M. L. de Moraes Novo, pela motivação, paciência, ensinamentos e espírito crítico na orientação deste trabalho.

À Dra. Thelma Krug, pela orientação, sugestões e críticas, especialmente nos temas relacionados à análise estatística.

Ao Dr. Alejandro Frery e Dra. Corina Yanasse pela constante disponibilidade e boa vontade em colaborar com sugestões e críticas.

Aos colegas e amigos do curso de mestrado que compartilharam esta fase de busca do conhecimento em todos os aspectos de nossas vidas.

A Camilo Rennó pelos “toques” sobre o uso do IDL.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de pesquisa.

Ao Canadian Centre for Remote Sensing (CCRS) pelo fornecimento das imagens utilizadas neste estudo.

Aos funcionários do INPE que colaboraram direta ou indiretamente com este trabalho, em especial aos funcionários da Biblioteca, principalmente na pessoa da Suelena Coelho e Celina Resende que sempre estavam dispostas a ajudar.

Aos funcionários da Divisão de Sensoriamento Remoto, com especial atenção à Maria Etelvina Arbex pelo seu eterno bom humor e sua eficiência.

Às minhas irmãs pelo apoio.

À Cláudia e Leonardo pela nova dimensão que deram a minha vida.

À **Deus** pela vida.



## RESUMO

O estudo das plantas aquáticas possui grande importância, principalmente devido a dois aspectos: 1) como influenciadoras da qualidade da água, tanto nas regiões litorâneas como nos ecossistemas lacustres, devido ao seu potencial produtivo e também pelos problemas que podem causar quando da sua presença em excesso; 2) como parte dos processos que influenciam o balanço global do ciclo do Carbono, produzindo ou fixando gases responsáveis pelo efeito estufa. Este trabalho propõe avaliar as possibilidades de uso de dados de radar aerotransportado multipolarimétrico na banda C, para discriminar gêneros de plantas aquáticas, em função das diferenças em suas características estruturais e morfológicas. Propõe ainda, a aplicação de índices biofísicos para avaliar a influência da arquitetura do dossel no  $\sigma^{\circ}$ . Fotografias aéreas da área teste na escala 1:10.000, localizada no reservatório de Tucuruí no estado do Pará, foram usadas como verdade terrestre e registradas com as imagens SAR da mesma área. A partir das fotografias aéreas foram selecionadas amostras de 9 classes: Água, Paliteiros, Floresta, *Scirpus*, *Eichhornia*, *Typha*, *Salvinia*, *Pistia*, e Heterogêneo. As amostras foram analisadas em função de suas distribuições estatísticas, dos valores médios dos parâmetros de separabilidade ( $\sigma^{\circ}$  e coeficiente de variação) e dos índices biofísicos. O resultado das análises mostrou pouca possibilidade de discriminação das classes utilizando o  $\sigma^{\circ}$  e o coeficiente de variação. Mostrou ainda que o  $\sigma^{\circ}$  é sensível às variações morfológicas e estruturais das classes estudadas, principalmente variações na altura da planta. O range dinâmico parece ser indicador da homogeneidade das amostras, e a polarização HH foi a que apresentou menores valores de range dinâmico para todas as classes. Os índices biofísicos não apresentaram bons resultados, somente o CSI foi um indicador dos mecanismos de reflexão de canto nas classes Paliteiros, *Scirpus* e *Salvinia*, e o VSI apresentou relação com o espalhamento do volume da classe Floresta.



## DISCRIMINATION OF AQUATIC PLANTS USING AIRBORNE SAR-C MULTIPOLARIZATION DATA.

### **ABSTRACT**

Two main aspects make it important the study of aquatic plants: 1) the aquatic plants affect the water quality in the littoral area and within the lake ecosystem due to their productivity and problems that may bring about when undergoing excessive growth; 2) as part of the processes influencing the global Carbon cycle, producing and fixing green house gases. This research assess the suitability of airborne C band polarimetric SAR data for the discrimination among macrophyte genera with different structural and morphological features. It also assess the usefulness of biophysical indexes as a tool to identify the effect of the dossel architecture on the radar backscatter. Aerial photographs of the test site, located in the Tucuruí reservoir (Pará state), at the scale of 1:10.000 were used as ground truth and registered to the SAR images. Based on the aerial photography, 9 ground classes were selected as follows: Water, dead tree trunks (Paliteiros), Forest, *Scirpus*, *Eichhornia*, *Typha*, *Salvinia*, *Pistia* and Heterogeneous. The samples were analyzed according to the following aspects: statistical properties, average of separability parameters (backscatter and coefficient of variation) and biophysical indexes. The results showed that there is little possibility of discriminating among the macrophyte genus using both the backscatter coefficient and coefficient of variation. It also showed that the backscatter coefficient is sensitive to morphological variations in the plant height. The dynamic range which is an indicator of the degree of separability among classes presented the smallest values for the HH polarization in every ground class. The biophysical indexes did not present good results except for the CSI which showed to be an indicator for corner reflection in the Paliteiros, *Scirpus* and *Salvinia*. The VSI also indicated volume scattering in the Forest.



## SUMÁRIO

|  | Pág. |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS.....  | xv   |
| LISTA DE TABELAS.....  | xvii |
| <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> .....   | 1    |
| <u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u> .....  | 3    |
| 2.1 - Plantas aquáticas.....   | 3    |
| 2.2 - Polarização .....  | 7    |
| 2.3 - Sistema radar .....  | 8    |
| 2.4 - Resolução .....  | 11   |
| 2.5 - Equação de radar .....   | 12   |
| 2.6 - <i>Speckle</i> .....   | 14   |
| 2.7 - Mecanismos de interação das microondas com a superfície .....  | 15   |
| 2.8 - Interações: microondas X vegetação .....   | 18   |
| 2.9 - Índices biofísicos.....  | 25   |
| 2.10 - Propriedades distribucionais de dados de radar.....   | 28   |
| <u>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA</u> .....  | 31   |
| 3.1 - Seleção da área de estudo .....  | 31   |
| 3.2 - Aquisição dos dados.....   | 32   |
| 3.3 - Formato dos dados.....   | 35   |
| 3.4 - Material utilizado e procedimentos de tratamento dos dados.....                                      | 36   |
| <u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u> .....   | 43   |
| 4.1 - Comportamento médio do retroespalhamento e dos índices biofísicos .....                              | 45   |
| 4.2 - Comportamento das distribuições estatísticas do $\sigma^0$ e correlação entre os<br>parâmetros ..... | 53   |
| 4.3 - Comportamento das amostras.....  | 64   |
| 4.4 - Discriminação entre classes.....   | 81   |
| <u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</u> .....   | 93   |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 97   |
| APÊNDICE A - DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS ASSOCIADAS A CADA<br>CLASSE NAS QUATRO POLARIZAÇÕES .....          | 105  |



## LISTA DE FIGURAS

Pág.

|   |    |
|---|----|
| 2.1 - Fluxo de metano de comunidades de vegetação ao longo de um gradiente de elevação idealizado; valores médios de fluxo de metano e desvio padrão.....         | 4  |
| 2.2 - Alguns gêneros de plantas aquáticas.....  | 6  |
| 2.3 - Exemplos de polarização da luz .....  | 7  |
| 2.4 - Geometria de imageamento de radar de abertura real .....  | 10 |
| 2.5 - Composição de retorno do sinal de uma área - <i>fading</i> .....  | 15 |
| 2.6 - Reflexão das microondas em diferentes superfícies.....  | 16 |
| 2.7 - Refletores de canto: a) diédrico; b) triédrico.....   | 17 |
| 2.8 - Projeção da amplitude do sinal retroespalhado em 2 planos perpendiculares.....  | 17 |
| 2.9 - Retroespalhamento nas bandas X, C e L.....  | 20 |
| 2.10 - Profundidade de penetração das microondas num dossel de milho .....  | 22 |
| 3.1 - Reservatório de Tucuruí .....   | 32 |
| 3.2 - Modo Nadir de operação do C/X SAR-CCRS .....  | 34 |
| 3.3 - Fluxograma da metodologia de trabalho .....   | 37 |
| 3.4 - a) Localização dos pontos de controle do registro da imagem; b) Erro dos pontos de controle .....   | 38 |
| 4.1 - Range dinâmico de cada classe nas quatro polarizações.....  | 50 |
| 4.2 - Máxima variação do índices biofísicos em cada classe.....   | 53 |
| 4.3 - Histogramas das diferentes classes em nível digital, nas quatro polarizações .....  | 54 |
| 4.4 - a) BMI x HV para Floresta; b) VSI x HV para Floresta.....   | 62 |
| 4.5 - Fotografia aérea de uma área mais a montante do braço do rio Pucuruí.....   | 66 |
| 4.6 - Composição colorida de três polarizações (R=HV, G=VV, B=HH), com realce logarítmico de contraste, de uma área mais a montante do braço do rio Pucuruí ..... | 67 |
| 4.7 - Imagens de uma área mais a montante do braço do rio Pucuruí, em três polarizações individuais: HH, VV e HV .....  | 68 |
| 4.8 - Fotografia aérea de uma área mais a jusante do braço do rio Pucuruí .....   | 69 |
| 4.9 - Composição colorida de três polarizações (R=HV, G=VV, B=HH), com realce logarítmico de contraste, de uma área mais a jusante do braço do rio Pucuruí.....   | 70 |
| 4.10 - Imagens de uma área mais a montante do braço do rio Pucuruí, em três polarizações individuais: HH, VV e HV.....  | 71 |
| 4.11 - Valores médios do $\sigma^{\circ}$ das amostras em cada classe.....  | 73 |
| 4.12 - Variação dos índices biofísicos nas amostras, para cada classe .....   | 76 |
| 4.13 - Valores médios do $\sigma^{\circ}$ e dos índices biofísicos das classes Floresta, <i>Eichhornia</i> , Heterogêneo e <i>Scirpus</i> .....                   | 77 |
| 4.14 - Fotografias ilustrando um dossel de <i>Eichhornia</i> (a) e um de <i>Scirpus</i> (b) em seu habitat .....  | 78 |
| 4.15 - Valores médios do $\sigma^{\circ}$ de cada classe nas quatro polarizações .....  | 82 |
| 4.16 - Valores do coeficiente de variação de cada classe nas quatro polarizações.....   | 84 |
| 4.17 - Diagramas de dispersão do $\sigma^{\circ}$ nas polarizações paralelas, com o coeficiente de variação médio das amostras.....                               | 86 |

|  |    |
|--|----|
| 4.18 - Diagramas de dispersão do $\sigma^{\circ}$ nas polarizações cruzadas, com o coeficiente de variação médio das amostras..... | 87 |
| 4.19 - Diagramas de dispersão do $\sigma^{\circ}$ nas quatro polarizações, com o coeficiente de variação médio .....               | 88 |
| 4.20 - Valores médios dos índices biofísicos de cada classe .....  | 89 |
| 4.21 - Diagramas de dispersão do $\sigma^{\circ}$ das quatro polarizações com os índices VSI e CSI .....                           | 90 |
| 4.22 - Diagramas de dispersão do $\sigma^{\circ}$ das quatro polarizações com o índice BSI; e entre os índices.....                | 91 |

## LISTA DE TABELAS

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 3.1 - Modos de operação do sistema C/X SAR-CCRS.....  | 33          |
| 3.2 - Valores de $\overline{Fcal}$ .....  | 36          |
| 3.3 - Características do SAR.....   | 37          |
| 4.1 - Características físicas das classes temáticas.....  | 44          |
| 4.2 - Nível digital médio (ND) e desvio padrão (D.P.) para as diferentes classes, nas quatro polarizações.....  | 45          |
| 4.3 - Valores médios do $\sigma^{\circ}$ , das classes estudadas, nas quatro polarizações.....  | 46          |
| 4.4 - Valores médios do $\sigma^{\circ}_{dB}$ médios, de 3 classes (arbustos, vegetação baixa e gramíneas) com ângulos de incidência entre 40° e 50°, publicados por Ulaby e Dobson (1989)..... | 47          |
| 4.5 - $\sigma^{\circ}_{dB}$ médio corrigidos e range dinâmico (RD) para as diferentes classes, nas quatro polarizações.....   | 48          |
| 4.6 - Valores médios e desvio padrão (DP) dos índices biofísicos para cada classe .....   | 51          |
| 4.7 - Distribuição estatística associada a cada classe nas quatro polarizações .....  | 56          |
| 4.8 - Coeficientes de correlação ( $r_s$ ) entre polarizações e índices biofísicos para cada classe .....   | 57          |



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

As comunidades de plantas aquáticas, também chamadas de macrófitas aquáticas, são consideradas como uma das mais produtivas do mundo. São de fundamental importância não só para a região litorânea, mas para todo o ecossistema lacustre. Estes vegetais participam da ciclagem de nutrientes, produzem biomassa e servem como habitat para a reprodução e crescimento de inúmeros organismos aquáticos (Junk, 1979; Junk e Howard-Williams, 1984).

Entretanto, apesar da reconhecida importância das comunidades de plantas aquáticas para o ecossistema de lagos artificiais, sabe-se que sua proliferação excessiva pode resultar em inúmeros problemas para os múltiplos usos de um reservatório. Entre estes, podem ser citados a obstrução do fluxo da água, o aumento da evaporação, o impedimento à navegação, a restrição a alguns tipos de pesca, a alteração da qualidade da água devido ao excesso de biomassa e conseqüente redução de oxigênio da água, a proliferação de vetores de doença, além de muitos outros problemas.

Deste conjunto de problemas advém a necessidade do entendimento e estudo das comunidades de plantas aquáticas para subsidiar medidas de manejo adequadas, as quais poderão garantir a manutenção dos estoques necessários deste recurso para o suporte da cadeia trófica e evitar os prejuízos ambientais decorrentes de sua proliferação excessiva.

Outra preocupação recente que envolve os reservatórios e as plantas aquáticas é a contribuição desses ambientes para o balanço global no ciclo do Carbono. Kelly et al. (1994) salientam que, apesar dos 500.000 km<sup>2</sup> de área global de reservatórios, quase nada se sabe sobre seu papel como fixador ou fonte de gases responsáveis pelo efeito estufa, dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e Metano (CH<sub>4</sub>).

A composição qualitativa das comunidades de plantas aquáticas, nos ambientes aquáticos, está vinculada aos parâmetros bióticos e abióticos do meio, e aos mecanismos de interação entre os bancos das diferentes espécies de plantas aquáticas. Apesar de uma clara tendência para formação de extensos bancos monoespecíficos (Wetzel, 1975), estes aspectos podem sofrer variações sazonais, as quais podem alterar a distribuição e composição desses bancos de plantas aquáticas, bem como sua biomassa total. Esta variação na distribuição e

composição dos bancos pode influenciar de distintas maneiras seu impacto no ecossistema lacustre, e também a resposta à emissão e fixação de gases responsáveis pelo efeito estufa.

Como visto, é importante determinar a distribuição de bancos de plantas aquáticas, bem como quantificá-las e identificá-las. Desta forma, dados de sensoriamento remoto podem ser uma ferramenta poderosa para se obter tais informações.

Produtos de sensoriamento remoto são importantes fontes de dados em áreas extensas e de difícil acesso. O uso de imagens de RADAR (*Radio Detection and Ranging*) para estudos ambientais é altamente vantajoso, principalmente em regiões tropicais onde a presença de cobertura de nuvens é freqüente. O fato de as microondas penetrarem nas nuvens, garante uma constância na obtenção de dados da área estudada. A independência do Sol como fonte de iluminação coloca como vantagem adicional a possibilidade de aquisição de dados à noite.

Este estudo pretende investigar o comportamento do retroespalhamento de alguns gêneros de plantas aquáticas. A hipótese de trabalho deste estudo é que as diferenças entre os gêneros em torno de suas características estruturais e morfológicas é tal, que torna-se possível distingui-las com base em suas diferenças de retroespalhamento.

Desta forma o objetivo deste trabalho é o estudo do comportamento de alguns gêneros de plantas aquáticas, que ocorrem com maior freqüência no reservatório da UHE Tucuruí, em relação às diferentes polarizações de radar aerotransportado na banda C, e avaliar a possibilidade de discriminação desses gêneros, utilizando os dados de radar, em função das diferenças em suas características estruturais e morfológicas. Possui ainda, como objetivo secundário, a aplicação de índices biofísicos obtidos a partir de dados de radar, no sentido de estudar a influência da arquitetura do dossel no retroespalhamento.

O trabalho está organizado em 5 capítulos. No primeiro são apresentados os objetivos desta pesquisa. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica onde são discutidos temas sobre o imageamento de radar e os efeitos dos parâmetros do sensor e da cobertura vegetal sobre o coeficiente de retroespalhamento. No Capítulo 3, são descritos a área de estudo, os materiais utilizados, assim como a metodologia adotada. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados. E finalmente, no Capítulo 5, são feitas as considerações finais do trabalho.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### **2.1 - PLANTAS AQUÁTICAS**

Segundo Burrows (1990), a vegetação pode ser classificada, quanto à fisionomia da planta - forma e estatura, em três tipos:

- a) floresta - vegetação dominada por plantas com madeira (tronco e galhos), com 6 metros de altura, ou mais;
- b) cerrado - vegetação dominada por plantas com madeira (tronco e galhos), com 6 metros de altura, ou menos;
- c) herbáceas - vegetação dominada por plantas sem madeira.

As plantas aquáticas ou macrófitas aquáticas são plantas herbáceas especializadas, que crescem na água, ou em solos com água, ou ainda, solos que estão normalmente saturados de água.

O ambiente propício ao desenvolvimento das plantas aquáticas é chamado de áreas alagadiças, e é definido como o lugar onde a água é o substrato, ou possui influência dominante no crescimento da planta, ou ambos. A água pode estar acima ou logo abaixo da superfície do solo, contínua ou freqüentemente. As plantas podem estar enraizadas no solo ou flutuando (Burrows, 1990).

Para alguns lagos artificiais as plantas aquáticas podem ser consideradas como as principais responsáveis pela produtividade primária, tornando-se a base principal da cadeia trófica, e sobrepondo-se, nestes casos, ao papel da comunidade fitoplanctônica. Esta tendência ocorre principalmente no caso de reservatórios em regiões tropicais, onde a morfometria e as condições climáticas, além de condições nutricionais extremamente favoráveis devido à biomassa submersa durante o enchimento do reservatório, podem propiciar uma colonização intensa por estes vegetais (Junk e Howard-Williams, 1984; Barrow, 1987).

Atualmente há uma crescente preocupação no entendimento dos ciclos biogeoquímicos e suas influências no balanço global dos gases constituintes da atmosfera. As áreas alagadiças e as plantas aquáticas possuem um papel importante no ciclo do gás metano. Morrissey et al. (1994) destacam a importância deste ambiente no fluxo do metano, salientando que essas áreas alagadiças apresentam o maior fluxo de metano em direção à atmosfera, quando comparadas às outras classes estudadas ( $19,95 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) (Figura 2.1)).

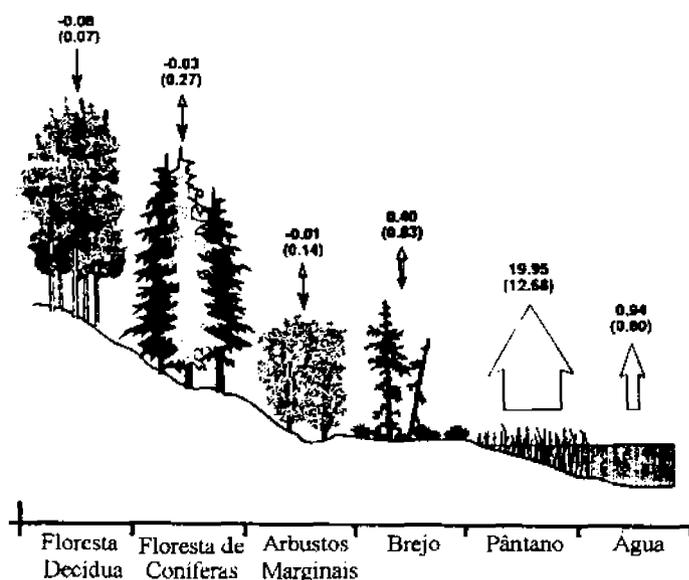


Fig. 2.1 - Fluxo de metano ( $\text{mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) de comunidades de vegetação ao longo de um gradiente de elevação idealizado; valores médios de fluxo de metano e desvio padrão (valores entre parênteses). Os valores ao lado do nome das classes representam o número de observações feitas em cada classe. Floresta decídua 11), floresta de coníferas 8), arbustos marginais 12), brejo 22), pântano 56) e água 14).

FONTE: Adaptada de Morrissey et al. (1994), p. 1341.

Desta forma, para avaliar a influência das plantas aquáticas, em um determinado ambiente, no ciclo do gás metano, é necessário o conhecimento da área ocupada por estas plantas aquáticas, bem como quantificar sua biomassa. Neste sentido dados obtidos por sensores orbitais podem auxiliar na obtenção de tais informações, principalmente em regiões muito extensas e de difícil acesso.

Na região das microondas as interações entre radiação eletromagnética e os objetos da superfície são em grande parte governadas por suas características macroscópicas, tais como: forma, rugosidade, arranjo espacial. Os diferentes gêneros de plantas aquáticas apresentam características macroscópicas diferentes (forma, arquitetura e dimensão) que podem afetar a interação com a radiação eletromagnética e, conseqüentemente, possibilitar a discriminação entre eles. Desta forma só podem ser discriminadas as macrófitas emersas, isto é, as que estão total, ou parcialmente acima do nível da água. Isto porque as plantas macrófitas submersas, por estarem abaixo do nível da água, não interagem com a radiação eletromagnética na região das microondas. A Figura 2.2 mostra alguns dos principais gêneros de plantas que ocorrem nos reservatórios do Norte do Brasil.

Destes principais gêneros de plantas aquáticas, a *Eichhornia sp.*, a *Salvinia sp.* e a *Pistia sp.* podem ser classificadas como flutuantes, a *Typha sp.* como emergente e o *Scirpus sp.* como folhas flutuantes (Payne, 1986). A *Eichhornia sp.* possui raízes numerosas e pilosas, caules prostrados e folhas brilhantes com forma oval-arredondada com 10 a 15 cm de comprimento. Devido ao seu posicionamento vertical são facilmente movidas pelo vento. Reproduzem rapidamente e são usadas por alguns insetos vetores de doenças para depositar seus ovos. A *Salvinia sp.* possui folhas flutuantes orbiculares de até 3 cm de comprimento, alternadamente inseridas no rizoma e espalmadas sobre a água. Geralmente os bancos de *Salvinia sp.* estão entre os bancos de *Scirpus sp.*. A *Pistia sp.* possui folhas flutuantes de um verde pálido com 5 cm de comprimento e longas raízes fibrosas. Também abriga ovos e larvas de mosquitos vetores de doenças, e está associada a bancos de *Scirpus sp.*. Este possui folhas estreitas as quais podem chegar a 2 m de altura e suas raízes são presas às árvores mortas. Os bancos de *Scirpus sp.* não são homogêneos.

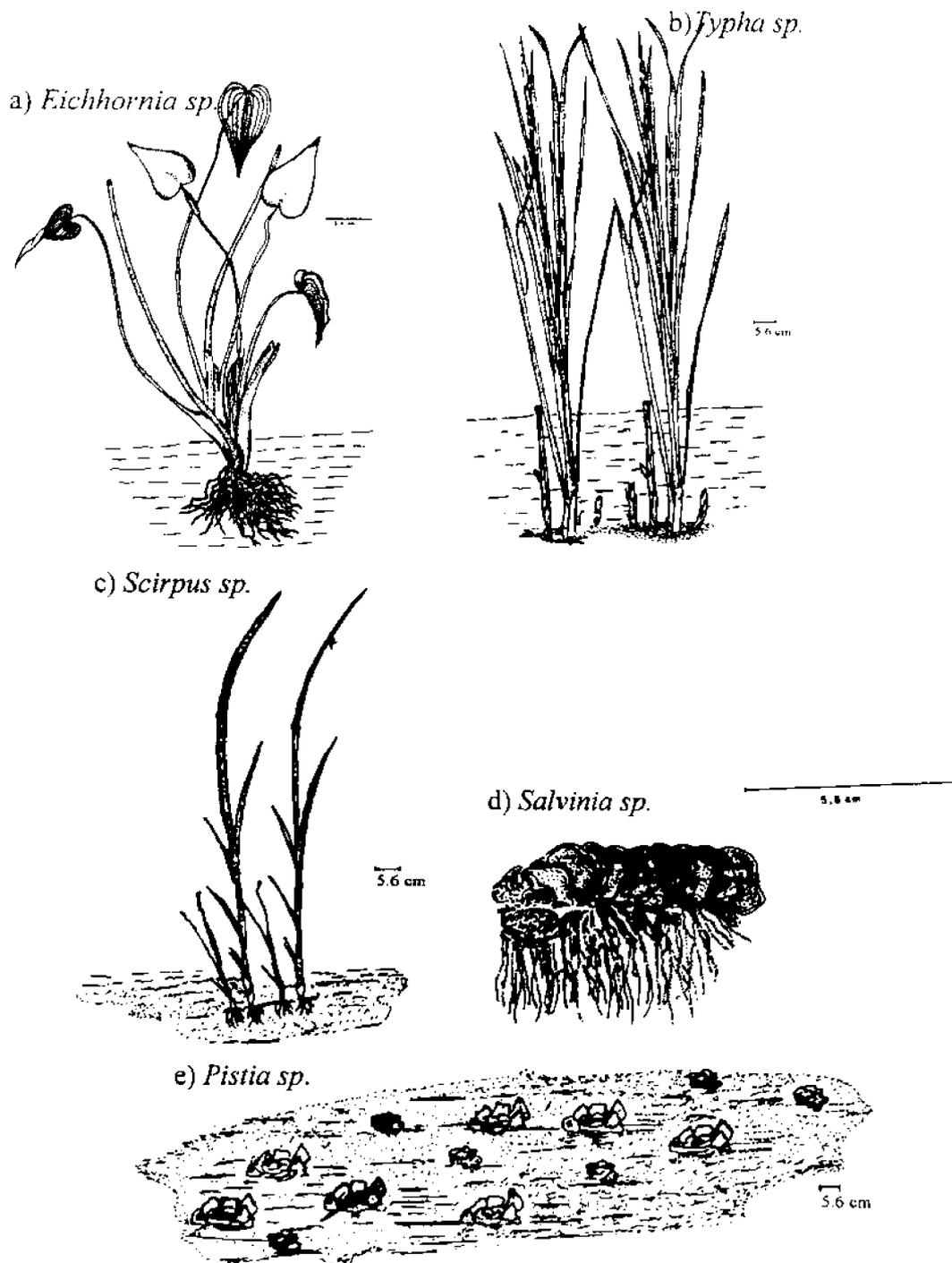


Fig. 2.2 - Alguns gêneros de plantas aquáticas: a) *Eichhornia sp.*; b) *Typha sp.*; c) *Scirpus sp.*; d) *Salvinia sp.*; e) *Pistia sp.*. A escala de referência usada corresponde ao comprimento de onda na banda C (5.6 cm).

FONTE: Hoehne, 1948.

São praticamente inexistentes trabalhos específicos relacionando dados de radar e plantas aquáticas. Entretanto, para iniciar tal estudo, pode-se fazer analogias entre

os dosséis de plantas aquáticas e dosséis de plantas não aquáticas. Isto permite utilizar conceitos acerca dos princípios básicos de interação das microondas com o dossel de plantas não aquáticas, conceitos estes presentes em trabalhos que relacionam coberturas vegetais herbáceas em solos secos com os mecanismos de interação das microondas. Estes trabalhos com vegetação herbácea em solos secos são mais abundantes na literatura (Ulaby et al., 1979; Paris, 1983; Rosenthal et al., 1985; Ulaby e Wilson, 1985; Wang et al., 1986; Ulaby et al., 1987; Bouman, 1991; Freeman et al., 1994).

## 2.2 - POLARIZAÇÃO

Polarização é a propriedade de uma onda eletromagnética descrever uma variação, na direção e na amplitude do vetor campo elétrico, em relação ao tempo. Esta variação é observada na direção de propagação da onda (Figura 2.3).

Uma onda eletromagnética é constituída por dois campos de força, o campo elétrico e o campo magnético. No espaço, estes dois campos de força são perpendiculares entre si, e transversais à direção de propagação da onda. A direção e propagação de apenas um dos campos (freqüentemente o campo elétrico) é suficiente para especificar, completamente, a direção e magnitude do outro campo, através das equações de Maxwell (Elachi, 1987).

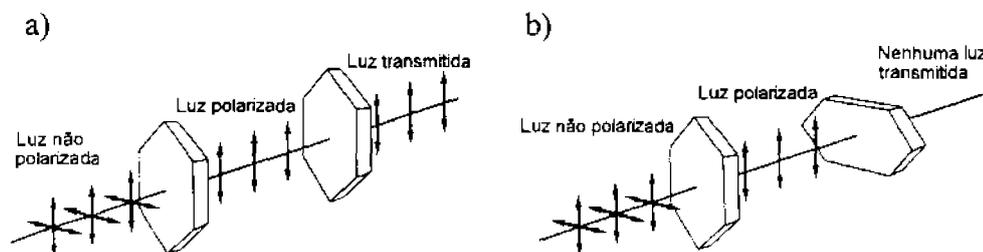


Fig. 2.3 - Exemplos de polarização da luz.

FONTE: Adaptada de Jones e Childers (1992), p. 681.

Uma onda eletromagnética que produz um campo elétrico em um plano fixo, ao longo da direção de propagação, é dita ser uma onda linearmente polarizada. A maioria dos sistemas radar imageadores emitem e recebem ondas linearmente polarizadas.

As polarizações lineares usadas pelos sistemas radar são a polarização horizontal (H) e a vertical (V). A polarização horizontal é geralmente definida quando o vetor campo elétrico é perpendicular ao plano de incidência da onda. A polarização vertical corresponde ao caso onde o vetor campo elétrico é paralelo ao plano de incidência.

Quando se discute polarização, a notação HH é usada quando o sistema radar emite onda na polarização horizontal e recebe a onda de retorno também na polarização horizontal. A notação HV é usada quando o radar emite na horizontal e recebe na vertical, isso é válido também quando a emissão se dá na polarização vertical (VV e VH). As notações VV e HH são denominadas polarizações paralelas, e VH e HV polarizações cruzadas.

Os sinais de retorno são geralmente mais fortes em polarizações paralelas (HH, VV), enquanto que, nas polarizações cruzadas (HV, VH), os sinais são mais fracos. Isto ocorre, pelo fato de que nas polarizações cruzadas as interações do tipo reflexão de canto não estão presentes (NASA, s.d.).

### **2.3 - SISTEMA RADAR**

O radar é um sistema sensor ativo, ou seja, possui sua própria fonte de energia, emitindo e recebendo radiação eletromagnética na faixa das microondas. Os radares imageadores são de dois tipos: SLAR e SAR.

O sistema radar SLAR (*Side Looking Airborne Radar*) trabalha com as dimensões efetivas da antena, emitindo energia na direção lateral à linha de voo da plataforma que o suporta.

No imageamento com radares de abertura real (SLAR), a resolução ao longo da linha de voo (*along-track*) ou resolução azimutal, é linearmente proporcional à distância entre o sensor e a superfície (Elachi, 1987). A largura do feixe transmitido (*beamwidth*) é determinada pelo tamanho real da antena. Desta forma, uma melhor resolução azimutal está relacionada com uma menor largura do feixe transmitido.

necessitando, assim, de uma antena maior. Esta técnica de imageamento não é utilizada em plataformas orbitais se o objetivo é obter imagens de alta resolução.

Os radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR) são usados no sentido de melhorar a resolução azimutal. A técnica de abertura sintética de antenas é baseada no fato de que o feixe permanece sobre o alvo por uma quantidade significativa de tempo, e é registrado pelo radar a partir de várias posições adiante, ao longo da sua trajetória. Desta forma o SAR utiliza o próprio deslocamento da plataforma, através da gravação e combinação dos sinais refletidos, para simular uma antena cujo comprimento seria muitas vezes maior que o da antena realmente utilizada.

Uma diferença básica entre um SLAR e um SAR, é que, no primeiro, apenas um eco de uma célula de resolução é registrado, ou seja, um pulso é emitido, refletido e recebido. No caso de um SAR, vários ecos de uma mesma célula de resolução, gerando numerosos sinais, são registrados e sintetizados (Ulaby et al., 1981).

Os radares podem funcionar com uma ou duas antenas. Quando duas antenas são usadas, sendo uma para transmissão e outra para recepção do sinal refletido pelo alvo, o sistema é chamado biestático. Neste sistema, cada antena pode possuir características distintas de polarização, dimensão, ângulo de incidência, etc. Quando o sistema funciona com uma única antena para transmitir e receber o sinal retroespalhado, é chamado de monoestático.

Atualmente existem quatro satélites orbitais em operação que possuem o instrumento SAR a bordo: os satélites europeus da série *European Remote Sensing Satellite* - ERS-1 e ERS-2, lançados em 1991 e 1995 respectivamente, operando na banda-C (5.6 cm) com polarização VV; o satélite japonês *Japanese Earth Resource Satellite* - JERS-1, lançado em 1992, operando na banda-L (23 cm) com polarização HH; e o satélite canadense RADARSAT, lançado em 1995, que opera na banda-C com polarização HH.

A configuração de um sistema de imageamento SLAR é apresentada na Figura 2.4. Como a plataforma se move em sua órbita, uma faixa contínua de largura imageada  $S$  é mapeada ao longo da linha de vôo. A largura da faixa é dada por:

$$S \cong \frac{h\beta}{\cos^2 \theta} = \frac{\lambda h}{W \cos^2 \theta}, \quad (2.1)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $h$  a altura da plataforma,  $\beta$  é a largura do feixe transmitido na elevação,  $W$  é a largura da antena, e  $\theta$  é o ângulo de visada. Esta expressão supõe que  $\beta \ll 1^\circ$ , e não leva em consideração a curvatura da Terra.

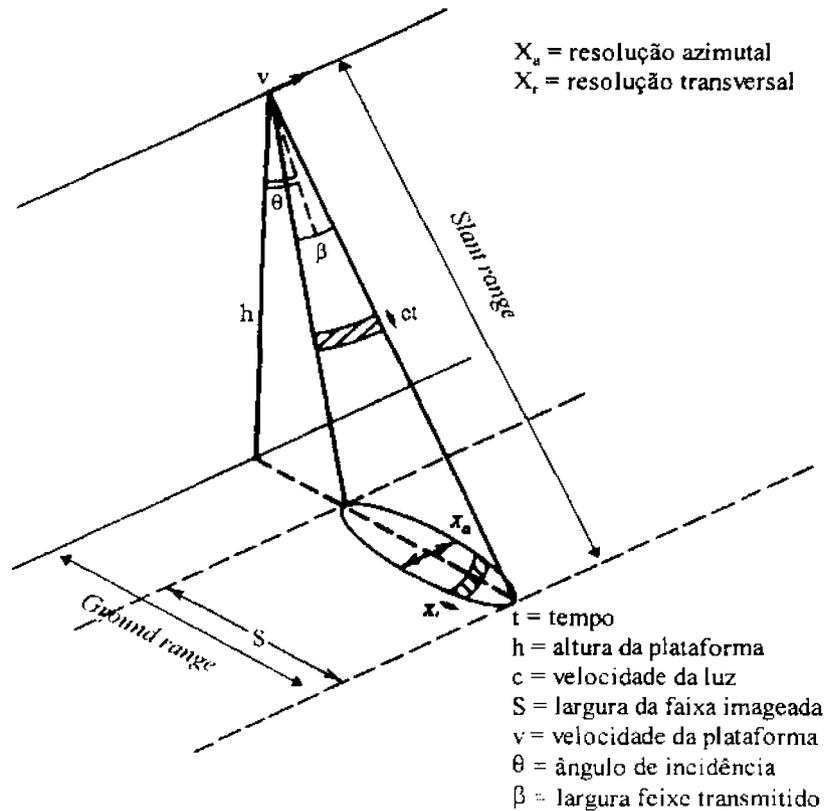


Fig. 2.4 - Geometria de imageamento de radar de abertura real.

FONTE: Elachi (1987), p. 194.

Há duas distâncias básicas utilizadas quando se trata de imagem de visada lateral, a distância inclinada (*slant range*) e a distância no solo (*ground range*). A distância *slant range* é obtida pela diferença de tempo que o pulso leva para ir até o alvo

e retornar para a antena, ou seja é considerada a distância radial da plataforma até o alvo. Por outro lado a distância *ground range* é a distância no terreno entre o ponto nadir da antena e o alvo (Figura 2.4) (Trevett, 1986).

As imagens de radar são comumente obtidas no modo *slant range*. Para a comparação de imagens de radar com mapas e informações de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), é necessário a transformação dos dados da imagem para o modo *ground range*. Esta transformação requer correções na altitude da antena, na inclinação local e na elevação do terreno.

## 2.4 - RESOLUÇÃO

A capacidade de discriminação espacial de um sistema de radar é geralmente descrita em termos de sua resolução. Esta por sua vez, está vinculada aos seus elementos, que são: a potência de transmissão, o formato da antena, o ângulo de visada e a velocidade da plataforma (Ulaby et al., 1982).

A resolução espacial em sistemas radar é representada pela resolução transversal (*range*), que é a resolução transversal à linha de vôo (*across track*), e a resolução azimutal, que é a resolução paralela à linha de vôo (*along track*).

A resolução transversal pode ser determinada pela duração do pulso transmitido pela antena. Se dois pontos estão separados por uma distância  $X_r$ , seus respectivos ecos estarão separados por uma diferença de tempo, igual a  $\Delta t$ ,

$$\Delta t = \frac{2X_r}{c} \text{sen } \theta, \quad (2.2)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz e  $\theta$  é o ângulo de incidência.

Denominando  $\tau$  a menor diferença de tempo discriminável, então a resolução transversal é dada por

$$X_r = \frac{c\tau}{2 \sin \theta}. \quad (2.3)$$

A resolução transversal de um SAR é igual a de um SLAR.

A resolução azimutal,  $X_a$ , é proporcional à distância entre a antena e o alvo, e é dada por

$$X_a = \frac{h\beta'}{\cos \theta} = \frac{h\lambda}{L \cos \theta}, \quad (2.4)$$

onde  $\beta'$  é a largura do feixe no azimute,  $h$  a altura da plataforma, e  $L$  é o comprimento real da antena.

Teoricamente, a resolução azimutal para um SAR independe da distância entre a antena e o alvo (Ulaby e Dobson, 1989), sendo definida como a metade do comprimento real da antena, ou seja,

$$X_a = \frac{L}{2}. \quad (2.5)$$

## 2.5 - EQUAÇÃO DE RADAR

A equação de radar é uma relação fundamental entre as características do radar, do alvo, e do sinal que é refletido pelo alvo e recebido pela antena do radar (Ulaby et al., 1982).

A intensidade da energia retroespalhada está relacionada ao parâmetro conhecido como seção transversal de retroespalhamento -  $\sigma$  (*backscatter cross section*), que representa a razão entre a energia recebida pelo sensor e a energia que o sensor receberia se a superfície espalhadora tivesse um comportamento isotrópico (Elachi, 1987).

Para alvos maiores que o feixe incidente, é necessário conhecer o comportamento do retroespalhamento em função de uma unidade de área ( $1\text{m}^2$ ), definindo um coeficiente de retroespalhamento. Usa-se então,  $\sigma^0$ , que é a seção transversal de retroespalhamento ( $\sigma$ ) por unidade de área iluminada ( $a$ ) - ( $\sigma^0 = \sigma/a$ ). O coeficiente de retroespalhamento,  $\sigma^0$ , pode ser expresso através dos níveis digitais nas imagens de radar.

A densidade da potência incidente ( $P_i$ ), por unidade de área, sobre a superfície iluminada é dada por

$$P_i = \frac{P_t G}{4\pi r^2} \cos\theta \quad (2.6)$$

onde  $P_t$  corresponde à potência transmitida,  $r$  é a distância oblíqua entre a antena e a superfície imageada,  $\theta$  o ângulo de incidência, e  $G$  o ganho da antena, que é dado por

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (2.7)$$

onde  $A$  corresponde à área efetiva da antena e  $\lambda$  ao comprimento de onda.

A potência do retroespalhamento,  $P_s$ , é

$$P_s = P_i S \sigma \quad (2.8)$$

onde  $S$  é a área iluminada em um certo instante de tempo (Ex:  $S = X_r X_r$ ), e  $\sigma$  é a superfície da seção transversal de retroespalhamento. A densidade da potência refletida por unidade de área na vizinhança do sensor é

$$P_c = \frac{P_s}{4\pi r^2} \quad (2.9)$$

e a potência total coletada pela antena é

$$P_r = AP_c \quad , \text{ ou} \quad (2.10)$$

$$P_r = \left[ \frac{P_t G}{4\pi r^2} \cos \theta \right] X_a X_r \sigma \left[ \frac{A}{4\pi r^2} \right] \quad (2.11)$$

Assim, observa-se que, com exceção de  $\sigma$ , todos os parâmetros na equação são relativos ao sistema radar, podendo ser reunidos num só representando uma constante do sistema. Conclui-se então que a potência recebida pela antena é diretamente proporcional à seção transversal de retroespalhamento (Ulaby e Dobson, 1989).

## 2.6 - *SPECKLE*

O *speckle* é um ruído multiplicativo devido à natureza coerente do SAR. A potência de retorno do sinal, em um sistema de imageamento por radar, está sujeita a flutuações que podem variar desde o desaparecimento gradual até um retorno extremamente forte do sinal. São estas flutuações aleatórias observadas (resíduos em relação à média do sinal incidente sobre uma célula de resolução ou *pixel*) que produzem o ruído chamado *speckle* em uma imagem de radar. Este ruído pode prejudicar muito a interpretação espacial e radiométrica das imagens (Basic..., 1994).

A todo instante de tempo o pulso de radar ilumina uma certa célula de resolução. Cada célula de resolução é composta de muitos espalhadores. Desta forma, o eco retornado representa uma adição coerente de ecos de um grande número de pontos. O retorno do sinal destes pontos, adicionados vetorialmente, resulta em um único vetor o qual representa a amplitude  $V$  e fase  $\phi$  do sinal total. A fase  $\phi_i$  de cada vetor é relacionada à distância entre o sensor e o ponto do espalhador correspondente. Se o sensor se move em uma pequena quantidade, todas as fases  $\phi_i$  mudam, resultando em uma alteração na amplitude  $V$ . Deste modo, sucessivas observações de uma mesma área da superfície, sobre a qual o sensor se move, resulta em diferentes valores de  $V$ . Esta variação recebe o nome de *fading* (Figura 2.5).

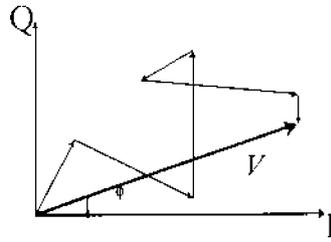


Fig. 2.5 - Composição de retorno de uma área - *fading*.  
 FONTE: Elachi (1987), p. 197.

Similarmente, tomando-se duas áreas vizinhas com a mesma seção transversal de retroespalhamento,  $\sigma$ , mas com algumas pequenas diferenças, o retorno do sinal das duas áreas será diferente. Assim, uma imagem de uma superfície homogênea, com uma seção transversal de retroespalhamento constante, apresenta variação no brilho de um *pixel* para outro. A esta variação dá-se o nome de *speckle*.

## 2.7 - MECANISMOS DE INTERAÇÃO DAS MICROONDAS COM A SUPERFÍCIE

Parte da radiação enviada pelo radar é absorvida, parte é refletida specularmente, outra parte é difundida dentro do alvo e outra eventualmente, retorna para a antena para ser registrada e medida na forma de um sinal de retorno, servindo de base para a produção de uma imagem de radar.

A habilidade na interpretação de uma imagem de radar está ligada ao grau pelo qual diferentes alvos geram diferentes sinais de retorno, de modo a produzirem características distintas na imagem final, e também, à resolução do sistema radar ou sua capacidade de discriminar estes diferentes alvos. A Figura 2.6 apresenta a descrição clássica da maneira como a superfície afeta o retorno do sinal para a antena. No caso da Figura 2.6a, que representa o caso de uma superfície lisa, a energia é refletida specularmente na direção oposta da antena, e nenhum sinal é registrado, formando-se assim, uma imagem preta. Com o aumento da rugosidade na superfície, conforme ilustram as Figuras 2.6b e 2.6c, a quantidade de sinal specular é reduzida, e há um aumento na magnitude do sinal registrado pela antena, conhecido como componente

retroespalhada (Figura 2.6d). Quanto maior a quantidade de energia retroespalhada, maior é o brilho, e a imagem tende aos níveis de cinza mais claros.

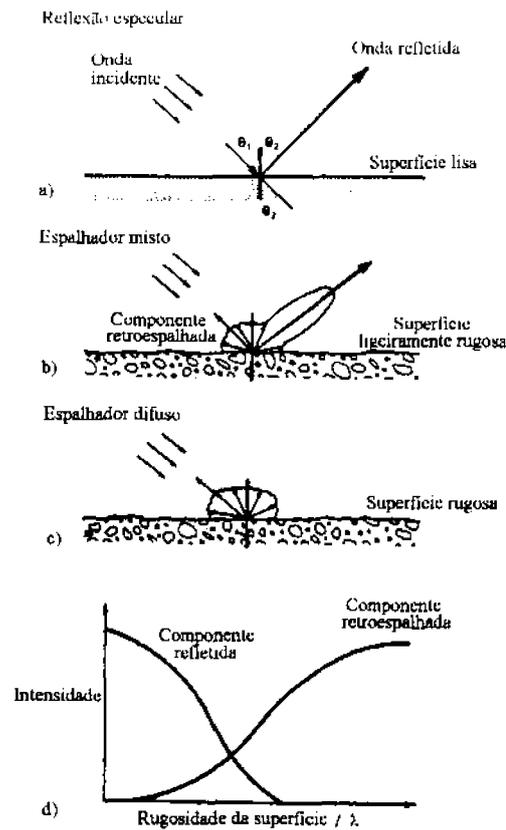


Fig. 2.6 - Reflexão das microondas em diferentes superfícies.  
FONTE: Trevett (1986), p. 45.

A imagem de radar é, portanto, uma medida da componente de retroespalhamento do sinal. Visto que relacionada à rugosidade do alvo, pode ser entendida como uma representação da rugosidade da superfície.

Um caso particular de forte sinal de retorno ocorre quando duas ou mais superfícies lisas são adjacentes, causando uma reflexão especular. Este fenômeno é conhecido como reflexão de canto (*corner reflection*). A reflexão de canto é causada pelos chamados refletores de canto, que podem ser diédricos ou triédricos. Nos diédricos, a reflexão ocorre quando há duas superfícies adjacentes. (também chamada reflexão do tipo *double bounce*), e nos triédricos quando há três superfícies causando a reflexão (Figura 2.7).

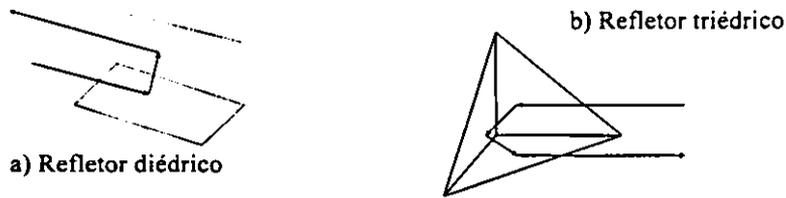


Fig. 2.7 - Refletores de canto: a) Diédricos; b) Triédricos.

As imagens de radar podem se apresentar de várias formas, dependendo do tipo de processamento e calibração usados na sua geração (Ulaby et al., 1986). Abaixo são listados alguns tipos de imagens de radar que podem ser geradas:

- a) imagem complexa: é formada pela projeção da amplitude  $A$  em dois eixos perpendiculares (eixo real e eixo imaginário), dando origem à componente  $I$  e  $Q$ , conforme ilustra a Figura 2.8. Cada célula de resolução  $(x,y)$  é formada por uma parte real e outra imaginária, conforme especificado na equação (2.12). O ângulo  $\phi$  refere-se à fase do sinal retroespalhado.

$$Ae^{i\phi} = A \cos \phi + iA \sin \phi \quad (2.12)$$

$$Ae^{i\phi} = I + iQ \quad (2.13)$$

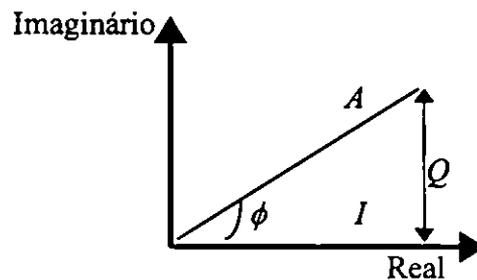


Fig. 2.8 - Projeção da amplitude do sinal retroespalhado em dois planos perpendiculares.

- b) imagem amplitude: o nível digital representa a amplitude ( $A$ ) do sinal retroespalhado de uma célula de resolução ( $x,y$ ).

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (2.14)$$

- c) imagem intensidade: o nível digital representa a intensidade ( $i$ ) (ou potência) do sinal retroespalhado de uma célula de resolução ( $x,y$ ).

$$i = A^2 \quad (2.15)$$

- d) imagem relativa à seção transversal de retroespalhamento (RBCS - *Relative Backscattering Cross Section*): o nível digital representa a seção transversal de retroespalhamento,  $\sigma$ , de uma célula de resolução ( $x,y$ ). Neste tipo de imagem, o nível digital é geralmente proporcional à  $\sigma(x,y)$ ;
- e) imagem relativa ao coeficiente de retroespalhamento (RBC - *Relative Backscattering Coefficient*): o nível digital representa o coeficiente de retroespalhamento de uma célula de resolução,  $\sigma^\circ(x,y)$ ;
- f) imagem do coeficiente de retroespalhamento (BC - *Backscattering Coefficient*): quando a imagem RBC é submetida a testes de calibração absoluta, no sentido de estabelecer uma calibração relacionando o nível digital e o  $\sigma^\circ$  da célula de resolução correspondente.

## 2.8 - INTERAÇÕES: MICROONDAS X VEGETAÇÃO

Ulaby et al. (1986) relacionam os parâmetros que influenciam no comportamento do retroespalhamento. Os parâmetros relativos ao dossel, são:

- a) a constante dielétrica da vegetação, que é fortemente influenciada pelo conteúdo de umidade. Este pode variar significativamente entre os diferentes constituintes do dossel (folhas, troncos e frutos) dependendo do estágio de desenvolvimento do dossel, causando portanto, uma variação da constante dielétrica;

- b) o tamanho, forma e orientação dos elementos difusores do dossel;
- c) a rugosidade e a constante dielétrica do substrato sob o dossel; e
- d) a geometria da cobertura do dossel (orientação e homogeneidade das estruturas da cobertura, porcentagem de cobertura, altura da planta, etc.).

Os parâmetros relativos ao sensor são os seguintes:

- a) a frequência da onda incidente;
- b) a direção da onda incidente, relacionada ao ângulo de incidência e ao ângulo azimutal; e
- c) a direção de polarização das antenas de transmissão e recepção.

Um dossel é um exemplo clássico de espalhamento do volume. Parte da energia enviada pelo radar é retroespalhada pela superfície da vegetação, e outra parte da energia, dependendo das características do radar usado e da estrutura do alvo, penetra no dossel e é retroespalhada pelos elementos espalhadores (folhas, galhos, etc.) dentro da vegetação e pelo solo. O espalhamento volumétrico depende, entretanto, da homogeneidade da superfície do alvo e das propriedades físicas deste, tais como: tamanho da folha, direção, umidade, densidade, altura, presença de vegetação rasteira, tipo de solo, etc., junto com as características do radar (como por exemplo: comprimento de onda, ângulo de incidência, polarização).

A profundidade de penetração da onda de radar na vegetação depende da umidade e densidade da vegetação, assim como do comprimento de onda. Quanto maior o comprimento de onda maior a penetração no dossel (Figura 2.9). O espalhamento do volume conta com a habilidade da microonda penetrar em certa cobertura do alvo e retornar sinais da subsuperfície do alvo. Na maioria dos casos, o sinal resultante é a soma dos dois efeitos, em graus variados, dependendo da influência relativa da superfície e da subsuperfície dos alvos (Figura 2.9).

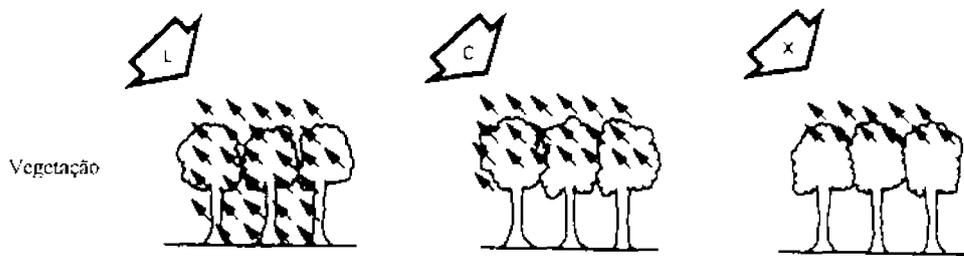


Fig. 2.9 - Retroespalhamento nas bandas X, C e L.

FONTE: Adaptada de Dallemand et al. (1991), p. 7.

Em alguns casos, o retorno da subsuperfície do alvo pode dominar a cena, sendo que neste caso a imagem gerada é da subsuperfície e não da superfície. Em superfícies descobertas pode ocorrer a penetração da onda no solo, esta penetração pode ser um indicador de diferentes tipos de solos. Em solos homogêneos, este fato pode ser relacionado com a sua umidade. Em alguns casos, ambos os efeitos (retorno da superfície e da subsuperfície), podem ocorrer simultaneamente (Trevett, 1986).

A presença de água em uma determinada superfície ou sob esta superfície, possui influência direta na sua constante dielétrica, aumentando o retroespalhamento.

O ângulo de incidência é um parâmetro que pode alterar a interpretação dos alvos em imagens de radar. Ângulos de incidência elevados, em relação à normal, envolvem um maior volume de vegetação exposto às microondas havendo portanto, maiores chances de espalhamentos intra-dossel. Em geral, há um aumento no retroespalhamento com o decréscimo no ângulo de incidência (Simonet e Davis, 1983).

A rugosidade pode ser definida pelo critério de Rayleigh. Segundo este critério uma superfície é considerada rugosa quando  $h > \lambda / 8 \cos\theta$  ( $h$  é a altura das irregularidades da superfície considerada,  $\lambda$  é o comprimento de onda utilizado, e  $\theta$  é o ângulo de incidência).

A rugosidade aparente de uma superfície depende do ângulo de incidência do radar e de seu comprimento de onda. Assim, um pequeno comprimento de onda de radar pode identificar uma superfície como rugosa, enquanto que essa mesma superfície, vista com um comprimento de onda maior, pode parecer lisa.

A seção transversal de retroespalhamento de superfícies naturais depende da polarização da onda incidente. A superfície é caracterizada por quatro seções transversais de retroespalhamento:  $\sigma_{HH}$ ,  $\sigma_{HV}$ ,  $\sigma_{VV}$  e  $\sigma_{VH}$ . Estes quatro parâmetros complexos, de amplitude e fase da onda, permitem a completa caracterização da matriz de espalhamento, a qual permite a derivação da seção transversal retroespalhada para qualquer polarização incidente ou retroespalhada.

$$= \begin{pmatrix} \sigma_{HH} & \sigma_{HV} \\ \sigma_{VH} & \sigma_{VV} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Isto se deve ao fato que os alvos terrestres podem ter a capacidade de despolarizar a onda incidente, transformando uma onda horizontalmente polarizada em uma onda verticalmente polarizada, por exemplo. Vários mecanismos estão envolvidos na despolarização, sendo um deles o espalhamento múltiplo devido à rugosidade do terreno (Fung e Ulaby, 1983).

As polarizações cruzadas são geradas por múltiplos espalhamentos, isto é, devido a despolarização sofrida pela onda incidente. Conseqüentemente as polarizações cruzadas geram espalhamentos de menor intensidade. É comum considerar  $\sigma_{HV}^o = \sigma_{VH}^o$  (Haralick et al., 1970). Segundo Evans (1986), a vegetação normalmente exibe um alto componente de polarização cruzada.

A capacidade de despolarização de um meio é incrementada com o aumento da frequência, indicando a estreita relação entre o comprimento de onda, a profundidade de penetração e a participação do volume e/ou da camada superficial da vegetação.

A polarização influi diretamente na capacidade de penetração da onda em um dossel. Num dossel de gramíneas, por exemplo, que possui estrutura predominantemente vertical, a atenuação das microondas pode ser mais significativa na polarização VV que na HH, o que significa maior penetração de ondas horizontalmente polarizadas (Figura 2.10) (Allen e Ulaby, 1984; Le Toan et al., 1984).

A frequência e a polarização utilizadas influem diretamente no poder de penetração e na afinidade com os componentes vegetais do dossel, respectivamente, como ilustrado na Figura 2.10. Quanto maior a frequência utilizada, menor a penetração no dossel.

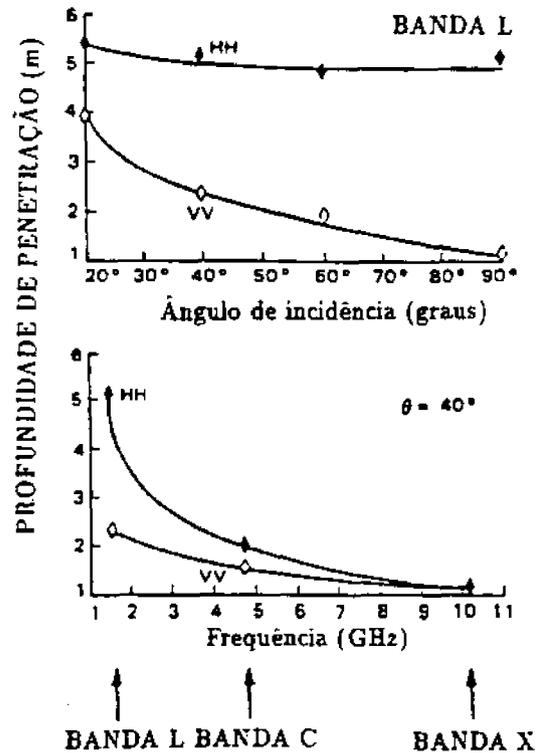


Fig. 2.10 - Profundidade de penetração das microondas num dossel de milho.  
 FONTE: NASA (s.d.), p. 195.

Algumas vezes as variações nas características do dossel acarretam em diferentes comportamentos do  $\sigma^0$  nas diferentes polarizações e frequências. Como estas variações podem estar relacionadas com outras importantes características do dossel, como a relação tronco-folhas e a biomassa, os estudos no sentido de avaliar estas relações têm aumentado consideravelmente nos últimos anos.

Sader (1987), ao estudar o efeito da biomassa da floresta na banda L, descreve que o retroespalhamento de um SAR é influenciado pelas diferenças nas características da cobertura da floresta (padrão dos galhos, peso e área da copa), pela

variabilidade na composição das espécies e no padrão das estruturas da árvore (altura, diâmetro do caule e densidade), e pela distribuição e quantidade de sólidos úmidos expostos. Salieta ainda que florestas não uniformes possuem mais espalhadores de diferentes tipos, que influenciam nas estatísticas do SAR, resultando em altos valores de retorno na polarização HV e grande desvio padrão, decorrentes destas estruturas complexas de posicionamento.

Outros estudos na banda L corroboram Sader (1987), como por exemplo o realizado por Paris e Ustin (1990). Este indica que os casos dominantes das mudanças do  $\sigma^\circ$  foram a partir da mudança na massa dos pequenos espalhadores (galhos, ramos e folhas), e sugere que é necessário conhecer a estrutura física do dossel antes de tentar estimar sua biomassa. Os autores recomendam ainda, o uso da polarização cruzada para estimar biomassa em situações nas quais não se conhece a estrutura do dossel, pois nela não está presente o efeito de reflexão de canto.

Mougin et al. (1993) estudaram a relação entre a arquitetura de coníferas e o sinal de radar na banda X, tendo encontrado diferenças significativas entre  $\sigma^\circ$ VV e  $\sigma^\circ$ HH somente para a porção superior das coníferas, onde os principais espalhadores são galhos e folhas. Os autores afirmam que a diferença entre  $\sigma^\circ$ VV e  $\sigma^\circ$ HH deve-se à orientação de distribuição dos galhos. Ulaby et al. (1987) também encontraram diferença significativa entre  $\sigma^\circ$ VV e  $\sigma^\circ$ HH em dosséis de milho, mais acentuadamente na banda C que na banda L, atribuindo esta diferença à orientação vertical das hastes de milho. Mougin et al. (1993) concluíram, ainda, que o comportamento do  $\sigma^\circ$ VV e  $\sigma^\circ$ HH pode ser significativamente diferente especialmente no topo das coníferas onde a estrutura é relativamente simples. Entretanto quando a estrutura torna-se mais complicada, ambas as polarizações tendem a apresentar o mesmo comportamento.

Outro estudo que relaciona o comportamento do  $\sigma^\circ$  com as variações nas características do dossel, é o realizado por Ulaby e Wilson (1985), no qual é relacionada a importância das hastes e das folhas, em dosséis de soja, na atenuação do  $\sigma^\circ$ . Com a retirada das folhas do dossel, a polarização VV sofreu uma redução de 10% na atenuação do  $\sigma^\circ$  na banda C. Enquanto que, a atenuação do  $\sigma^\circ$  na polarização HH sofreu uma

redução de 50% com a retirada das folhas. Isto indica, segundo os autores, que para a polarização VV, as folhas possuem importância secundária na atenuação do  $\sigma^{\circ}$  em dosséis de soja, em relação às hastes e galhos de um dossel de soja.

As correlações entre as polarizações na banda C e L e o índice de área foliar (LAI) em campos de arroz inundados foram estudadas por Durben et al. (1995). Somente encontraram correlação com o LAI na polarização VV da banda C. Esta correlação encontrada foi negativa, e os autores relacionam o aumento do retroespalhamento da polarização VV, na banda C, com o decréscimo do LAI devido ao domínio da interação do tipo reflexão direta sobre os espalhadores.

Outro aspecto que vêm recebendo grande atenção nos últimos anos são estudos de classificação, decomposição e modelagem de dados de radares polarimétricos. Contudo, a análise de dados polarimétricos envolve problemas relacionados ao entendimento dos mecanismos de espalhamento. Esta dificuldade de entendimento é decorrente do grande número de parâmetros envolvidos na interação das diferentes polarizações com o alvo.

Na tentativa de modelar os mecanismos de espalhamento Freeman e Durben (1996) criaram um modelo para dados SAR multipolarimétricos que prevê três componentes nos mecanismos de espalhamento (reflexão direta, espalhamento do volume e reflexão de canto). Este modelo é utilizado sem qualquer tipo de medidas de campo, e dá um percentual relativo de cada mecanismo de espalhamento. A partir deste modelo os autores concluem que, classes de floresta, na banda C, apresentam como espalhamento dominante o espalhamento do volume, e que há um aumento significativo nos mecanismos de reflexão de canto para floresta pantanosa. Para classes de bambu e *cyperacea*, nas quais a principal diferença está na altura e portanto, na biomassa, encontraram níveis significativos de espalhamento do volume e reflexão de canto para a classe bambu. Para a classe *cyperacea* a camada do dossel é muito espessa não permitindo a penetração da onda, também não ocorrem mecanismos de reflexão de canto.

## 2.9 - ÍNDICES BIOFÍSICOS

A partir da análise de dados polarimétricos, Pope et al. (1994) desenvolveram uma série de índices, com o objetivo de melhorar o esforço de interpretar a fisionomia da vegetação a partir de dados AIRSAR (*Jet Propulsion Laboratory's Airborne PolSAR*), um dos poucos polSARs atualmente em operação.

Para o desenvolvimento dos índices biofísicos, os dados de imagens AIRSAR (matrizes contendo informações de espalhamento de todas as combinações possíveis de polarizações emitidas e recebidas) foram convertidos em cinco arquivos. Quatro destes arquivos (HH, VV, CS, e LK) são proporcionais ao coeficiente de retroespalhamento. Estão expressos em escala linear, e não na escala mais comum ( $\log(\text{dB})$ ), para permitir o uso de algoritmos padrões de processamento de imagens.

O quinto arquivo contém informações de ângulo-fase na matriz de Stokes, que foi convertida em novo parâmetro de diferença de fase (PD). PD é um parâmetro circular que varia de  $-180^\circ$ , para um número uniforme de interações; até  $0^\circ$ , para um número ímpar de interações; e até  $+180^\circ$ , para casos de interações uniformes novamente. A intensidade do retorno é grandemente reduzida por interações múltiplas. Pope et al. (1994) supuseram que valores de PD próximos de  $0^\circ$  são derivados, na maior parte, de interações do tipo *single bounce*, e valores de PD perto de  $\pm 180^\circ$  são derivados de interações do tipo *double bounce*.

Os parâmetros de espalhamento derivados da matriz de Stokes dos elementos são:

- 1) HH
- 2) VV
- 3)  $CS = (HV+VH) / 2$
- 4)  $LK = (VV+HH) / 2$
- 5) PD (VV, HH diferença entre os ângulos de fase)

Pope et al. (1994) destacaram que estes índices não são baseados na combinação de frequências (ex.: banda P *versus* banda C), pois a combinação de frequências é afetada pela imprecisão da calibração entre as bandas. Destacaram, também, que estes índices possuem algumas vantagens, como segue:

- 1) os índices baseados em razões ou diferenças normalizadas, são largamente independentes do efeito de *range* ou declividade do terreno e portanto, são na maioria das vezes, uma função da vegetação ou condição da superfície. Como a penetração na vegetação e interações com a superfície são influenciadas pelo ângulo de incidência de modo similar nas quatro polarizações, o uso dos índices cancela estes efeitos quando aplicados.
- 2) os índices permitem utilizar o conhecimento dentro do uso de modelos de modo a se identificar os tipos de mecanismos de espalhamento. Escolhido corretamente, tal índice é uma função de um tipo específico de interação microonda-vegetação;
- 3) os índices são expressos em uma escala linear, e não na forma mais comum (dB), para permitir o uso direto de algoritmos padrões de processamento de imagem.

A seguir são descritas as características dos índices biofísicos desenvolvidos por Pope et al.(1994).

|   |                    |
|---|--------------------|
| -CSI - índice da estrutura da cobertura | = $VV / (VV+HH)$ ; |
| -VSI - índice de espalhamento do volume | = $CS / (CS+LK)$ ; |
| -BMI - índice de biomassa               | = LK;              |
| -ITI - índice do tipo de interação      | =  PD .            |

O CSI é uma medida da importância relativa da estrutura vertical *versus* a estrutura horizontal na vegetação. CSI não faz sentido para superfícies sem vegetação, como água ou solo exposto. Ecossistemas dominados por troncos ou caules quase verticais terão maiores valores de CSI do que aqueles dominados por ramos horizontais

ou quase horizontais. Com isto, segundo os autores, pode-se comparar valores de CSI de florestas pantanosas, as quais possuem poucas árvores de troncos verticais, com os de florestas altas, as quais são dominadas por troncos verticais. Assim, como o espalhamento do tipo *double bounce* favorece HH, ecossistemas com alta porcentagem de *double bounce* terão valores de CSI mais baixos que ecossistemas com estrutura similar mas com pouca interação do tipo *double bounce*.

O VSI é uma medida da despolarização do sinal de radar incidente polarizado linearmente. Altos valores de VSI resultam quando o retroespalhamento da polarização cruzada (CS) é grande em relação à média do retroespalhamento da polarização paralela (LK). Isto indica uma maior interação da onda no volume do dossel, o que contribui para a despolarização da onda incidente. O VSI é um indicador da espessura ou densidade da cobertura, pois quanto maior a densidade da cobertura menor a penetração no dossel e, conseqüentemente, menores valores de VSI. Isto é melhor demonstrado pelos autores pelo aumento do VSI do mangue em direção à floresta, dados estes na banda-P.

O BMI, para as bandas L e P, é um indicador da quantidade relativa da estrutura lenhosa comparada com a biomassa de folhas. Como o BMI não é uma razão, portanto, é influenciado pela declividade e também, se não corrigido, pelo efeito de *range*. O BMI é maior para florestas senescentes (baixa biomassa de folhas “frescas”) que em florestas maduras, isto ocorre devido à uma maior reflexão das microondas proporcionada por folhas secas que por folhas verdes, proporcionando assim um maior retorno do sinal. O BMI reflete mais diretamente o total de biomassa acima do solo para tipos de vegetação herbácea.

O ITI é uma medida da dominância do espalhamento do tipo *single bounce versus double bounce*. Como os PDs de  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$  possuem o mesmo significado, o valor da magnitude (brilho), em um PD, pode ser ambíguo. Portanto o ITI é baseado em valores absolutos de PD. Altos valores de ITI são indicadores de freqüente espalhamento do tipo *double bounce* entre troncos e ramos, e uma superfície horizontal suave, como água. Deste modo, altos valores de ITI podem indicar vegetação inundada.

O ITI é, também, uma medida de fechamento da cobertura e da homogeneidade. Pois para coberturas homogêneas a maior parte do retroespalhamento vem do espalhamento do tipo *single bounce* da superfície das folhas da cobertura. Nas coberturas mais abertas ou heterogêneas (troncos de árvores emergentes acima do dossel), há maior probabilidade de ocorrer interações do tipo *double bounce*, elevando os valores de ITI.

Pope et al. (1994) destacam que os 4 índices e as 3 bandas (P, L e C) são necessários para caracterizar completamente a paisagem. Entretanto os índices ITI e BMI, e as bandas C e P se sobressaem em importância.

## 2.10 - PROPRIEDADES DISTRIBUCIONAIS DE DADOS SAR

Em uma imagem de radar geralmente observa-se três tipos de variação de intensidade do sinal:

- a) variação da tonalidade média que corresponde à variação espacial das propriedades físicas de um tipo de alvo para outro;
- b) variação textural de um tipo de alvo para outro, que é uma componente flutuante da variação da tonalidade associada à variações aleatórias a nível local; e
- c) o *speckle*, que é uma variação pixel a pixel difundida por toda a imagem, dando à mesma um aspecto “salpicado”.

Estas variações são governadas por diferentes processos e caracterizadas por diferentes funções densidade de probabilidade (FDPs) (Ulaby e Dobson, 1989).

Em algumas aplicações de radar estes três tipos de variação são agrupadas, tratadas como uma única variação, e caracterizadas como um agrupamento do terreno. Para determinar as propriedades distribucionais da variável aleatória para um dado tipo de terreno ou área geográfica, a área é imageada e então a FDP do retroespalhamento é estimada. Em seguida verifica-se qual FDP (Gaussiana, Rayleigh, Exponencial, Gamma, Raiz de Gamma, Log-Normal, Weibull, etc.) melhor caracterizam os dados observados. As FDPs podem ser diferentes para os diferentes alvos e para as diferentes imagens, uma vez que o retroespalhamento é dependente de vários fatores, alguns relacionados ao

sensor (polarização, ângulo de incidência, comprimento de onda, número de visadas, etc.) e outros ao próprio alvo (tipo de alvo, rugosidade, quantidade de água, etc.).

Desta forma modelos de processamento de imagens SAR vêm sendo estudados levando em conta as características do sensor, formato dos dados disponíveis, grau de homogeneidade dos alvos, etc. Yanasse et al. (1994, 1995) e Dutra et al. (1993) desenvolveram estudos visando a discriminação de diferentes tipos de uso do solo a partir da análise das propriedades distribucionais de dados SAR multipolarimétricos.



## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

#### **3.1 - SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A barragem que forma o reservatório de Tucuruí, encontra-se construída no rio Tocantins, no Estado do Pará (Figura 3.1). A bacia do rio Tocantins estende-se entre os paralelos 2° S e 18° S e entre os meridianos 46° W e 55° W. A área de drenagem total da bacia é de cerca de 767.000km<sup>2</sup>, sendo que desta área cerca de 382.000km<sup>2</sup> pertencem à bacia do rio Araguaia, que é o principal afluente do rio Tocantins.

Devido às características do regime hidrológico da bacia, ocorre uma grande variação no nível do reservatório. O período de cheias ocorre entre fevereiro e abril e o período de vazões mínimas ocorre entre setembro e outubro. O nível mínimo normal do reservatório, em relação ao nível do mar, é de 58m e o nível máximo normal é de 72m. O reservatório de Tucuruí abriga um volume de água de aproximadamente 45 bilhões de m<sup>3</sup>, inundando uma área máxima estimada em 2.875km<sup>2</sup>. A profundidade máxima do reservatório está em torno de 72 m e a profundidade média em 18 m. O tempo de residência hidráulica pode variar entre 20 e 500 dias, devido às características do reservatório (Pereira et al., 1990).

A superfície do reservatório é extremamente dendrítica, possuindo um perímetro externo de 7.700km. Este caráter dendrítico cria condições para que apareçam inúmeros compartimentos estanques de água com propriedades limnológicas diversas.

Pequenas oscilações no nível da água do reservatório são suficientes para alterar sua área inundada. A margem esquerda do reservatório é mais afetada por estas oscilações devido ao pequeno gradiente dos seus afluentes. Estas variações na área inundada trazem conseqüências para o ecossistema aquático. A avaliação do efeito que a oscilação do nível da água têm sobre a área inundada do reservatório é dificultada pela ocupação das macrófitas aquáticas, as quais dificultam o acesso às margens. Esta

ocupação das macrófitas é variável ao longo do ano devido às oscilações (Novo et al., 1995).

A área de estudo específica para este trabalho é o braço do rio Pucuruí (Figura 3.1), que corresponde à área onde foi feito levantamento aerofotográfico. Esta área foi escolhida por apresentar uma grande variação no nível da água e possuir uma grande quantidade e variedade de plantas aquáticas. Estas características prejudicam a definição dos limites terra/água do reservatório.

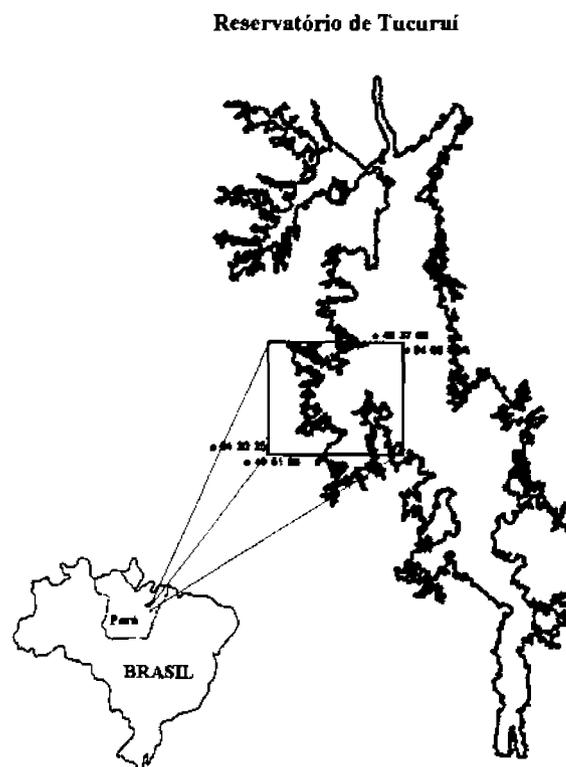


Fig. 3.1 - Reservatório de Tucuruí.

### 3.2 - AQUISIÇÃO DOS DADOS

Os dados utilizados para este estudo foram obtidos durante a missão SAREX 92. A missão SAREX 92 propiciou a oportunidade de estudo científico do comportamento de alvos tropicais utilizando radar acrotransportado multipolarimétrico na banda C, visto que esta banda está disponível nos sistemas radar em operação na década de 90, como o SAR do ERS-1 e 2 e o SAR do RADARSAT.

O objetivo geral da missão SAREX 92 no Brasil foi o de compreender a utilidade dos dados de SAR obtidos na banda C, sob diferentes geometrias de aquisição e modos de polarização, em relação aos dados disponíveis nas faixas do visível e infravermelho próximo. Os resultados da missão também permitiram determinar as melhores configurações de aquisição de dados de sistemas SAR a serem colocadas a bordo de satélites programados para lançamento até o fim desta década (Wooding e Zmuda, 1994; Novo et al., 1995).

O objetivo específico da missão SAREX 92 em Tucuruí foi o de avaliar o uso de dados SAR aerotransportado operando na banda C no sentido de: 1) identificar o limite do reservatório em regiões infestadas por plantas aquáticas; 2) delimitar a superfície da água de reservatórios artificiais em regiões de floresta; 3) delimitar áreas alagadas pelo reservatório que reproduzem condições ambientais semelhantes às das planícies de inundação; 4) delimitar áreas de paliteiros emersos e submersos; 5) delimitar áreas ocupadas por macrófitas flutuantes; e 6) diferenciar espécies de macrófitas flutuantes.

O SAR utilizado na missão SAREX 92 foi o C/X SAR de propriedade do Canada Centre for Remote Sensing (CCRS) o qual operou a bordo de um avião Convair 580. O sistema C/X SAR-CCRS é um sistema de frequência dupla (bandas C e X) e polarização múltipla (HH, HV, VV, VH). Durante a missão SAREX 92 o avião operou a uma altura de aproximadamente 7 km e com três modos de operação selecionáveis, mostrados na Tabela 1.

**TABELA 3.1 - MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA C/X SAR-CCRS.**

| Modo         | Largura da Faixa Imageada | Ângulos de incidência | Resolução |
|--------------|---------------------------|-----------------------|-----------|
| NADIR        | 20 km                     | 18° a 74°             | 6m x 6m   |
| NARROW SWATH | 18 km                     | 45° a 76°             | 6m x 6m   |
| WIDE SWATH   | 60 km                     | 45° a 85°             | 10m x 20m |

A Figura 3.2 ilustra o modo nadir, uma vez que neste trabalho só foram utilizadas as imagens obtidas neste modo.

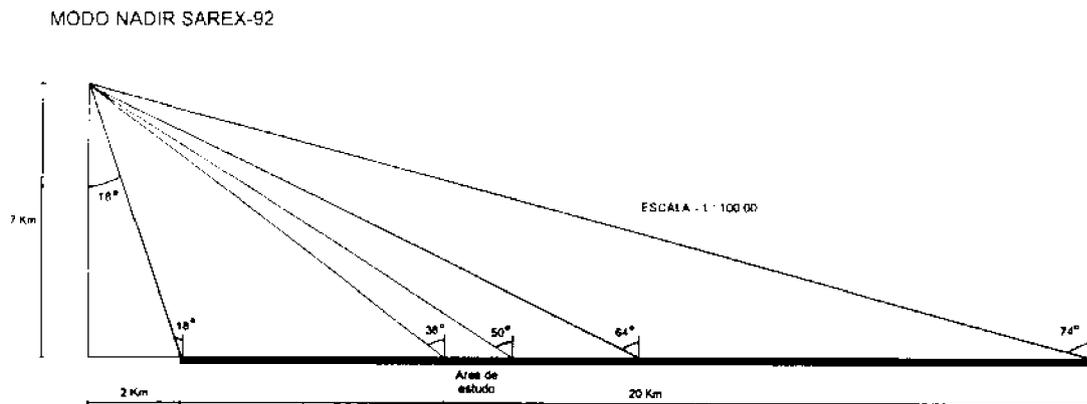


Fig. 3.2 - Modo Nadir de operação do C/X SAR-CCRS.

Os dados da missão SAREX 92 foram processados em tempo real através de um processador que permitiu a obtenção de imagens digitais com 7 looks e também quick-looks em papel.

Os sobrevôos de imageamento foram realizados no dia 14 de abril de 1992, quando foram recobertas 5 faixas com o C/X SAR-CCRS. Concomitantemente, o avião Bandeirante do INPE fez o aerolevanteamento de uma faixa ao longo do braço do rio Pucuruí, permitindo assim, a aquisição de fotografias aéreas coloridas na escala 1:10.000; e ainda, uma equipe trabalhava no reservatório com o objetivo de localizar os bancos de plantas aquáticas e identificar os gêneros desses bancos.

Este levantamento aerofotográfico fez-se necessário no sentido de servir como referência na localização exata dos alvos de interesse, e também, para atuar como chave de identificação dos diferentes gêneros de plantas aquáticas abordadas neste estudo. Naquela fase da pesquisa a questão investigada era a capacidade do sistema SAR diferenciar gêneros de plantas aquáticas. Portanto o levantamento aerofotográfico na escala 1:10.000 foi utilizado como referência para se discriminar os gêneros existentes.

Outros aspectos que também sugeriram o levantamento aerofotográfico foram a falta de cartografia de detalhe da área (mapas desatualizados) e a dificuldade de acesso ao interior dos bancos. Esta dificuldade em função da variação do nível do reservatório e da grande dimensão e biomassa dos bancos de plantas aquáticas.

### 3.3 - FORMATO DOS DADOS

Os dados obtidos durante a missão SAREX 92, segundo Hawkins e Teany (1994), foram submetidos somente a uma calibração relativa. As constantes de calibração foram determinadas empiricamente usando refletores de canto colocados em uma área teste perto de Ottawa, Canadá. Foram feitos sobrevôos nesta área teste antes e logo após a missão SAREX 92, no sentido de avaliar a estabilidade do sistema. Os dados SAREX 92 foram calibrados em relação a dados do ERS-1.

A equação de calibração sugerida por Hawkins e Teany (1994) é:

$$\sigma_{dB}^{\circ} = 10 \log_{10} [DN^2(ij) - DN_n^2(j)] + Fcal(j) \quad (3.1)$$

onde: -  $DN(ij)$  é o valor do pixel para a linha  $i$  e coluna  $j$ ;  
 -  $DN_n(j)$  é valor do ruído para a coluna  $j$ ;  
 -  $Fcal(j)$  é o fator de calibração para a coluna  $j$ .

Nas imagens recebidas pelo INPE foram aplicados os procedimentos e os valores de calibração sugeridos pelo CCRS, obtendo como produto final uma imagem cujos níveis digitais ( $DN$ ) correspondem a valores de amplitude ( $A$ ) do sinal, como mostrado abaixo,

$$A = \sqrt{DN^2(ij) - DN_n^2(j)} + 10^{\left(\frac{Fcal(j) - \overline{Fcal}}{20}\right)} \quad (3.2)$$

onde:

-  $\overline{Fcal}$  é o valor médio do fator de calibração.

Desta forma a equação utilizada para converter os dados de nível digital ( $DN$ ) para  $\sigma_{dB}^{\circ}$  é mostrada abaixo:

$$\sigma_{dB}^{\circ} = 10 \log_{10} A^2 + \overline{Fcal} \quad (3.3)$$

Os valores de  $F_{cal}$  são diferentes para cada polarização, conforme mostrado na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - VALORES DE  $F_{cal}$ .

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| HH = -48,660118 | HV = -45,51140  |
| VV = -48,40868  | VH = -45,634056 |

### 3.4 - MATERIAL UTILIZADO E PROCEDIMENTOS DE TRATAMENTO DOS DADOS

O material para este trabalho consistiu em 11 fotografias aéreas coloridas em papel na escala 1:10.000; imagens digitais da área de estudo obtidas pelo SAR nas quatro polarizações com resolução espacial de 6 metros; uma estação de trabalho e o software de tratamento de imagens PCI.

Todos os passos da metodologia adotada, em forma esquemática, podem ser visualizados na Figura 3.4.

As fotografias aéreas foram utilizadas como verdade terrestre, e serviram para a obtenção de um mapa de referência, no qual se identificaram os bancos dos diferentes gêneros de plantas aquáticas.

No sentido de registrar digitalmente as informações de verdade terrestre com as informações provenientes do SAR, fez-se a transformação para dados digitais das fotografias aéreas, usando o HP SCANJET II CX.

De posse das 11 fotografias aéreas em formato digital, construiu-se um mosaico. No sentido de tentar reduzir o efeito da distorção presente em fotografias aéreas, devido à sua projeção cônica, todas as fotografias tiveram suas bordas cortadas em no mínimo 10%, tentando desta forma concentrar, o máximo possível, o estudo na região central das fotografias a qual possui menor distorção.

As imagens SAR sofreram somente as correções necessárias sugeridas pelo CCRS (Seção 3.3), permanecendo como imagens de amplitude. Essas imagens foram cortadas, selecionando-se assim somente a área de interesse, referente à área das fotografias aéreas. As características das imagens SAR são mostradas na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 - CARACTERÍSTICAS DO SAR

|   |                |
|---|----------------|
| <b>Frequência</b>                         | 5,3 GHz        |
| <b>Comprimento de Onda</b>                | 5,66 cm        |
| <b>Polarização</b>                        | HH, VV, HV, VH |
| <b>Modo</b>                               | Nadir          |
| <b>Ângulo de Incidência na Área Teste</b> | 38° a 50°      |
| <b>Tamanho do Pixel</b>                   | 4m x 4,31m     |
| <b>Resolução</b>                          | 6m x 6m        |
| <b>Número de Looks</b>                    | 7              |

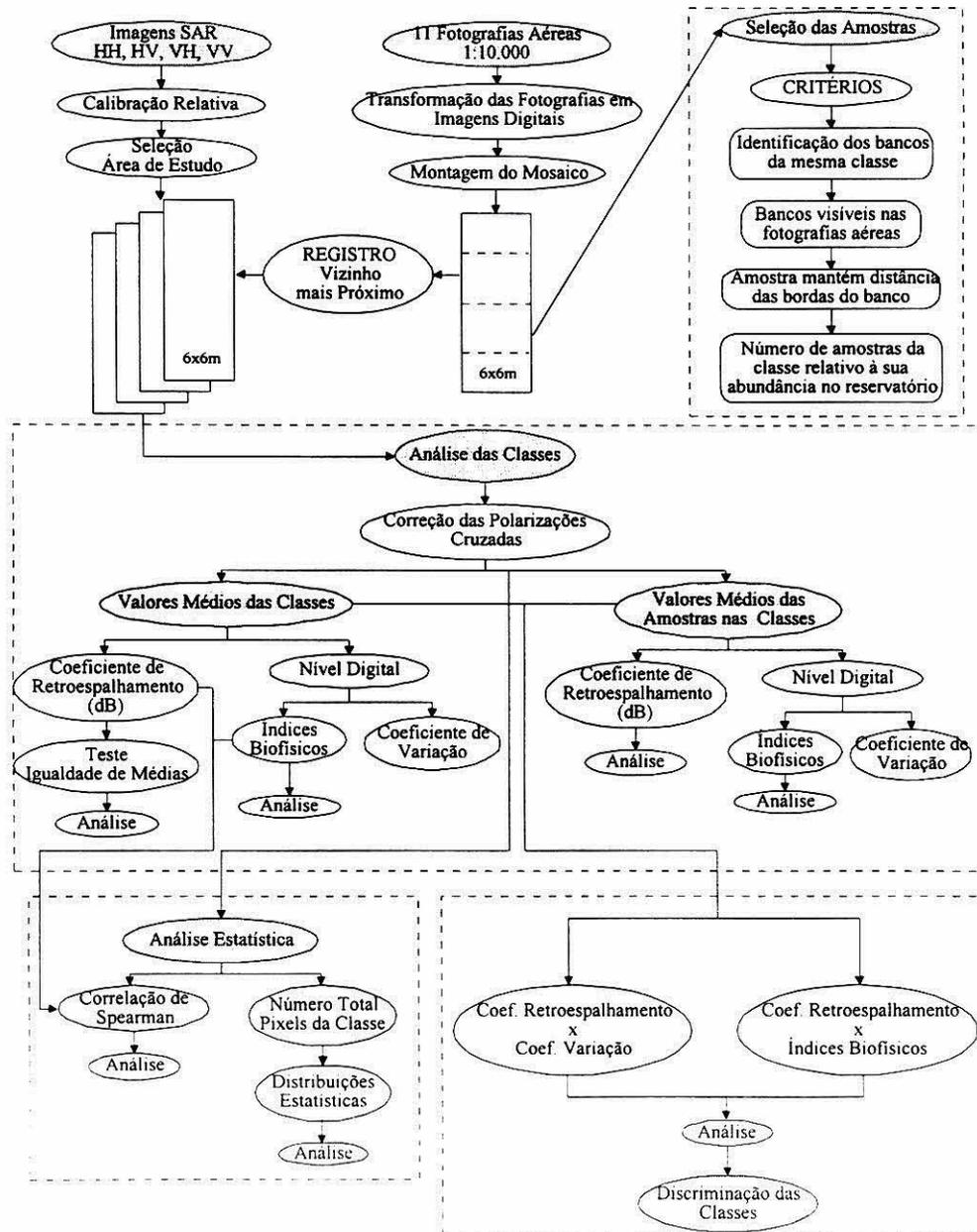


Fig.3.3 - Fluxograma da metodologia de trabalho.

O mosaico das fotografias aéreas foi então registrado tomando como referência as imagens SAR. Foram coletados 47 pontos de controle. No momento da coleta dos pontos de controle tomou-se o cuidado de adquiri-los homogeneamente ao longo de toda a imagem (Figura 3.4a). A interpolação dos pixels do mosaico em relação às imagens SAR foi feita utilizando o método do vizinho mais próximo, e um modelo de 3ª ordem. O erro foi de 1,95 em x, e de 1,91 em y (Figura 3.4b). O objetivo do registro foi o de permitir coletar amostras nas fotografias aéreas de maneira a estas amostras corresponderem à mesma região nas imagens SAR.

A escolha da interpolação pelo método do vizinho mais próximo deveu-se à tentativa de alterar o mínimo possível o aspecto radiométrico do mosaico, uma vez que este seria usado para a seleção das amostras. Também não se fez um registro das imagens com carta topográfica para não alterar o aspecto radiométrico das imagens SAR.

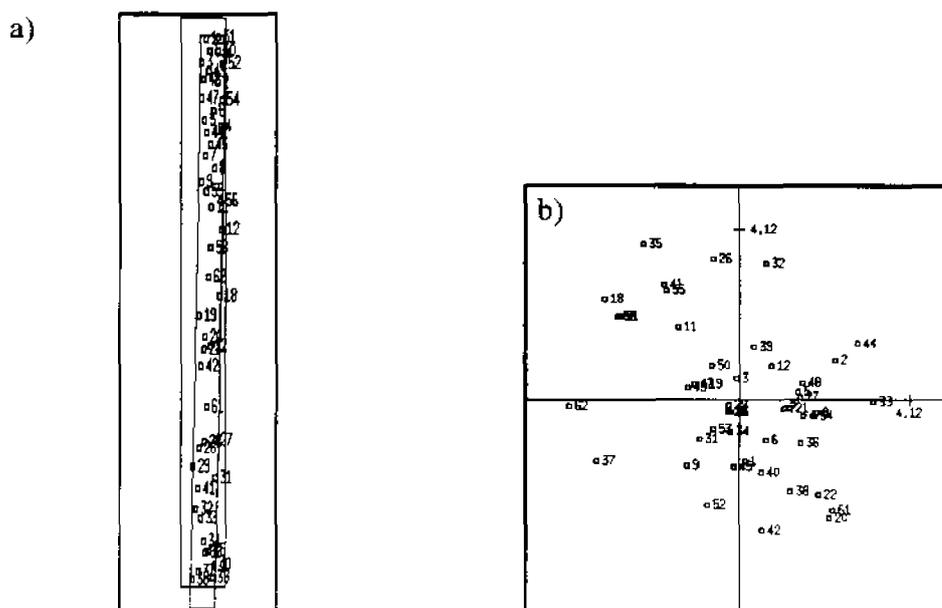


Fig. 3.4 - a) Localização dos pontos de controle do registro da imagem; b) Erro dos pontos de controle.

Com as imagens registradas iniciou-se a coleta de amostras de cada classe, usando como referência o mosaico das fotografias aéreas. As classes amostradas foram: Água, Paliteiros, Floresta, Heterogêneo, *Eichhornia*, *Pistia*, *Salvinia*, *Scirpus* e *Typha*.

Estas classes amostradas foram aquelas previamente identificadas a partir das fotografias aéreas e trabalho de campo. Suas características são apresentadas na Tabela 4.1.

A seleção das amostras de cada classe obedeceu alguns critérios:

- a) os bancos deveriam ser visíveis e identificáveis nas fotografias aéreas;
- b) a identificação dos bancos de uma mesma classe deveria apresentar características semelhantes nas fotografias aéreas (coloração, textura, homogeneidade). Entretanto algumas classes, principalmente *Scirpus* e Heterogêneo, apresentavam bancos com características diferentes devido a variação na idade, na altura, etc. Estes bancos, mesmo apresentando características um pouco distintas, foram amostrados. Isto devido a certeza de que o banco pertencia a respectiva classe, e também com o intuito de incluir essas variações intra-classe, na caracterização radiométrica da mesma;
- c) as amostras foram obtidas mantendo uma certa distância das bordas desta classe, para que os pixels da amostra correspondessem ao centro do banco amostrado, e caracterizassem melhor a classe;
- d) o número de amostras ( $n$ ), retirado de cada classe, foi associado com a presença de cada classe no reservatório. Assim as classes mais frequentes no reservatório possuem um maior número de amostras analisadas.

Desta forma cada classe possui um número diferente de amostras, e cada amostra apresenta um número variado de pixels, este número de pixels de cada amostra depende do tamanho do banco amostrado.

Após a obtenção das amostras, cada classe foi analisada em relação às imagens SAR, onde foram anotadas a média e o desvio padrão dos níveis digitais para as quatro polarizações de cada amostra. Os níveis digitais foram utilizados ainda, no cálculo do coeficiente de variação das classes, o qual é obtido a partir da razão entre o desvio padrão e a média, e também foram utilizados para a obtenção dos índices biofísicos. O cálculo dos índices biofísicos foram feitos com os valores médios das classes. As fórmulas para obtenção dos índices estão apresentadas na Seção 2.9.

A conversão dos valores médios de nível digital para valores de coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ) em dB, foram feitos a partir dos valores médios do nível digital de cada classe.

Todos os parâmetros acima citados, o coeficiente de variação, os índices biofísicos e o  $\sigma^\circ$ , foram calculados e analisados tanto para os valores médios das amostras dentro de cada classe, quanto para a média das amostras em cada classe.

Com o objetivo de avaliar a existência de redundância de informações entre o  $\sigma^\circ$  das polarizações, e entre estas e os índices biofísicos, calculou-se as correlações entre os valores médios do  $\sigma^\circ$  das polarizações e dos índices em cada classe, através de estatística não paramétrica. Devido ao pequeno número de amostras de algumas classes foi utilizado o coeficiente de correlação por postos de Spearman ( $r_s$ ).

O coeficiente de correlação por postos de Spearman é uma medida de associação que exige que ambas as variáveis se apresentem em escala de mensuração, de modo que os objetos ou indivíduos em estudo possam dispor-se por postos em duas séries ordenadas. O coeficiente de correlação de Spearman não exige que os dados possuam distribuição normal (Siegel, 1975). O  $r_s$  é obtido a partir da fórmula:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N^3 - N} \quad (3.4)$$

onde:  $d_i = X_i - Y_i$ ,

$X_i$  e  $Y_i$  são os escores das variáveis estudadas, e

$N$  é o número de amostras.

É comum, em dados de sensoriamento remoto, a aplicação de classificadores e testes estatísticos que pressupõem uma distribuição normal dos dados analisados. Em geral a normalidade dos dados é suposta, mas sem a realização de testes. Contudo, o entendimento das propriedades estatísticas de dados SAR é importante, pois estas propriedades podem ser usadas na discriminação dos alvos. Dutra et al. (1993) e

Yanasse et al. (1994, 1995) têm apresentado estudos das propriedades estatísticas de dados SAR na discriminação e classificação de coberturas do solo.

No intuito de observar o comportamento dos níveis digitais, em relação às suas propriedades estatísticas, nas diferentes classes e polarizações, testou-se a aderência dos dados às seguintes distribuições contínuas: Normal, Log-Normal, Amplitude GO, Weibull, e Raiz de Gamma. O teste utilizou a estatística  $\chi^2$ , baseada na diferença entre o valor observado e o valor esperado segundo uma dada distribuição, a qual segue uma distribuição qui-quadrada. Para este fim foi utilizado um software desenvolvido no INPE, cujos detalhes podem ser encontrados em Vieira (1996).

Por fim fez-se um cruzamento dos valores médios, tanto das amostras quanto das classes, do  $\sigma^0$  com os do coeficiente de variação, e do  $\sigma^0$  com os dos índices biofísicos. O objetivo destes cruzamentos dos valores foi o de avaliar a capacidade de discriminação das classes através desses parâmetros estudados.



## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudos do comportamento do coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ) em valores de dB vêm sendo realizados desde o início da década de 80. Entretanto, a maioria destes estudos está concentrada em áreas de florestas, visando avaliar a sua biomassa a partir de valores de  $\sigma^\circ$  (dB) obtidos segundo diferentes configurações do sistema radar, como: frequência, polarização e ângulo de incidência (Sader, 1987; Paris e Ustin, 1990; Dobson et al., 1992; Le Toan et al., 1992; Mougín et al., 1993; Pulliainen et al. 1994; Wang et al. 1994; Dobson et al., 1995).

Estudos dessa natureza concentrados em vegetação herbácea são menos freqüentes, e estão restritos à vegetação herbácea em solos secos, principalmente em espécies cultiváveis como: milho, soja, alfafa, entre outras (Ulaby et al., 1979; Paris, 1983; Rosenthal et al., 1985; Ulaby e Wilson, 1985; Wang et al., 1986; Ulaby et al., 1987; Bouman, 1991; Freeman et al., 1994). Em regiões alagadiças existem alguns estudos envolvendo principalmente vegetações arbóreas, como os manguezais (Imhoff et al., 1986; Ott et al., 1990; Hess et al., 1990; Pope et al., 1994). Pesquisas envolvendo vegetação herbácea em regiões alagadiças são realmente escassos. Durben et al. (1995) apresentaram estudo em campos de arroz inundados. Com relação a estudos envolvendo plantas aquáticas especificamente, somente Novo et al. (1994, 1996); Costa (1995) e Costa et al. (1996) têm desenvolvido trabalhos e apresentado resultados.

O estudo do  $\sigma^\circ$  em dosséis de áreas alagadiças difere um pouco daquele de áreas que possuem solo seco como substrato. Isto se deve à presença de água sob o dossel. Esta água sob o dossel, devido às suas características dielétricas, influi na amplitude do  $\sigma^\circ$ . Desta forma, a amplitude do  $\sigma^\circ$  de um dossel que possui a água como substrato, será maior que a de um dossel, com as mesmas características, que possua solo seco como substrato. Esta diferença entre as amplitudes será tanto maior quanto menor for a influência do dossel no  $\sigma^\circ$ . Esta influência está relacionada à frequência utilizada e às características estruturais do dossel (Hess et al., 1990).

Neste estudo será investigado o comportamento do retroespalhamento de alguns gêneros de plantas aquáticas. A hipótese subjacente é que as diferenças entre os gêneros em torno de suas características estruturais e morfológicas é tal, que torna-se possível distinguí-las com base em suas diferenças de retroespalhamento.

As principais características das classes estudadas, mapeáveis em fotografias aéreas coloridas na escala 1:10.000, são mostradas na Tabela 4.1 para facilitar a análise dos resultados. Além das plantas aquáticas, também foram incluídas como classes de investigação a água, a floresta e os paliteiros, visto que a finalidade de um estudo desta natureza é distinguir as comunidades de plantas aquáticas de classes de cobertura do solo e água.

**TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS CLASSES TEMÁTICAS.**

| Classe Temática   | Características Físicas   |
|-------------------|---|
| Água              | Superfície lisa da água sem presença de paliteiros e macrófitas.  |
| Paliteiros        | Superfície da água com grande número de troncos de árvores mortas aflorando acima da superfície da água, com altura variando entre 50cm e 20m, e diâmetro de troncos variando entre 15cm até 1m. Podem funcionar como refletores de canto.  |
| Floresta          | Áreas de floresta primária com pequenas porções de floresta secundária, áreas cultivadas e pastagens.   |
| <i>Scirpus</i>    | Bancos grandes da família <i>Cyperacea</i> , geralmente densos, com folhas afiladas flutuantes, podendo chegar a 1,5m de altura. Podem encontrar-se em diferentes estágios fenológicos e associados a pequenos bancos de outros gêneros de plantas aquáticas. Geralmente associados à presença de paliteiros. |
| <i>Eichhornia</i> | Bancos densos do gênero <i>Eichhornia sp.</i> , estreitos, homogêneos, flutuantes, com plantas chegando até 30 cm de altura, com pecíolos orientados verticalmente e folhas ovaladas chegando a 15 cm de comprimento.   |
| <i>Typha</i>      | Bancos pequenos do gênero <i>Typha sp.</i> , com folhas emergentes e aspecto semelhante ao gênero <i>Scirpus sp.</i> , podendo chegar a 2m de altura.   |
| <i>Salvinia</i>   | Bancos homogêneos do gênero <i>Salvinia sp.</i> , flutuantes, localizados próximos aos bancos de <i>Scirpus</i> . Folhas pequenas (3 cm). Possibilidade de ocorrência de paliteiros.  |
| <i>Pistia</i>     | Bancos pequenos do gênero <i>Pistia sp.</i> , associados a ocorrência de <i>Scirpus</i> . folhas pequenas flutuantes (5 cm).  |
| Heterogêneo       | Bancos com vários gêneros de macrófitas, geralmente densos e com predominância de <i>Scirpus</i> .  |

Para uma melhor compreensão, a análise dos resultados é apresentada em quatro seções. A primeira apresenta os valores numéricos do  $\sigma^{\circ}$  e dos índices biofísicos.

abordando os valores médios desses parâmetros em relação às classes estudadas. A seguir os aspectos distribucionais das classes são analisados, bem como as correlações entre os parâmetros dentro das classes. A terceira seção apresenta uma análise da variação dos parâmetros ( $\sigma^\circ$  e índices biofísicos) em relação às amostras obtidas dentro de cada classe. Finalmente, a última seção discute a discriminação entre as classes a partir dos parâmetros estudados.

#### 4.1 - COMPORTAMENTO MÉDIO DO RETROESPALHAMENTO E DOS ÍNDICES BIOFÍSICOS

O comportamento do  $\sigma^\circ$  e dos índices biofísicos das classes estudadas é apresentado nesta seção. São discutidos somente os valores médios de cada classe bem como seu range dinâmico. Nesta seção é apresentada ainda, uma correção dos dados para as polarizações cruzadas.

A Tabela 4.2 apresenta, para cada classe e polarização estudada, o número de amostras coletadas ( $n$ ), o número total de pixels amostrados, o valor médio do nível digital (ND) e seu desvio padrão (DP) correspondente.

**TABELA 4.2 - NÍVEL DIGITAL MÉDIO (ND) E DESVIO PADRÃO (DP) PARA AS DIFERENTES CLASSES, NAS QUATRO POLARIZAÇÕES.**

| Classe            | Pixels  | $n$ | HH    |       | HV    |       | VH    |       | VV    |       |
|-------------------|---------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   |         |     | ND    | DP    | ND    | DP    | ND    | DP    | ND    | DP    |
| Água              | 27.383  | 13  | 10,17 | 3,44  | 11,19 | 3,86  | 10,24 | 3,47  | 12,06 | 3,95  |
| Paliteiros        | 33.691  | 14  | 40,86 | 25,85 | 19,79 | 8,88  | 19,83 | 9,21  | 30,08 | 16,11 |
| Floresta          | 243.326 | 18  | 58,87 | 23,48 | 53,59 | 19,80 | 54,12 | 20,76 | 60,00 | 23,65 |
| <i>Scirpus</i>    | 155.176 | 39  | 68,01 | 16,71 | 53,69 | 13,94 | 54,71 | 13,80 | 55,06 | 16,07 |
| <i>Eichhornia</i> | 14.973  | 8   | 47,42 | 12,89 | 41,99 | 10,66 | 42,50 | 10,88 | 50,68 | 14,34 |
| <i>Typha</i>      | 3.496   | 8   | 55,78 | 18,09 | 39,73 | 12,16 | 40,30 | 12,84 | 51,90 | 15,40 |
| <i>Salvinia</i>   | 26.607  | 19  | 48,92 | 22,58 | 34,36 | 12,74 | 34,41 | 13,49 | 48,98 | 17,53 |
| <i>Pistia</i>     | 4.078   | 5   | 51,59 | 16,53 | 43,53 | 13,18 | 44,05 | 13,56 | 45,06 | 16,20 |
| Heterogêneo       | 69.804  | 9   | 64,78 | 22,17 | 50,15 | 17,37 | 50,97 | 18,17 | 59,84 | 19,64 |

Os valores de retroespalhamento das classes estão expressos em níveis digitais na Tabela 4.2, na qual observam-se valores de desvio padrão elevados, característicos de imagens de radar. Contudo, valores do  $\sigma^\circ$  são normalmente

apresentados em decibéis (dB). Quando o  $\sigma^\circ$  é expresso em dB significa que está relacionado com uma potência conhecida de retroespalhamento, de um alvo que possui reflexão perfeita. Potência esta, geralmente determinada nos processos de calibração. Assim valores de  $\sigma^\circ$  (dB) representam uma unidade de potência, e desta forma valores de  $\sigma^\circ$  de uma mesma classe, obtidos sob diferentes configurações do sistema radar, podem ser comparados com maior segurança.

Desta forma, a Tabela 4.3 apresenta os valores médios de nível digital convertidos em  $\sigma^\circ$  (dB) através da Equação (3.3). Nota-se pela tabela, que os valores de  $\sigma^\circ$  nas polarizações cruzadas são maiores que os valores de  $\sigma^\circ$  nas polarizações paralelas. Isto indica um maior retorno do sinal nas polarizações cruzadas do que nas polarizações paralelas. Este fato não se enquadra aos princípios teóricos dos sistemas radar, e foi atribuído a problema na calibração das imagens, a qual realizou-se no Canadá.

**TABELA 4.3 - VALORES MÉDIOS DO  $\sigma^\circ$ , DAS CLASSES ESTUDADAS, NAS QUATRO POLARIZAÇÕES.**

| Classe            | HH         | HV         | VH         | VV         |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
|                   | Média (dB) | Média (dB) | Média (dB) | Média (dB) |
| Água              | -28,51     | -24,54     | -25,43     | -26,78     |
| Paliteiros        | -16,43     | -19,58     | -19,69     | -18,84     |
| Floresta          | -13,26     | -10,93     | -10,97     | -12,84     |
| <i>Scirpus</i>    | -12,01     | -10,91     | -10,87     | -13,59     |
| <i>Eichhornia</i> | -15,14     | -13,05     | -13,07     | -14,31     |
| <i>Typha</i>      | -13,73     | -13,53     | -13,53     | -14,10     |
| <i>Salvinia</i>   | -14,87     | -14,79     | -14,90     | -14,61     |
| <i>Pistia</i>     | -14,41     | -12,73     | -12,75     | -15,33     |
| Heterogêneo       | -12,43     | -11,51     | -11,49     | -12,87     |

Para permitir uma análise mais adequada dos dados foi aplicada uma correção nas imagens de polarização cruzada com base em dados da literatura. Procedimento deste tipo já foi anteriormente utilizado por Beaudoin et al. (1994), que utilizaram dados teóricos de floresta densa na banda C e polarização VV, para obter uma calibração relativa de seus dados, obtidos durante a missão SAREX 92 na Guiana Francesa.

O primeiro passo desta correção foi identificar valores de  $\sigma^\circ$ , nas quatro polarizações, associados a alvos semelhantes e referentes à mesma faixa de ângulo de incidência utilizado no presente estudo. E desta forma avaliar as diferenças dos valores do  $\sigma^\circ$  (dB) entre as polarizações paralelas e cruzadas nestes dados da literatura.

Para a correção foram utilizados valores de  $\sigma^\circ$ , na banda C, publicados por Ulaby e Dobson (1989) para as classes arbustos, vegetação baixa e gramíneas, com ângulos de incidência entre 40° e 50°. Calculou-se o valor médio do  $\sigma^\circ$  encontrado na literatura para as três classes em cada polarização, e a seguir foi determinada a diferença ( $D$ ) entre os valores médios das polarizações VV e HV (Tabela 4.4).

**TABELA 4.4 - VALORES DE  $\sigma^\circ$  MÉDIOS DE 3 CLASSES (ARBUSTOS, VEGETAÇÃO BAIXA E GRAMÍNEAS) COM ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA ENTRE 40° E 50°, PUBLICADOS POR ULABY E DOBSON (1989).**

| HH       | VV       | HV       | VV-HV = D |
|----------|----------|----------|-----------|
| -13,4 dB | -12,9 dB | -19,5 dB | 6,6 dB    |

O mesmo procedimento foi realizado para valores publicados por Freeman e Durben (1996) para várias classes (floresta, rebrota, floresta inundada, etc.) com ângulos de incidência entre 40° e 50°, na banda C. O valor encontrado para a diferença entre VV e HV também foi de 6,6 dB. Com isto adotou-se esta diferença como uma diferença base entre as polarizações VV e HV. Utilizou-se a polarização VV, e não a HH, para estimar a diferença pelo fato de que os dados da missão SAREX 92 foram calibrados com dados do SAR a bordo do satélite ERS-1, o qual possui polarização VV.

Como em geral, os valores das polarizações cruzadas, nos dados SAREX, foram maiores que os das polarizações paralelas, calculou-se a variação média, para todas as classes, através da diferença dos valores de HV e VV ( $\Delta_{HV-VV}$ ). Esta diferença média foi de 1,3 dB, e mostra quanto os valores do  $\sigma^\circ$  das polarizações cruzadas (HV e VH), em média, são maiores do que os da polarização VV.

Desta forma foi criado um fator de correção ( $K$ ), de forma a diminuir a distorção observada nos dados oriundos das polarizações cruzadas nos dados SAREX. Os procedimentos de correção dos valores de  $\sigma^\circ$  são mostrados abaixo:

$$K = \Delta_{HV-VV} + D \quad \Rightarrow \quad K = 1,3 + 6,6 \quad \Rightarrow \quad K = \underline{7,9 \text{ dB}}$$

onde:

- $\Delta_{HV-VV}$  é a diferença média dos valores de  $\sigma^\circ$  entre HV e VV nos dados SAREX;
- $D$  é a diferença média entre os valores de  $\sigma^\circ$  das polarizações VV e HV, calculados a partir de dados da literatura.

Assim o valor  $K$  (7,9 dB) foi subtraído de todos os valores do  $\sigma^\circ$  das polarizações cruzadas obtidas através dos dados da missão SAREX 92. Aplicou-se o valor 0,4 (obtido a partir da Equação (3.3), com  $K=7,9$ ) aos níveis digitais das imagens de polarização cruzada.

A Tabela 4.5 mostra os valores médios do  $\sigma^\circ$  corrigidos e o range dinâmico (RD) para cada classe. O range dinâmico é a máxima variação entre os valores médios do  $\sigma^\circ$  das amostras, dentro da mesma classe.

A comparação dos dados do  $\sigma^\circ$  antes e após a correção (Tabelas 4.3 e 4.5) mostra a diminuição dos valores do  $\sigma^\circ$  para as polarizações cruzadas, ficando assim, próximos a valores geralmente observados na literatura.

**TABELA 4.5 -  $\sigma^\circ_{DB}$  MÉDIO CORRIGIDOS E RANGE DINÂMICO (RD) PARA AS DIFERENTES CLASSES, NAS QUATRO POLARIZAÇÕES.**

| Classe            | HH         |         | HV         |         | VH         |         | VV         |         |
|-------------------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
|                   | Média (dB) | RD (dB) |
| Água              | -28,51     | 4,53    | -32,19     | 7,65    | -33,20     | 6,79    | -26,78     | 4,84    |
| Paliteiros        | -16,43     | 5,59    | -27,45     | 5,87    | -27,70     | 5,22    | -18,84     | 5,00    |
| Floresta          | -13,26     | 1,40    | -19,01     | 2,19    | -19,05     | 2,14    | -12,84     | 0,84    |
| <i>Scirpus</i>    | -12,01     | 3,51    | -19,37     | 3,95    | -19,32     | 4,11    | -13,59     | 5,36    |
| <i>Eichhornia</i> | -15,14     | 4,19    | -21,24     | 4,02    | -21,24     | 4,03    | -14,31     | 4,78    |
| <i>Typha</i>      | -13,73     | 1,39    | -21,71     | 2,28    | -21,65     | 2,77    | -14,10     | 1,55    |
| <i>Salvinia</i>   | -14,87     | 4,00    | -23,70     | 4,76    | -23,90     | 5,44    | -14,61     | 3,47    |
| <i>Pistia</i>     | -14,41     | 2,92    | -21,48     | 2,56    | -21,49     | 2,51    | -15,33     | 5,09    |
| Heterogêneo       | -12,43     | 4,06    | -20,26     | 4,81    | -20,24     | 4,90    | -12,87     | 5,13    |

Baixos valores do range dinâmico indicam uma menor variação do  $\sigma^0$  dentro da classe, sugerindo maior homogeneidade entre as amostras, permitindo assim, uma melhor caracterização da classe (Ahern et al., 1993). Valores menores do range dinâmico foram encontrados para as classes *Typha* e Floresta nas quatro polarizações. Em média, a polarização HH apresenta menores valores de range dinâmico (3,51 dB), indicando uma maior homogeneidade no retroespalhamento das classes nesta polarização. As classes *Scirpus* e *Pistia* apresentam diferença acentuada dos valores do range dinâmico entre as polarizações HH e VV, sendo os maiores valores na polarização VV. A polarização que apresentou os maiores valores, em média, foi a VV (4,01 dB), sugerindo menor homogeneidade das classes. Contudo, esta diferença entre o range dinâmico das polarizações HH e VV é muito pequena, ficando abaixo de 1 dB. Ulaby (1980) estudando classes agricultáveis, também encontrou valores de range dinâmico maiores na polarização VV que na HH.

A Figura 4.1 mostra o range dinâmico nas quatro polarizações, para cada classe. Observando esta figura pode-se ter uma idéia da possibilidade de discriminação entre as classes. A Figura 4.1 indica pouca possibilidade de discriminação entre as classes nas quatro polarizações. Classes com um menor range dinâmico (como a Floresta por exemplo) aparecem dentro do intervalo de classes com range dinâmico maior (como o *Scirpus* por exemplo).

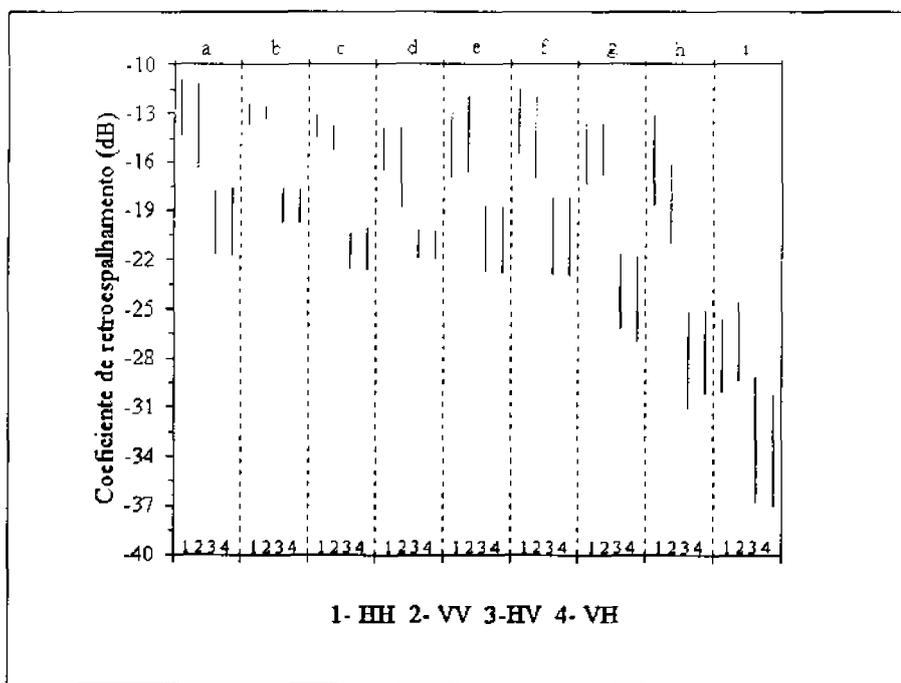


Fig. 4.1 - Range dinâmico de cada classe nas quatro polarizações: a) *Scirpus*; b) Floresta; c) *Typha*; d) *Pistia*; e) *Eichhornia*; f) Heterogêneo; g) *Salvinia*; h) Paliteiros; e i) Água.

A Tabela 4.6 apresenta a média e o desvio padrão dos valores dos índices biofísicos para as diferentes classes. Uma primeira característica observável nos índices biofísicos é a pequena amplitude de variação de seus valores médios entre as classes. Apesar disso, pode-se observar maiores valores de CSI (índice da estrutura da cobertura) para as classes Floresta e *Eichhornia*, confirmando uma maior influência de estruturas verticais expressa no maior retorno da polarização VV. A *Salvinia* também apresentou altos valores de CSI provavelmente devido à sua pequena altura. Em termos do VSI a Floresta é a classe que apresenta maior valor, indicando uma maior penetração da onda no dossel, provavelmente devido ao pequeno comprimento de onda da banda C (5,6 cm) e ao tamanho dos espalhadores da parte superior da floresta (folhas e galhos). As classes *Scirpus* e Heterogêneo são as que possuem maiores valores de BMI (índice de biomassa), indicando uma maior biomassa. A classe Floresta, que também possui biomassa elevada, apresenta valores de BMI menores que o da classe *Scirpus*, o que pode ser explicado pelo fato do sinal detectado na banda C se referir ao espalhamento provocado pela parte superior do dossel da floresta, não envolvendo a biomassa relativa aos troncos da floresta.

Como salientado por Pope et al. (1994), o BMI não é a melhor medida de biomassa, mas é o parâmetro que melhor se associa a ela quando se leva em conta esta combinação de polarizações. Os autores observam ainda, que o uso das bandas P e L são mais indicadas para avaliar a biomassa em florestas, pois o BMI, nestas bandas, é um indicador da quantidade de madeira comparada com a biomassa das folhas.

**TABELA 4.6 - VALORES MÉDIOS E DESVIO PADRÃO (DP) DOS ÍNDICES BIOFÍSICOS PARA CADA CLASSE.**

| Classe            | BMI   |       | VSI   |      | CSI   |      |
|-------------------|-------|-------|-------|------|-------|------|
|                   | Média | DP    | Média | DP   | Média | DP   |
| Paliteiros        | 35,47 | 19,57 | 0,19  | 0,06 | 0,44  | 0,09 |
| Floresta          | 59,43 | 21,88 | 0,27  | 0,05 | 0,50  | 0,07 |
| <i>Eichhornia</i> | 49,05 | 11,71 | 0,25  | 0,05 | 0,51  | 0,07 |
| <i>Pistia</i>     | 48,33 | 14,34 | 0,26  | 0,05 | 0,46  | 0,08 |
| <i>Typha</i>      | 53,84 | 14,11 | 0,23  | 0,05 | 0,48  | 0,08 |
| <i>Scirpus</i>    | 63,53 | 13,02 | 0,25  | 0,05 | 0,46  | 0,08 |
| <i>Salvinia</i>   | 48,95 | 17,96 | 0,22  | 0,05 | 0,51  | 0,08 |
| Heterogêneo       | 62,31 | 18,39 | 0,24  | 0,05 | 0,48  | 0,08 |

A Figura 4.2 mostra a máxima variação dos índices biofísicos em cada classe. A variação do CSI (Figura 4.2a) mostra *Scirpus* e *Salvinia* como as classes que apresentam maior variação. Uma explicação para este fato talvez seja a variação na presença de paliteiros nos bancos destas duas classes de plantas aquáticas, favorecendo uma maior variação no retorno de estruturas verticais. A classe com menor variação do CSI é a Floresta.

Praticamente todas as classes apresentam a mesma variação do VSI (índice de espalhamento do volume) (Figura 4.2b), com exceção da *Eichhornia*, que pela sua alta densidade e tamanho dos espalhadores, apresenta pouca variação no espalhamento do volume. e da classe Paliteiros que mostra pouco espalhamento do volume por se tratar somente de água e troncos na vertical.

A variação do BMI (Figura 4.2c) é maior nas classes *Scirpus*, *Eichhornia* e Heterogêneo. a qual pode estar relacionada a variações na densidade e na idade das plantas. Estas variações na idade e densidade, por sua vez, podem refletir na quantidade

de biomassa dessas classes. Floresta e *Typha* são as classes que apresentam as menores variações do BMI.

Em síntese, esta seção sugere, através dos valores médios do  $\sigma^{\circ}$  e da variação do range dinâmico, que as classes *Typha* e Floresta apresentam maior homogeneidade entre as amostras. Uma melhor caracterização das classes foi associada à polarização HH, por apresentar, em média, menores valores do range dinâmico. Contudo, devido à variação do range dinâmico, o potencial de discriminação entre todas as classes mostra-se baixo.

Os valores médios do índice da estrutura da cobertura (CSI) parecem indicar a influência de estruturas verticais, principalmente nas classes, Floresta, Paliteiros, *Eichhornia* e *Salvinia*. A penetração da onda no dossel parece estar indicada no índice de espalhamento do volume (VSI) para a classe Floresta. O índice da biomassa (BMI) não apresentou, a princípio, resultados que pudessem ser relacionados, coerentemente, com o conteúdo de biomassa das classes. Entretanto, este assunto será tratado mais aprofundadamente nas seções seguintes.

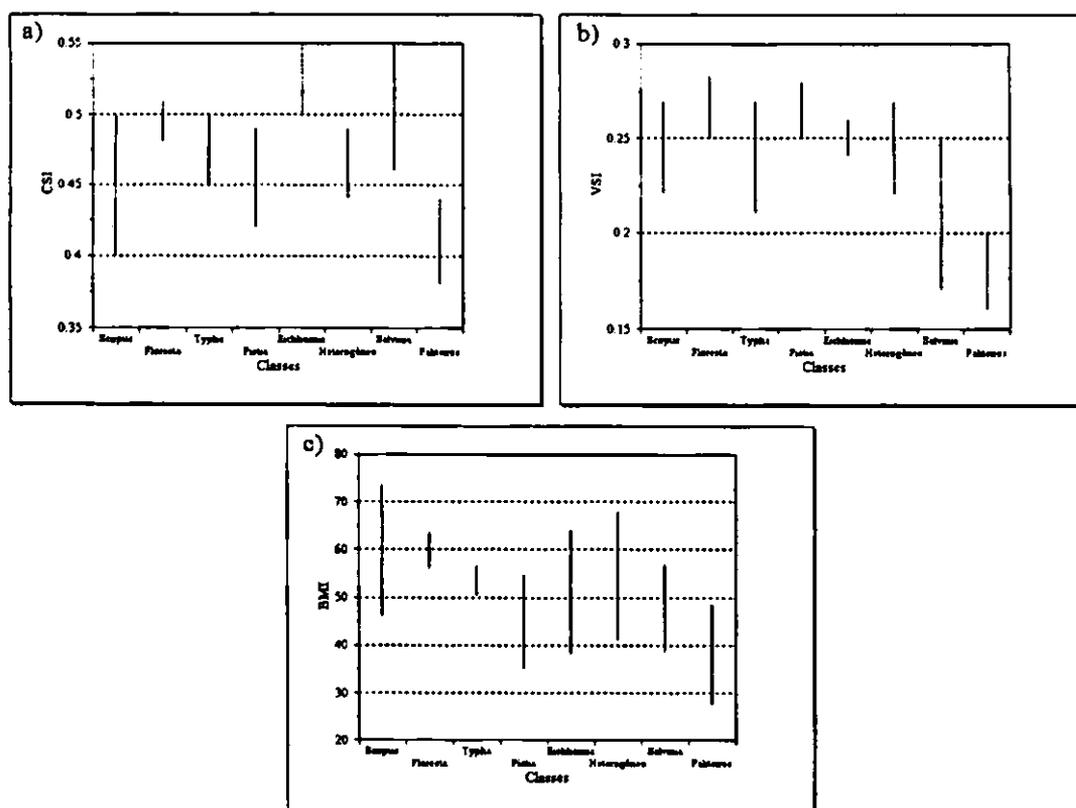


Fig. 4.2 - Máxima variação dos índices biofísicos nas classes: a) CSI; b) VSI; c) BMI.

#### 4.2 - COMPORTAMENTO DAS DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS DO $\sigma^{\circ}$ E CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS ESTUDADOS

Nesta seção o número total de pixels de cada classe, em níveis digitais, é utilizado na visualização dos histogramas e no teste de aderência das classes à cinco distribuições contínuas. Esta seção analisa ainda, a correlação entre os valores médios do  $\sigma^{\circ}$  nas quatro polarizações, e entre estes e os valores médios dos índices biofísicos, para todas as classes.

A Figura 4.3 apresenta os histogramas, em nível digital, das diferentes classes nas quatro polarizações. Sua análise permite avaliar visualmente a distribuição de cada classe, observando uma tendência à normalidade para todas as classes. Entretanto é importante ressaltar o elevado número de pixels amostrados, enquanto que nos processos de classificação normalmente utilizados não se consegue números tão elevados de pixels amostrados.

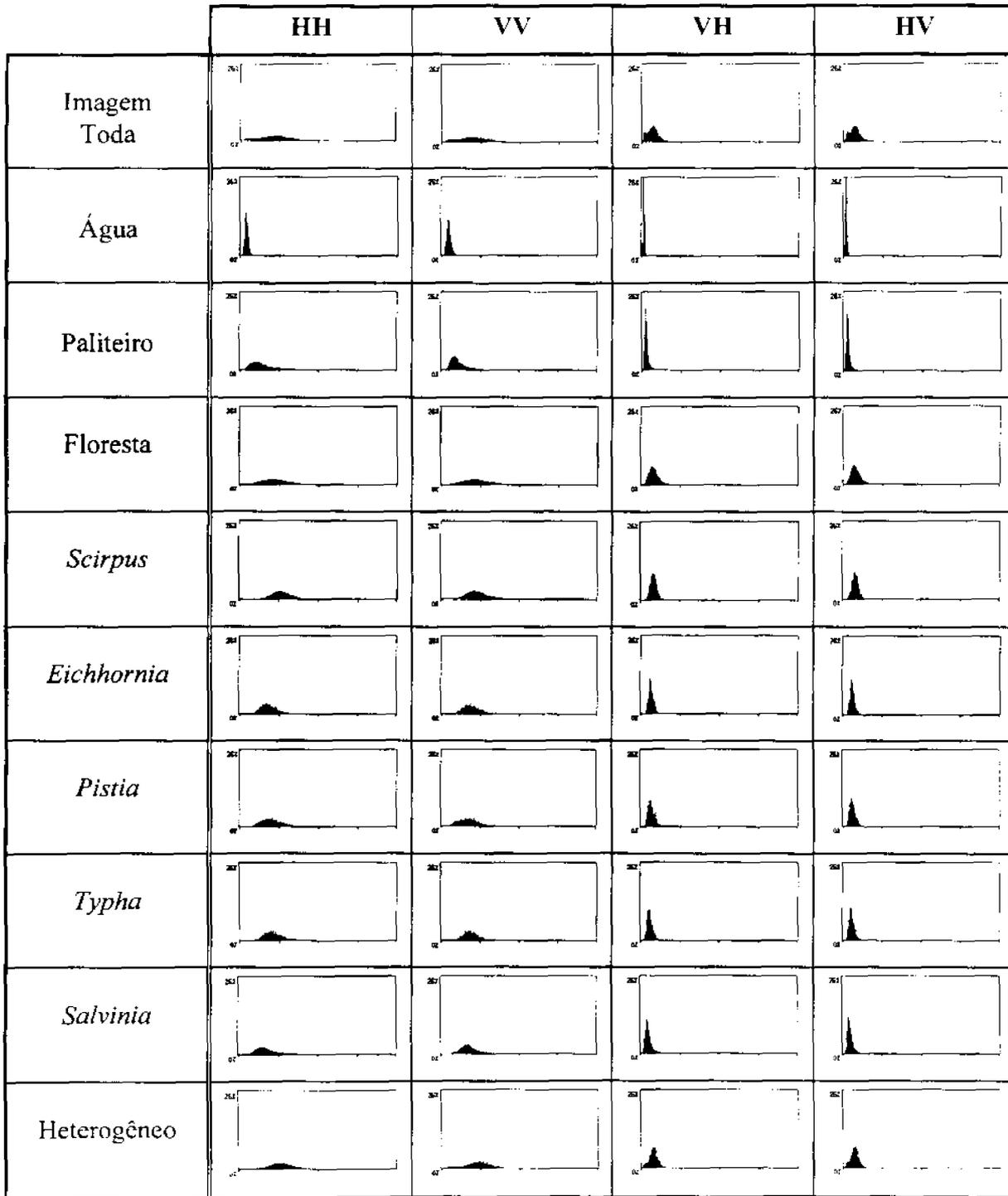


Fig. 4.3 - Histogramas das diferentes classes em nível digital.

Com o intuito de analisar as propriedades estatísticas das classes estudadas foi testada a aderência das classes, nas quatro polarizações, às distribuições estatísticas Normal, Log-Normal, Amplitude GO, Weibull, e Raiz de Gamma. O valor  $p$ , que indica a área à direita do valor  $\chi^2$  calculado, foi zero para todas as classes, em todas as polarizações. Isto indica rejeição da hipótese nula, que especifica uma distribuição para os dados, para qualquer nível de significância. Dutra et al. (1993), estudando distribuições de dados SAR de pastagens e regeneração, também rejeitou várias hipóteses associadas aos dados. Desta forma, a associação classe-distribuição foi feita visualmente, associando, a cada classe, a curva da distribuição estatística que melhor se ajusta. A distribuição estatística associada a cada classe está apresentada na Tabela 4.7, e os histogramas com os ajustes das curvas podem ser encontrados no Apêndice A.

As distribuições mais freqüentes foram a Amplitude GO (15 vezes) e a Log-Normal (14 vezes). A distribuição Raiz de Gamma não foi associada a nenhuma classe. Analisando as distribuições dentro das classes observa-se três tipos de comportamento. As classes *Eichhornia*, *Scirpus*, *Salvinia*, *Typha* e Heterogêneo apresentaram a mesma distribuição para todas as polarizações. Já para as classes Água e Floresta as distribuições foram diferentes entre as polarizações paralelas e as cruzadas. Para *Pistia* e Paliteiros a polarização VV apresentou diferente distribuição das demais polarizações.

O resultado do teste de aderência das classes às distribuições estatísticas, apresentados na Tabela 4.7, mostra claramente uma variação, principalmente em relação às classes, do comportamento das mesmas em função das diferentes distribuições. Este fato pode explicar, de certa forma, a pouca capacidade de classificação de dados SAR utilizando classificadores que exigem a normalidade dos dados. Experimentos vêm sendo realizados no sentido de comparar o uso de classificadores que exigem distribuição normal, com classificadores que permitem a entrada das distribuições das classes estudadas. Resultados preliminares destes estudos apontam melhores resultados com classificadores que permitem a entrada das distribuições das classes (Yanasse, 1996, c.p.).

TABELA 4.7 - DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA ASSOCIADA A CADA CLASSE NAS QUATRO POLARIZAÇÕES.

| Classe            | Polarização | Distribuição |            |              |         |               |
|-------------------|-------------|--------------|------------|--------------|---------|---------------|
|                   |             | Normal       | Log Normal | Amplitude GO | Weibull | Raiz de Gamma |
| Água              | HH          |              |            | X            |         |               |
|                   | VV          |              |            | X            |         |               |
|                   | HV          |              | X          |              |         |               |
|                   | VH          |              | X          |              |         |               |
| Paliteiros        | HH          |              | X          |              |         |               |
|                   | VV          |              |            | X            |         |               |
|                   | HV          |              | X          |              |         |               |
|                   | VH          |              | X          |              |         |               |
| Floresta          | HH          |              |            |              | X       |               |
|                   | VV          |              |            |              | X       |               |
|                   | HV          |              | X          |              |         |               |
|                   | VH          |              | X          |              |         |               |
| <i>Eichhornia</i> | HH          |              | X          |              |         |               |
|                   | VV          |              | X          |              |         |               |
|                   | HV          |              | X          |              |         |               |
|                   | VH          |              | X          |              |         |               |
| <i>Scirpus</i>    | HH          |              |            | X            |         |               |
|                   | VV          |              |            | X            |         |               |
|                   | HV          |              |            | X            |         |               |
|                   | VH          |              |            | X            |         |               |
| <i>Salvinia</i>   | HH          |              |            | X            |         |               |
|                   | VV          |              |            | X            |         |               |
|                   | HV          |              |            | X            |         |               |
|                   | VH          |              |            | X            |         |               |
| <i>Pistia</i>     | HH          |              | X          |              |         |               |
|                   | VV          | X            |            |              |         |               |
|                   | HV          |              | X          |              |         |               |
|                   | VH          |              | X          |              |         |               |
| <i>Typha</i>      | HH          |              |            | X            |         |               |
|                   | VV          |              |            | X            |         |               |
|                   | HV          |              |            | X            |         |               |
|                   | VH          |              |            | X            |         |               |
| Heterogêneo       | HH          | X            |            |              |         |               |
|                   | VV          | X            |            |              |         |               |
|                   | HV          | X            |            |              |         |               |
|                   | VH          | X            |            |              |         |               |

Devido aos resultados apresentados na Tabela 4.7 será evitado o uso de testes que requerem a normalidade dos dados. A exceção será um teste de igualdade de médias, o qual será apresentado na Seção 5.4.

Para avaliar a existência de redundância de informações entre o  $\sigma^\circ$  das polarizações, e entre estes e os índices foi utilizado o coeficiente de correlação por postos de Spearman ( $r_s$ ). Uma alta correlação significa que, em média, o conteúdo de informação entre os dados é o mesmo, e uma baixa correlação significa presença de informações diferentes.

Os valores do  $r_s$  de cada classe são apresentados na Tabela 4.8. Na análise das correlações foi adotado o seguinte critério. Considerou-se como uma correlação alta aquelas que apresentaram um valor de  $r_s \geq |0,8|$ , uma correlação média quando  $|0,8| < r_s \geq |0,6|$  e baixa quando  $r_s < |0,6|$ . Realizou-se também um teste de significância para  $r_s$  ao nível de significância de 5%. As correlações nas quais o teste de significância foi rejeitado, isto é, nas quais não existe associação entre as variáveis analisadas, apresentam-se sublinhadas na Tabela 4.8.

**TABELA 4.8 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ( $r_s$ ) ENTRE POLARIZAÇÕES E ÍNDICES BIOFÍSICOS PARA CADA CLASSE.**

| Água | HH   | HV   | VH   | VV |
|------|------|------|------|----|
| HH   | 1    |      |      |    |
| HV   | 0.85 | 1    |      |    |
| VH   | 0.80 | 0.87 | 1    |    |
| VV   | 0.65 | 0.48 | 0.56 | 1  |

| Paliteiros | HH    | HV    | VH    | VV    | BMI   | VSI  | CSI |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| HH         | 1     |       |       |       |       |      |     |
| HV         | 0.89  | 1     |       |       |       |      |     |
| VH         | 0.89  | 0.99  | 1     |       |       |      |     |
| VV         | 0.93  | 0.95  | 0.95  | 1     |       |      |     |
| BMI        | 0.98  | 0.93  | 0.93  | 0.96  | 1     |      |     |
| VSI        | -0.53 | -0.33 | -0.31 | -0.54 | -0.52 | 1    |     |
| CSI        | -0.48 | -0.27 | -0.26 | -0.20 | -0.41 | 0.04 | 1   |

(continua)

Tabela 4.8 - Continuação

| <b>Floresta</b> | <b>HH</b>    | <b>HV</b>   | <b>VH</b>   | <b>VV</b>   | <b>BMI</b>   | <b>VSI</b> | <b>CSI</b> |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|
| <b>HH</b>       | 1            |             |             |             |              |            |            |
| <b>HV</b>       | <u>0.26</u>  | 1           |             |             |              |            |            |
| <b>VH</b>       | <u>0.26</u>  | 0.99        | 1           |             |              |            |            |
| <b>VV</b>       | <u>0.70</u>  | <u>0.55</u> | <u>0.56</u> | 1           |              |            |            |
| <b>BMI</b>      | <u>0.89</u>  | <u>0.37</u> | <u>0.39</u> | <u>0.91</u> | 1            |            |            |
| <b>VSI</b>      | <u>-0.24</u> | <u>0.81</u> | <u>0.81</u> | <u>0.73</u> | <u>-0.15</u> | 1          |            |
| <b>CSI</b>      | <u>-0.37</u> | 0.41        | 0.40        | <u>0.20</u> | <u>-0.11</u> | 0.50       | 1          |

| <b><i>Scirpus</i></b> | <b>HH</b>    | <b>HV</b>   | <b>VH</b>   | <b>VV</b>    | <b>BMI</b>   | <b>VSI</b> | <b>CSI</b> |
|-----------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|------------|
| <b>HH</b>             | 1            |             |             |              |              |            |            |
| <b>HV</b>             | <u>0.76</u>  | 1           |             |              |              |            |            |
| <b>VH</b>             | <u>0.80</u>  | <u>0.99</u> | 1           |              |              |            |            |
| <b>VV</b>             | <u>0.77</u>  | <u>0.64</u> | <u>0.70</u> | 1            |              |            |            |
| <b>BMI</b>            | <u>0.91</u>  | <u>0.75</u> | <u>0.80</u> | <u>0.95</u>  | 1            |            |            |
| <b>VSI</b>            | <u>-0.23</u> | <u>0.27</u> | <u>0.21</u> | <u>-0.44</u> | <u>-0.35</u> | 1          |            |
| <b>CSI</b>            | <u>0.11</u>  | <u>0.08</u> | <u>0.13</u> | 0.65         | 0.42         | -0.52      | 1          |

| <b><i>Eichhornia</i></b> | <b>HH</b>    | <b>HV</b>    | <b>VH</b>    | <b>VV</b>    | <b>BMI</b>   | <b>VSI</b> | <b>CSI</b> |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|
| <b>HH</b>                | 1            |              |              |              |              |            |            |
| <b>HV</b>                | <u>0.98</u>  | 1            |              |              |              |            |            |
| <b>VH</b>                | <u>0.98</u>  | 1            | 1            |              |              |            |            |
| <b>VV</b>                | <u>0.98</u>  | <u>0.95</u>  | <u>0.95</u>  | 1            |              |            |            |
| <b>BMI</b>               | 1            | 0.98         | 0.98         | 0.98         | 1            |            |            |
| <b>VSI</b>               | <u>-0.67</u> | <u>-0.57</u> | <u>-0.57</u> | <u>-0.59</u> | <u>-0.67</u> | 1          |            |
| <b>CSI</b>               | 0.71         | 0.74         | 0.74         | 0.69         | 0.71         | -0.59      | 1          |

| <b><i>Salvinia</i></b> | <b>HH</b>    | <b>HV</b>    | <b>VH</b>    | <b>VV</b>    | <b>BMI</b>   | <b>VSI</b> | <b>CSI</b> |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|
| <b>HH</b>              | 1            |              |              |              |              |            |            |
| <b>HV</b>              | <u>0.62</u>  | 1            |              |              |              |            |            |
| <b>VH</b>              | <u>0.58</u>  | <u>0.99</u>  | 1            |              |              |            |            |
| <b>VV</b>              | <u>0.71</u>  | <u>0.82</u>  | <u>0.81</u>  | 1            |              |            |            |
| <b>BMI</b>             | <u>0.95</u>  | <u>0.75</u>  | <u>0.71</u>  | <u>0.86</u>  | 1            |            |            |
| <b>VSI</b>             | <u>-0.72</u> | <u>-0.31</u> | <u>0.00</u>  | <u>-0.40</u> | <u>-0.59</u> | 1          |            |
| <b>CSI</b>             | <u>-0.77</u> | <u>-0.22</u> | <u>-0.19</u> | <u>-0.20</u> | <u>-0.59</u> | 0.69       | 1          |

| <b><i>Typha</i></b> | <b>HH</b>    | <b>HV</b>    | <b>VH</b>    | <b>VV</b>    | <b>BMI</b>   | <b>VSI</b>   | <b>CSI</b> |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
| <b>HH</b>           | 1            |              |              |              |              |              |            |
| <b>HV</b>           | <u>-0.09</u> | 1            |              |              |              |              |            |
| <b>VH</b>           | <u>0.09</u>  | 0.93         | 1            |              |              |              |            |
| <b>VV</b>           | <u>-0.17</u> | <u>-0.14</u> | <u>-0.14</u> | 1            |              |              |            |
| <b>BMI</b>          | <u>0.76</u>  | <u>-0.28</u> | <u>-0.09</u> | <u>0.43</u>  | 1            |              |            |
| <b>VSI</b>          | <u>-0.09</u> | 1            | 0.93         | <u>-0.31</u> | <u>-0.28</u> | 1            |            |
| <b>CSI</b>          | <u>-0.69</u> | <u>-0.38</u> | <u>-0.43</u> | 0.71         | <u>-0.12</u> | <u>-0.38</u> | 1          |

(continua)

Tabela 4.8 - Conclusão.

| <i>Pistia</i> | HH    | HV    | VH    | VV    | BMI   | VSI   | CSI |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| HH            | 1     |       |       |       |       |       |     |
| HV            | 1     | 1     |       |       |       |       |     |
| VH            | 1     | 1     | 1     |       |       |       |     |
| VV            | 0.90  | 0.90  | 0.90  | 1     |       |       |     |
| BMI           | 1     | 1     | 1     | 0.90  | 1     |       |     |
| VSI           | -0.60 | -0.60 | -0.60 | -0.70 | -0.60 | 1     |     |
| CSI           | 0.70  | 0.70  | 0.70  | 0.90  | 0.70  | -0.90 | 1   |

| Heterogêneo | HH   | HV   | VH   | VV   | BMI  | VSI   | CSI |
|-------------|------|------|------|------|------|-------|-----|
| HH          | 1    |      |      |      |      |       |     |
| HV          | 0.83 | 1    |      |      |      |       |     |
| VH          | 0.87 | 0.98 | 1    |      |      |       |     |
| VV          | 0.85 | 0.82 | 0.88 | 1    |      |       |     |
| BMI         | 0.95 | 0.75 | 0.82 | 0.93 | 1    |       |     |
| VSI         | 0.18 | 0.60 | 0.52 | 0.27 | 0.10 | 1     |     |
| CSI         | 0.22 | 0.33 | 0.40 | 0.60 | 0.37 | -0.08 | 1   |

A correlação entre as polarizações cruzadas, para todas as classes, foi próxima de 1. Este resultado é normal, tanto que é comum se considerar  $\sigma_{HV}^o = \sigma_{VH}^o$  (Haralick et al., 1970), e fazer análises em somente uma das polarizações cruzadas.

Analisando primeiramente o resultado das correlações entre polarizações, têm-se que em geral as quatro polarizações são altamente correlacionadas para as classes: Paliteiros, *Eichhornia*, *Pistia* e Heterogêneo.

Neste caso, pode-se supor que, nas quatro polarizações, os mecanismos de espalhamento entre a onda incidente e o alvo são semelhantes. E quando ocorrem mudanças nas características morfológicas e de densidade nas amostras da classe, o comportamento dos mecanismos de espalhamento nestas amostras é semelhante em todas as polarizações. Uma provável explicação para os casos de Paliteiros e Heterogêneo seria a presença de áreas com água nas amostras. Estas áreas com água estariam agindo como um suavizador das variações do retorno médio. Para o caso da classe *Eichhornia* seus bancos densos e homogêneos podem ser uma explicação para o fato, indicando assim, domínio de interação na parte superior do dossel.

Na classe Água a polarização VV apresentou correlação média com as outras polarizações. Isto pode ser explicado pelo fato de que a presença de pequenas

ondas na água afetam mais fortemente a polarização VV. Johnson e Munday (1983) afirmam que há uma dependência pronunciada do  $\sigma^\circ$  com a rugosidade do mar. Salientam ainda, que em mar calmo a polarização HH apresenta um menor retorno que a VV, e que a diferença entre as duas polarizações diminui com o aumento da rugosidade do mar.

A classe Floresta apresentou baixa correlação em todas as polarizações, exceto entre HH e VV na qual a correlação foi média. A baixa correlação sugere diferença nos processos de interação das diferentes polarizações com o dossel. Este fato pode estar associado à elevada biomassa e grande variação geométrica dos elementos espalhadores desta classe (distribuição dos galhos, vazios, orientação dos galhos e folhas, variação desta orientação causada pelo vento), propiciando, desta forma, múltiplos espalhamentos, os quais são característicos das polarizações cruzadas. Segundo Evans (1986), a vegetação normalmente exibe um alto componente de polarização cruzada. Sader (1987) também apresenta altos valores de retorno na polarização HV para floresta, e conclui que estes altos valores são decorrentes das complexas estruturas de posicionamento de diferentes tipos de espalhadores, presentes em florestas não uniformes. Este fato é verificado observando os valores médios do  $\sigma^\circ$  na Tabela 4.5, onde o  $\sigma^\circ$  da Floresta, na polarização HH é menor que o das classes *Scirpus* e Heterogêneo. Já nas polarizações cruzadas o  $\sigma^\circ$  da Floresta é maior que o das outras classes. Sader (1987) salienta ainda, que estas estruturas complexas de espalhadores proporcionam um maior desvio padrão, dos valores de retorno, na polarização HV que nas polarizações HH e VV. Os dados apresentados na Tabela 4.5 corroboram com esta afirmação, onde observa-se maiores valores do range dinâmico nas polarizações cruzadas que nas polarizações paralelas para a classe Floresta. Estes fatos apresentados por Evans (1986) e Sader (1987) reforçam a hipótese do múltiplo espalhamento nas polarizações cruzadas, o que pode explicar a baixa correlação das polarizações cruzadas em relação às polarizações paralelas.

A classe *Scirpus* apresentou correlação média entre todas as polarizações. Freeman e Durben (1996), analisando seu modelo de espalhamento em uma classe de

*cyperacea*, afirmam que a banda C possui pouca penetração na camada do dossel devido este ser muito espesso. Desta forma a variação no estado fenológico nos bancos de *Scirpus*, variando assim sua altura, densidade, quantidade de água, etc., e também a ação do vento que pode mudar a orientação do dossel, podem influenciar no comportamento do  $\sigma^\circ$  nas diferentes polarizações.

A classe *Salvinia* apresentou alta correlação entre VV e as polarizações cruzadas, e média correlação entre HH e as demais polarizações. Provavelmente, isto esteja associado à presença de paliteiros o qual é mais caracterizado na polarização HH.

A classe *Typha* apresentou baixa correlação entre todas as polarizações. Os resultados apresentados até aqui pelas classes *Typha* e *Pistia*, não indicam um comportamento do  $\sigma^\circ$  coerente com as características estruturais e morfológicas destas classes. Provavelmente isto esteja relacionado a dois fatores vinculados à obtenção das amostras destas classes. O primeiro é devido ao fato que estas classes não apresentam boa definição de seus bancos nas fotografias aéreas, podendo assim, não estar representando as características das classes. E o segundo é o pequeno número de pixels amostrados nestas classes, em relação às outras classes. Acredita-se então, que as amostras destas classes não as caracterizem adequadamente. Devido a isto, e também a pouca abundância dos gêneros dessas classes na área estudada, estas classes não receberão uma análise mais aprofundada daqui por diante.

Na análise das correlações dos índices biofísicos, observa-se que o BMI (índice de biomassa) apresentou alta correlação com as quatro polarizações nas classes Paliteiros, *Eichhornia*, *Pistia*, *Scirpus* e Heterogêneo. Na classe Floresta apresentou alta correlação nas polarizações paralelas e baixa correlação nas polarizações cruzadas, e na classe *Salvinia* alta correlação nas polarizações paralelas e média nas cruzadas. Sugerindo assim, que o índice BMI não apresenta mais informação do que as já contidas nas diferentes polarizações. Isto pode ser relacionado a análise feita na Seção 4.1, em que o BMI não foi relacionado com o conteúdo de biomassa das classes.

Contudo, a análise das correlações entre o índice BMI e as polarizações chamou a atenção pela baixa correlação encontrada entre BMI e as polarizações cruzadas na classe Floresta. Isto porque alguns autores consideram o  $\sigma^\circ$  das polarizações cruzadas como indicador de biomassa, principalmente em florestas onde não há informações detalhadas sobre a arquitetura do dossel (Sader, 1987; Paris e Ustin, 1990).

Na análise da Figura 4.4a, que relaciona o BMI e a polarização HV da classe Floresta, observa-se a presença de dois grupos de dados com comportamentos distintos, separados como grupo I (GI) e grupo II (GII). Na análise da distribuição espacial destes grupos de dados nas imagens, nota-se que as amostras do GII localizam-se na margem esquerda do canal. Este fato pode ser associado à possível influência do ângulo de incidência na resposta do sinal. Calculou-se então, o ângulo de incidência central de cada amostra,  $(\phi + \varphi / 2)$  onde  $\phi$  e  $\varphi$  correspondem ao maior e ao menor ângulo de incidência, respectivamente. A média dos ângulos de incidência central para GI e GII foi  $48,1^\circ$  e  $44,3^\circ$ , respectivamente. O  $r_s$  calculado a partir de todas as amostras foi 0,37, enquanto que para as amostras do GI foi -0,93, e para as do GII foi -0,95. Este fato mostra que o índice de biomassa e as polarizações cruzadas são sensíveis à variação do ângulo de incidência.

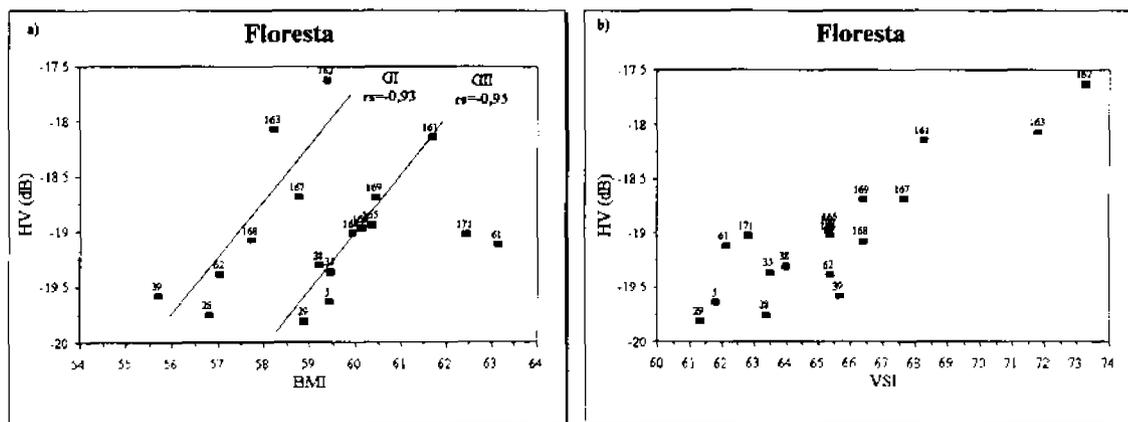


Fig. 4.4 - a) BMI x HV para Floresta; b) VSI x HV para Floresta.

Outra hipótese para explicar o fato refere-se à maior penetração da onda incidente no volume da floresta na margem esquerda, devido à sua fronteira com a água. Entretanto a correlação entre o índice que indica espalhamento do volume VSI e a

polarização HV, considerando todas as amostras, é alta (0.81). Na análise do gráfico que relaciona VSI e HV (Figura 4.4b) a existência de dois grupos de comportamento não é tão evidente. Isto sugere que o índice de biomassa é mais sensível às variações no ângulo de incidência que o índice que indica espalhamento do volume.

O CSI (índice da estrutura da cobertura) apresentou baixa correlação com as quatro polarizações para as classes Floresta e Paliteiros, provavelmente devido ao fato de que nessas classes a presença de mecanismos do tipo reflexão de canto, são mais frequentes, os quais influem no resultado do CSI (Pope et al., 1994). As classes *Pistia* e *Eichhornia* apresentaram correlação média em todas as polarizações. Houve média correlação na VV e baixa nas demais polarizações para as classes *Scirpus* e Heterogêneo. A classe *Salvinia* apresentou correlação média na HH e baixa nas demais; e na classe *Typha* a correlação foi alta na VV e média nas demais. No geral as polarizações cruzadas apresentaram correlação média e baixa, caracterizando assim, a influência dos mecanismos de reflexão de canto no CSI, mecanismos estes ausentes nas polarizações cruzadas.

O VSI (índice de espalhamento do volume) apresentou baixa correlação com as quatro polarizações nas classes Paliteiros e *Scirpus*; média correlação com todas as polarizações em *Pistia*; e alta correlação com as polarizações cruzadas em Floresta e *Typha*. Houve diferença entre a correlação na polarização HH e as demais nas classes *Eichhornia* e *Salvinia*. A correlação alta do VSI com as polarizações cruzadas na classe Floresta confirma a teoria de que estas polarizações refletem os múltiplos espalhamentos, caracterizando o espalhamento do volume. Entretanto esta caracterização do espalhamento do volume parece estar relacionada com o tamanho dos espalhadores e o comprimento de onda, uma vez que as classes de plantas aquáticas não apresentaram alta correlação entre VSI e as polarizações cruzadas. Isto sugere um predomínio do espalhamento na superfície do dossel de plantas aquáticas.

Analisando a correlação entre os índices, observa-se que as classes Floresta, Paliteiros, *Typha* e Heterogêneo apresentaram baixa correlação entre os três índices. As classes *Eichhornia*, *Scirpus* e *Salvinia* apresentaram correlação média, e a

classe *Pistia* apresentou alta correlação entre VSI e CSI e média entre os demais. Estes resultados indicam que os índices podem não estar representando os comportamentos inicialmente propostos por eles, quando analisados na banda C. Era de se esperar uma correlação inversa alta entre o índice da biomassa e o do volume para algumas classes, pois aumentando a biomassa os espaços no dossel diminuem, reduzindo assim, o espalhamento do volume.

Em resumo, os resultados analisados nesta seção mostram o predomínio das distribuições Amplitude GO e Log-Normal nas classes estudadas. E que as classes estudadas não aderem à distribuição Normal, o que inviabiliza o uso de estatísticas e classificadores que exigem normalidade dos dados. O resultado da correlação entre os parâmetros confirma a relação entre as polarizações cruzadas, o espalhamento do volume e o índice de espalhamento do volume (VSI), para a classe Floresta. Mostram também, que o índice de biomassa (BMI) não apresenta informação adicional do que as já contidas nas diferentes polarizações, para as classes estudadas. Esta seção indicou ainda, uma maior sensibilidade, às variações no ângulo de incidência, do BMI em relação ao VSI na classe Floresta. Os mecanismos de reflexão de canto são caracterizados pelo índice da estrutura da cobertura (CSI). E, finalmente, que os índices biofísicos parecem não apresentar bons resultados para as classes de plantas aquáticas estudadas.

### **4.3 - COMPORTAMENTO DAS AMOSTRAS**

Os fatores relacionados ao dossel não são fixos de um banco de planta aquática para outro, dentro da mesma classe. Um banco pode apresentar uma densidade menor que o outro, fazendo com que aumentem os espaços entre suas folhas e hastes, e conseqüentemente a influência do retroespalhamento do volume e do substrato (água) sobre o  $\sigma^{\circ}$ . Diferenças na idade e na altura da vegetação também podem contribuir para uma maior variação do range dinâmico.

Os resultados das análises anteriores indicam que a hipótese inicial, de que as diferenças entre os gêneros eram tais que permitiriam sua discriminação, parece ter fundamento. Contudo, a partir destas análises iniciais, percebeu-se que a influência das

variações das características do dossel no  $\sigma^{\circ}$  era maior que o esperado. Este fato resultou em uma maior atenção dada a estas variações das características do dossel, quando da coleta de informações sobre o dossel em trabalhos de campos posteriores à missão SAREX 92. Especial atenção neste sentido, foi reservada ao trabalho de campo realizado em maio de 1996 que entre outras mensurações, foi medida a amplitude altimétrica do banco amostrado. Esta amplitude altimétrica representa a variação na altura das plantas dentro de uma mesma amostra.

Os resultados deste trabalho de campo, apesar de ter sido realizado em data diferente dos dados deste estudo, podem auxiliar no entendimento dos resultados obtidos pela missão SAREX 92. Os resultados preliminares deste trabalho de campo mostram uma grande variação na amplitude altimétrica da classe *Scirpus*. Esta classe apresentou, em média, uma altura de aproximadamente 70 cm, e quanto a amplitude altimétrica para algumas amostras variou de 0 cm até 53 cm, ficando na média em 13 cm.

Considerando o comprimento de onda na banda C (5,6 cm), esta amplitude altimétrica de 13 cm pode ser significativa. Já a classe *Eichhornia* apresentou uma altura média de aproximadamente 30 cm e amplitude altimétrica próxima de 0 cm. Para os valores de biomassa aérea úmida adquiridos, também foi encontrada grande variação entre as amostras. O valor médio da biomassa aérea úmida encontrado para a classe *Scirpus* foi de aproximadamente 2100 g/m<sup>2</sup>, e para a classe *Eichhornia* foi de 5900 g/m<sup>2</sup>. Rosenthal et al. (1985) salientam que a banda C é mais sensível às variações na altura que variações na biomassa da vegetação herbácea.

Nesta seção será analisada a variabilidade interna das classes, a qual pode estar relacionada a diferenças nas características do dossel das diferentes amostras.

Para auxiliar na visualização e compreensão destas variações entre as amostras, apresentam-se nas Figuras 4.5 e 4.8, duas fotografias aéreas, de diferentes locais da área estudada, sobre as quais foram definidas e retiradas as amostras. As Figuras 4.6 e 4.9 mostram uma composição colorida, com realce logarítmico de contraste, (vermelho⇒HV; verde⇒VV; azul⇒HH) de duas porções da área estudada, referentes

aos mesmos locais das fotografias aéreas mostradas nas Figuras 4.5 e 4.8. Nesta composição colorida estão destacadas a localização e a área de algumas amostras de diferentes classes, juntamente com os valores dos parâmetros estudados. As Figuras 4.7 e 4.10 mostram as imagens nas polarizações HH, VV e HV isoladamente, referentes à mesma área das Figuras 4.6 e 4.9, também com realce logarítmico de contraste.

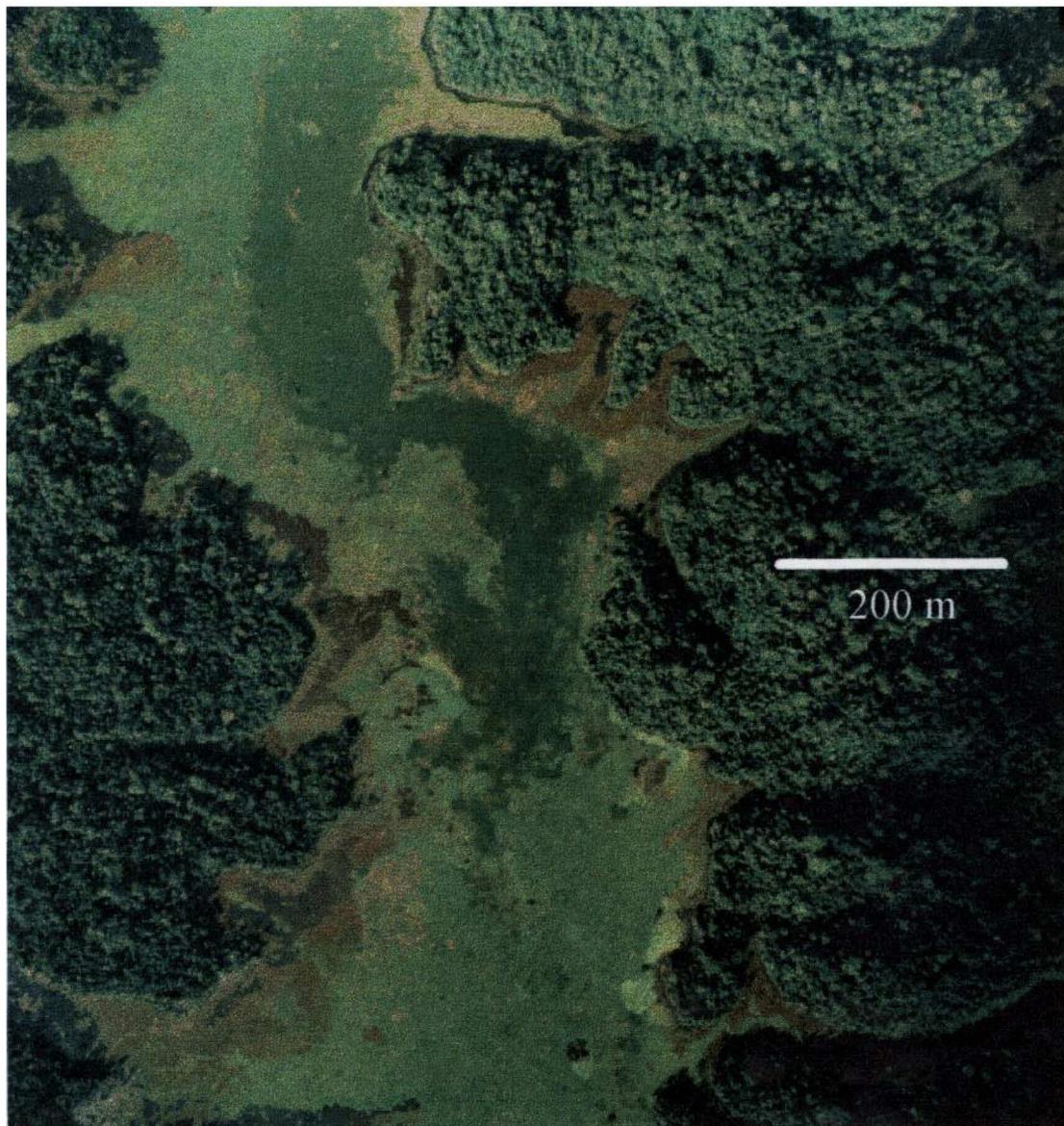


Fig. 4.5 - Fotografia aérea de uma área mais à montante do braço do rio Pucuruí.

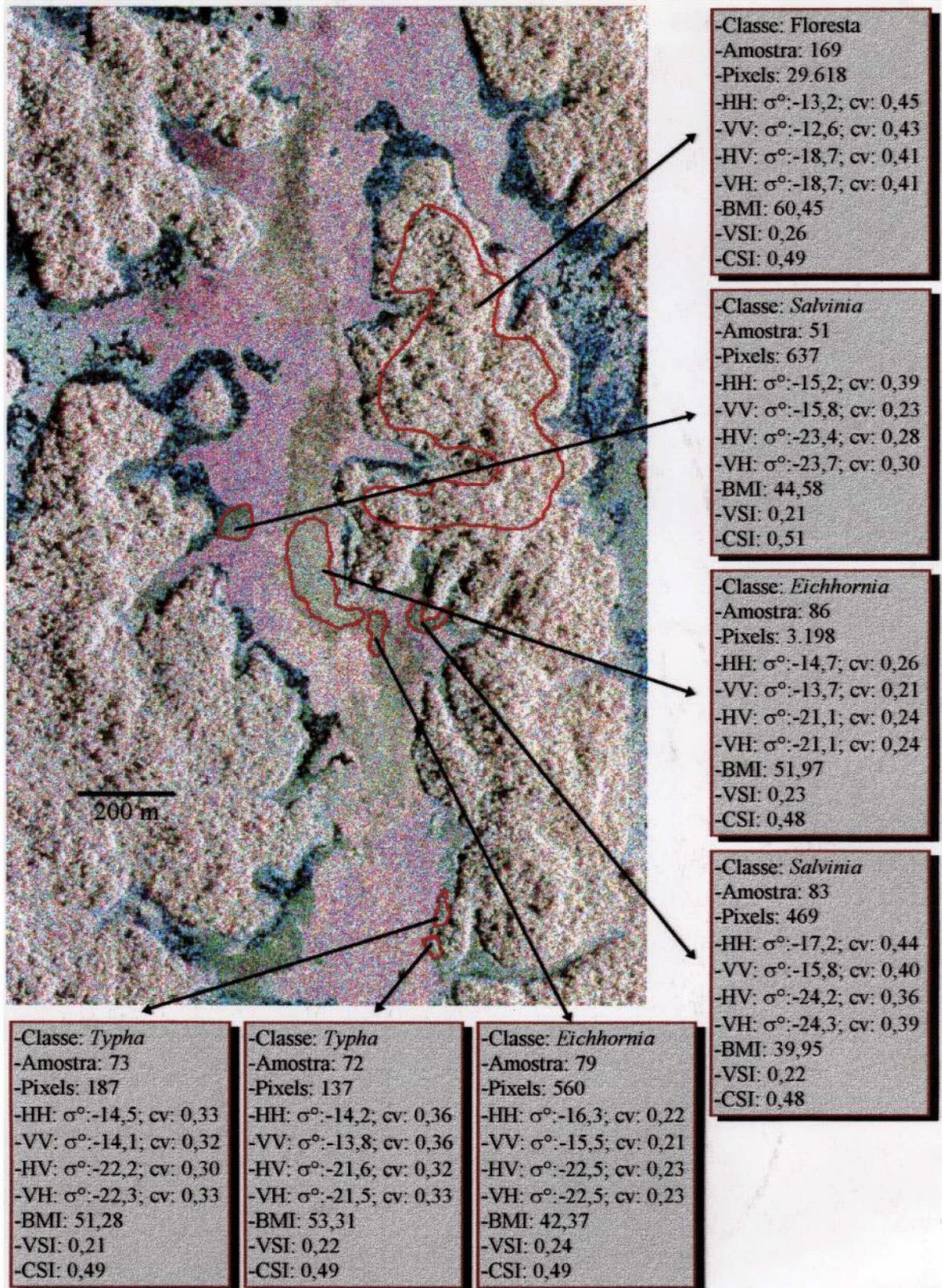


Fig. 4.6 - Composição colorida de três polarizações (R=HV, G=VV, B=HH), com realce logarítmico de contraste, e valores dos parâmetros, de uma área mais à montante do braço do rio Pucuruí.

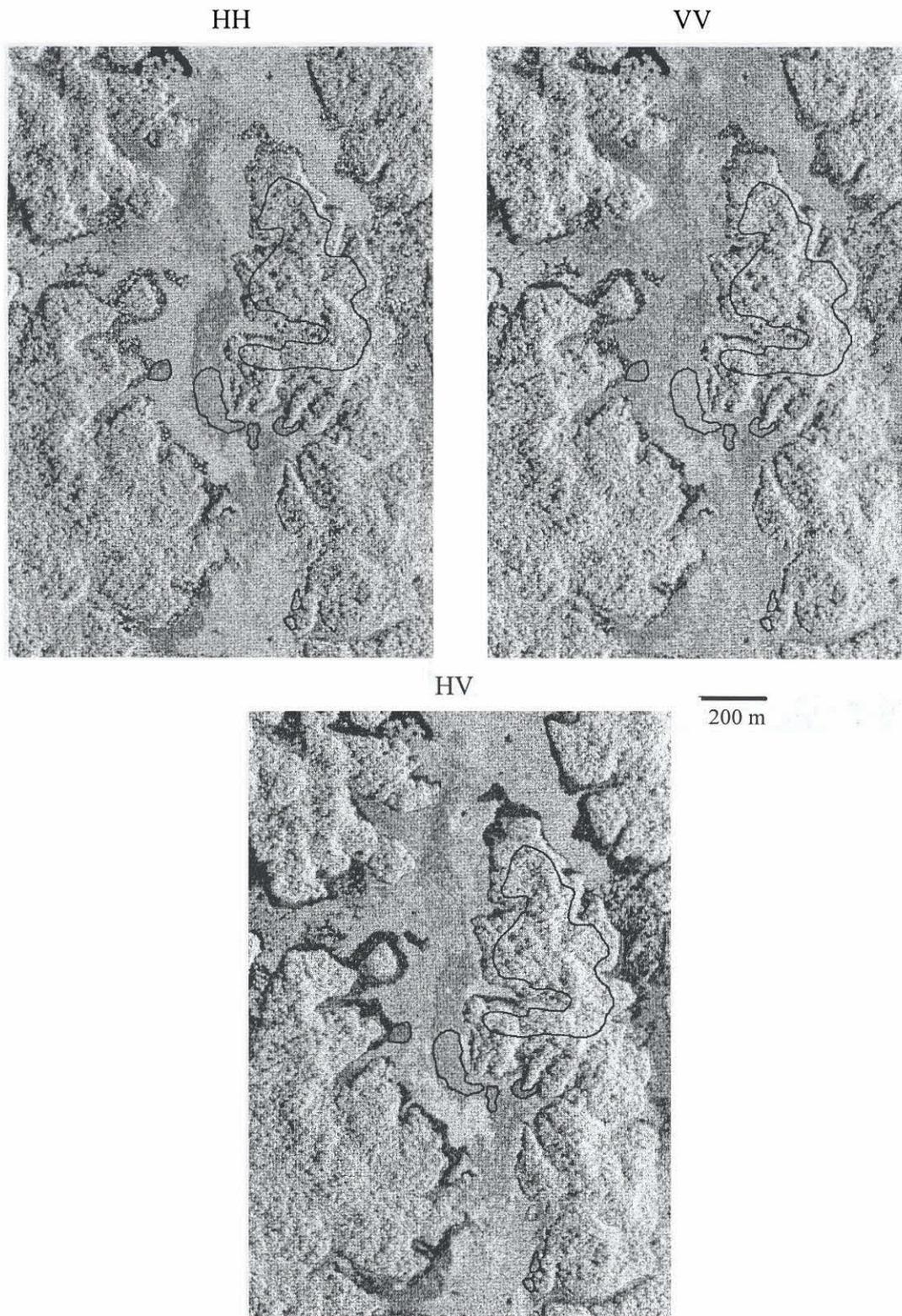


Fig. 4.7 - Imagens de uma área mais à montante do braço do rio Pucuruí, em três polarizações individuais: HH, VV e HV.

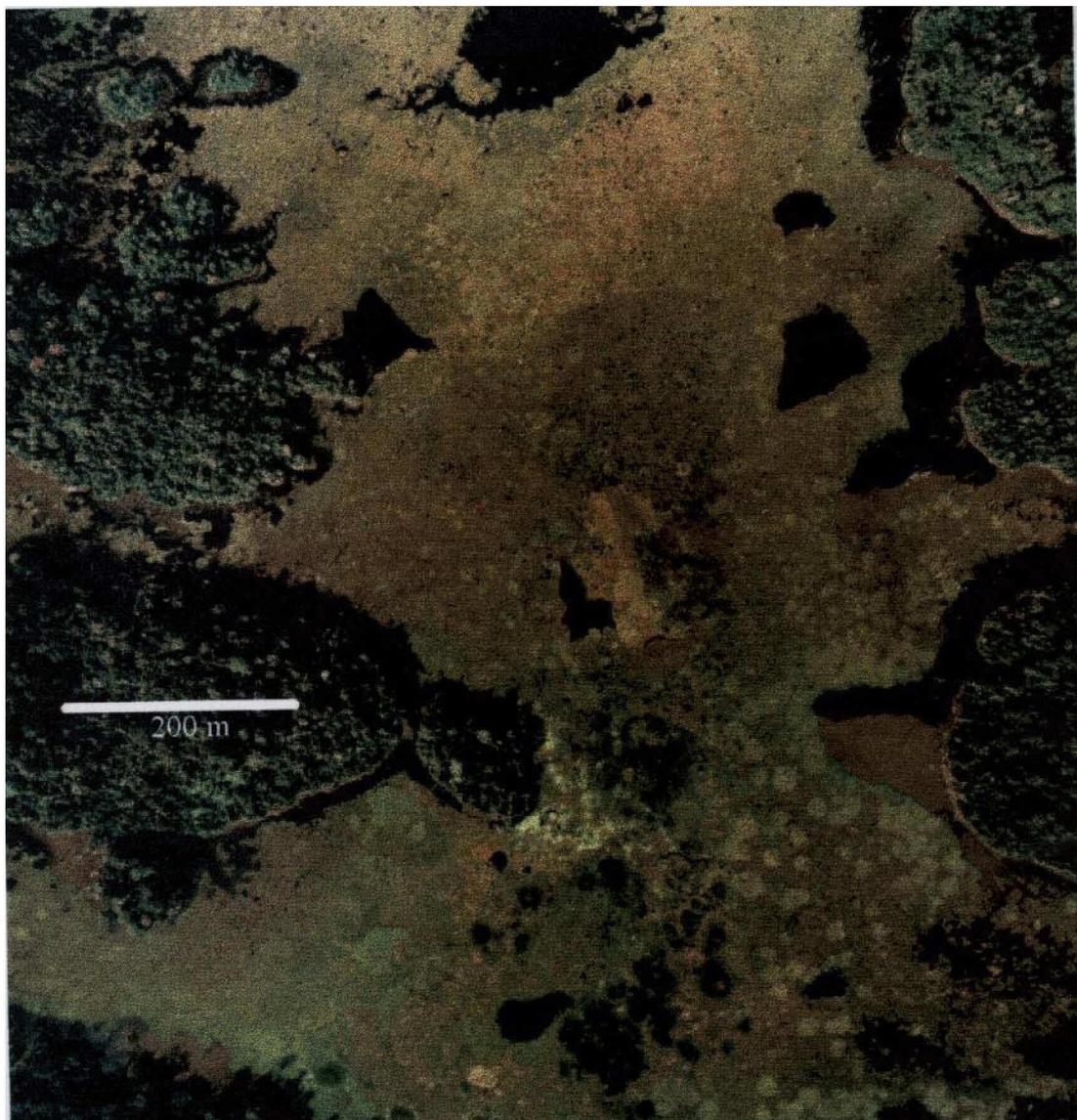


Fig. 4.8 - Fotografia aérea de uma área mais à jusante do braço do rio Pucuruí.

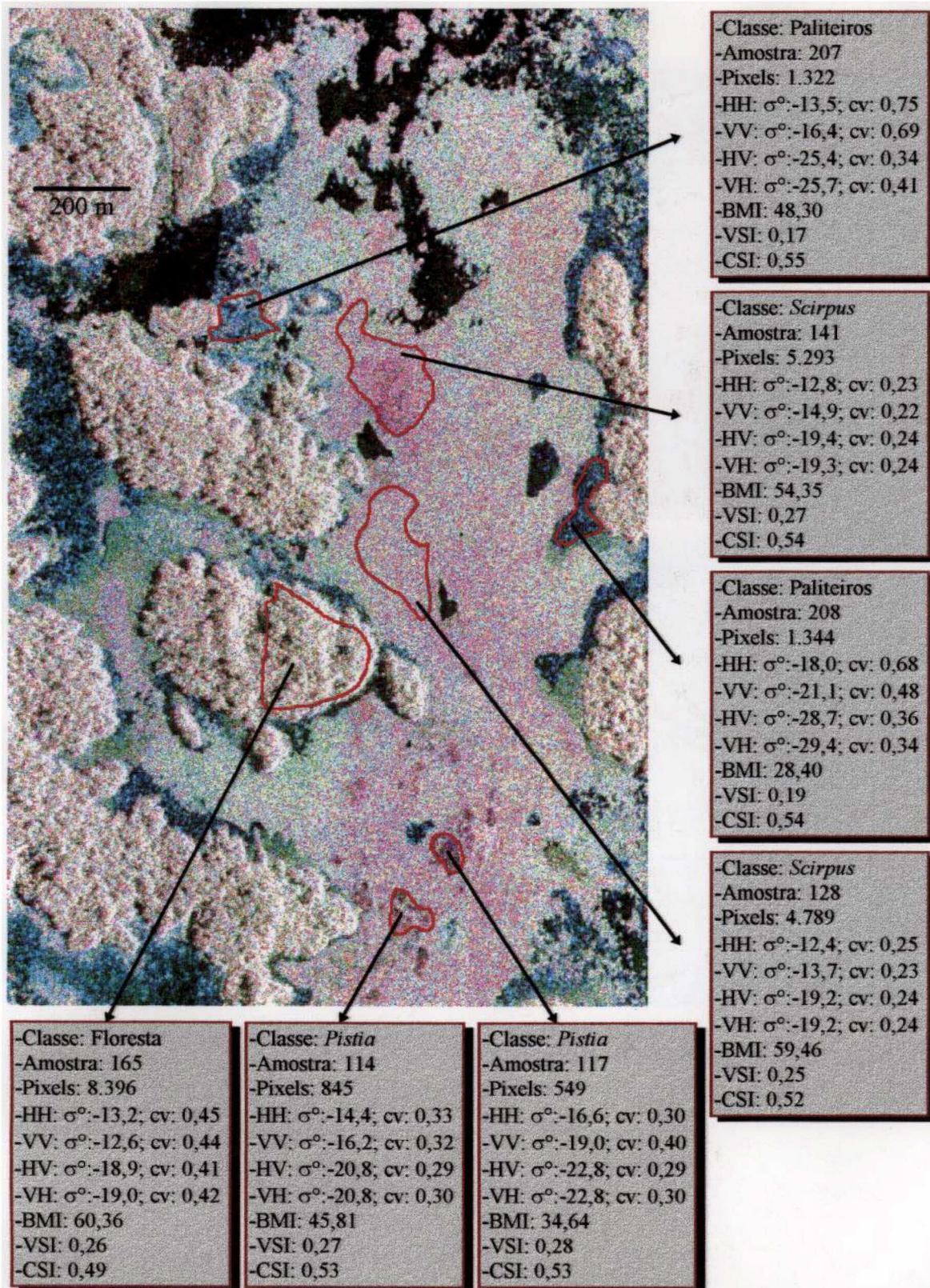


Fig. 4.9 - Composição colorida de três polarizações (R=HV, G=VV, B=HH), com realce logarítmico de contraste, e valores dos parâmetros, de uma área mais à jusante do braço do rio Pucuruí.

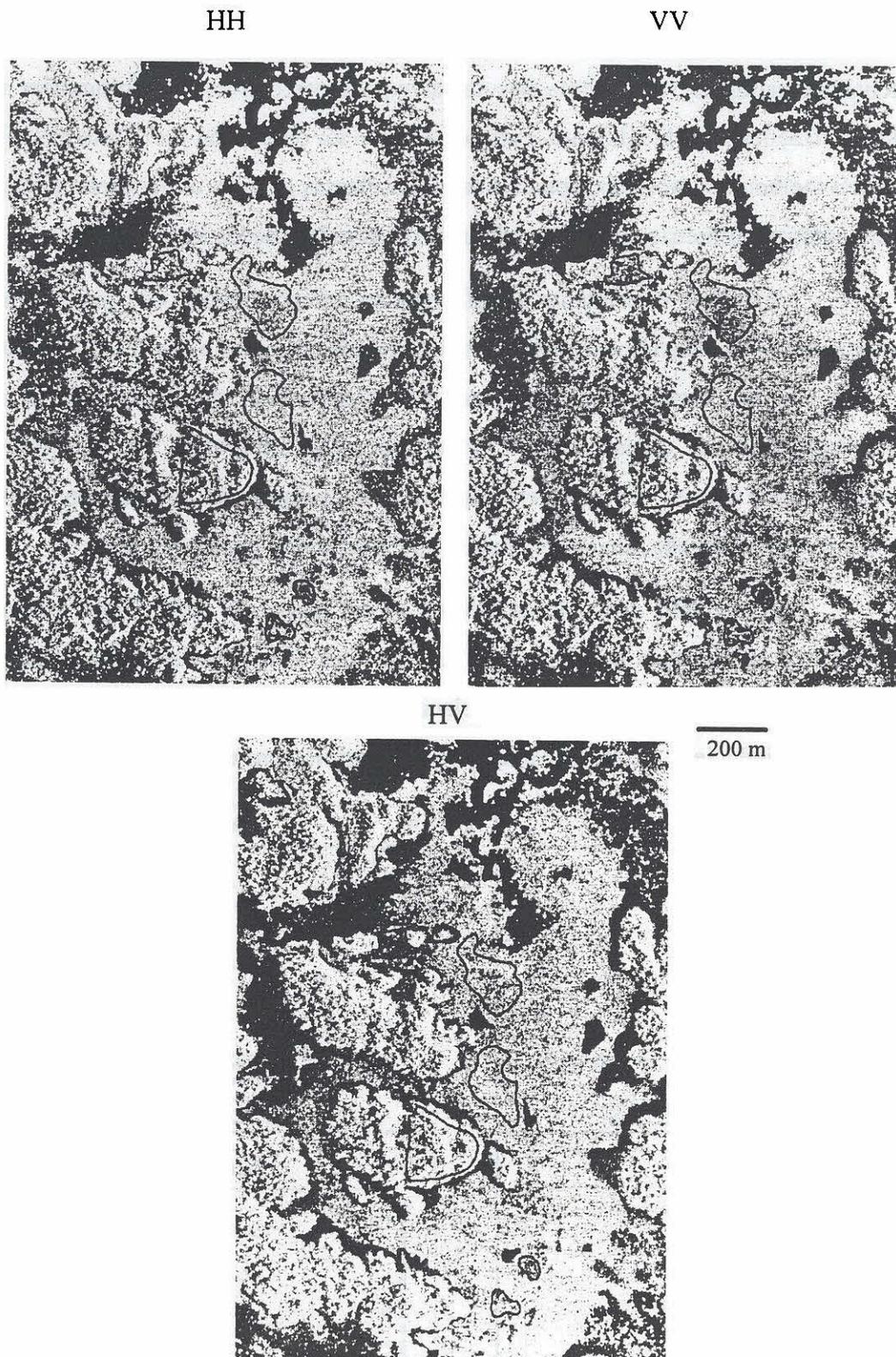
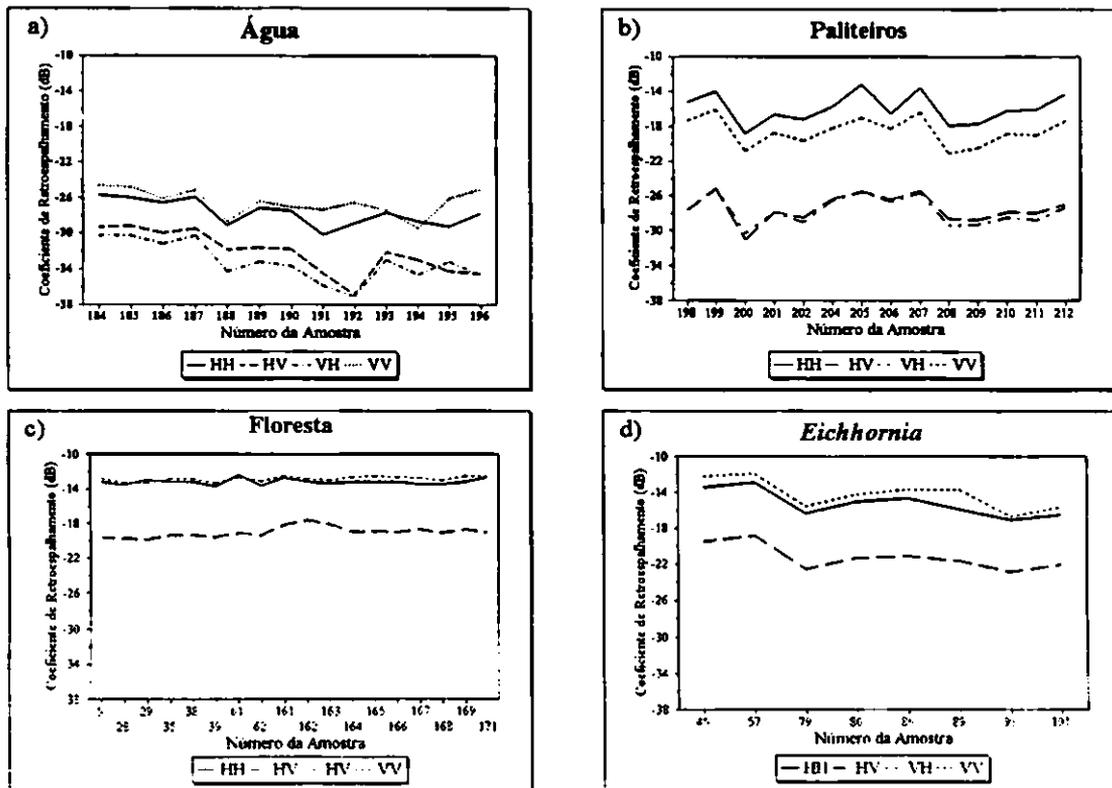


Fig. 4.10 - Imagens de uma área mais à jusante do braço do rio Pucuruí, em três polarizações individuais: HH, VV e HV.

É interessante observar que a composição colorida das imagens de radar de diferentes polarizações revela variações dos alvos não perceptíveis nas fotografias aéreas e nas polarizações individualmente. Fato semelhante foi observado por Costa (1995), que encontrou melhores índices de separabilidade das classes quando utilizou composição de imagens multipolarimétricas, que quando utilizou as polarizações isoladamente.

Este fato é resultante da diferença no comportamento dos mecanismos de espalhamento e nos princípios de aquisição das imagens de radar e das fotografias aéreas. Este fato indica também, a presença de informações presentes nas imagens multipolarimétricas as quais não são perceptíveis nas fotografias aéreas. Entretanto, devido ao grande número de variáveis que envolvem a aquisição das imagens de radar, essas informações não são, ainda, totalmente compreendidas e aproveitadas.

A variação dos valores médios do  $\sigma^0$  dentro de cada classe, nas quatro polarizações, é apresentada na Figura 4.11. As grandes variações dentro das classes são devido a vários fatores, alguns dos quais relacionados ao sistema radar, como o *speckle* e o ângulo de incidência, e outros às características morfológicas e estruturais do dossel.



(continua)

Fig. 4.11 - Conclusão.

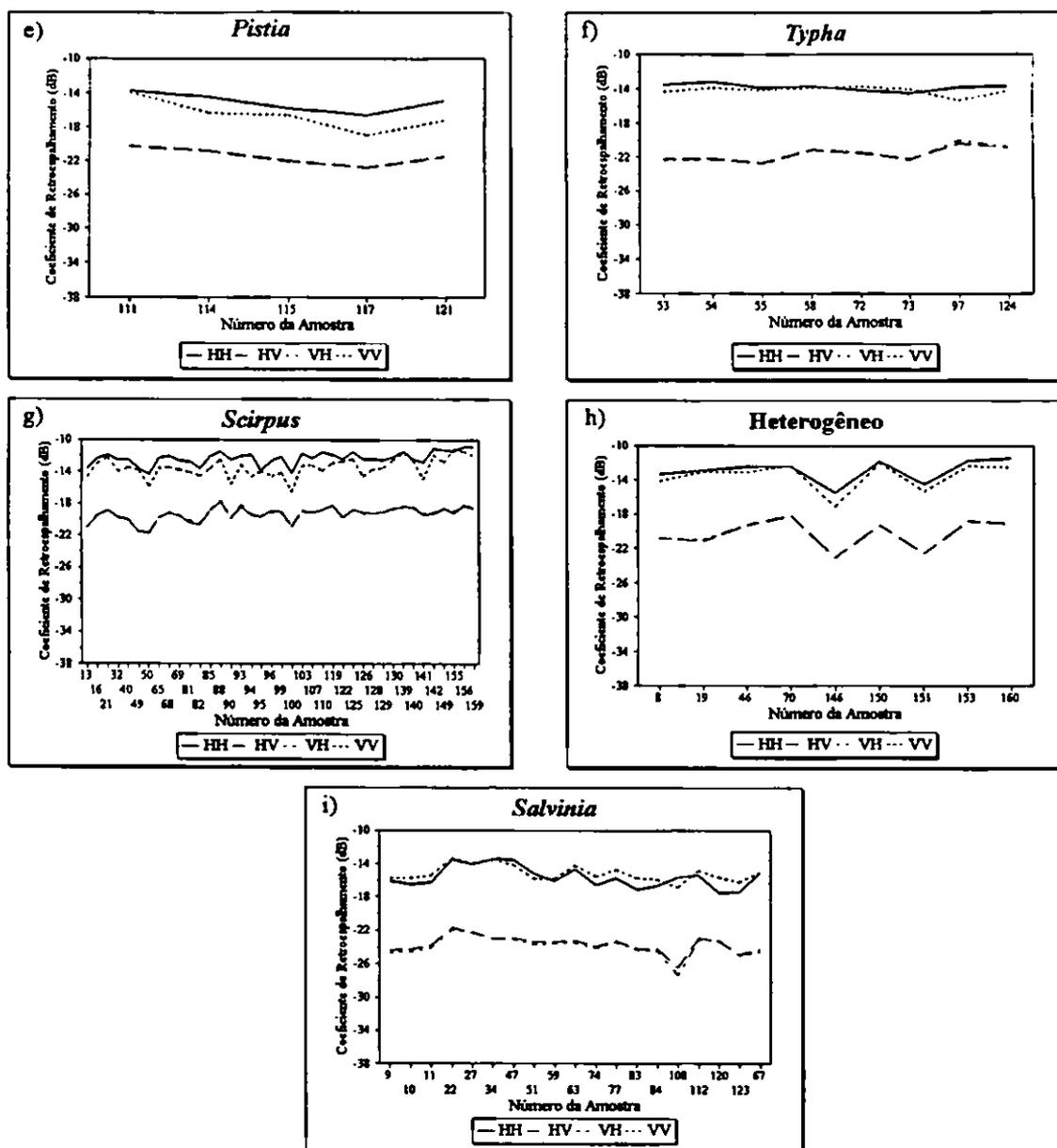


Fig. 4.11 - Valores médios do  $\sigma^\circ$  das amostras em cada classe: a) Água; b) Paliteiros; c) Floresta; d) *Eichhornia*; e) *Pistia*; f) *Typha*; g) *Scirpus*; h) Heterogêneo; i) *Salvinia*.

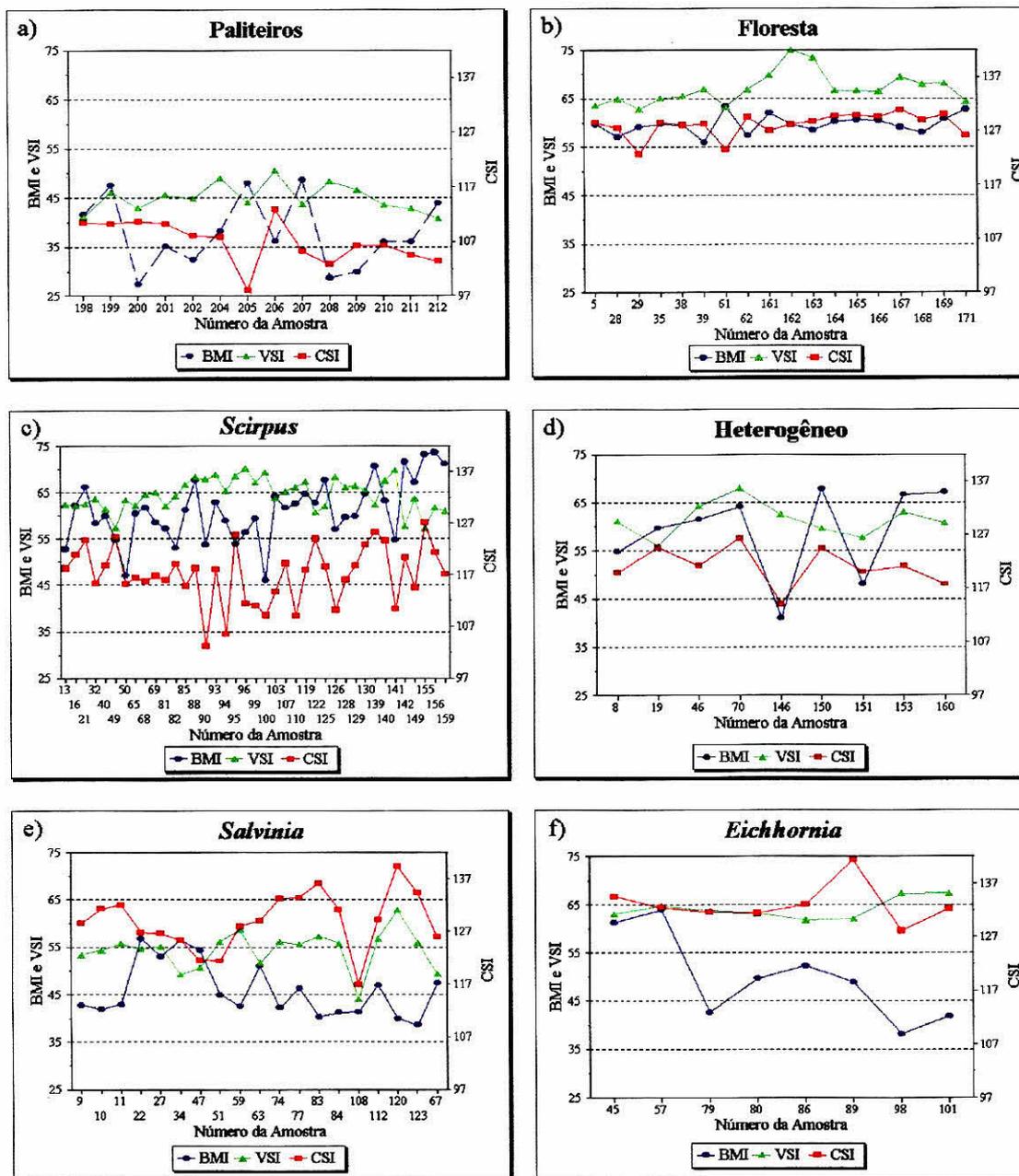
Na Figura 4.11 é possível avaliar o comportamento das polarizações dentro das classes. Na análise desta figura como um todo, pode-se observar que algumas classes são mais estáveis em relação ao comportamento de suas amostras, como as classes Floresta e *Typha*. Entretanto, a maioria das classes apresenta um comportamento

instável de suas amostras. Este comportamento instável é mais evidente nas classes Paliteiros, *Scirpus* e Heterogêneo.

A grande variação do  $\sigma^\circ$  nas amostras da classe Paliteiros, provavelmente se dá devido à variação no número de árvores mortas, à distribuição aleatória destas árvores, e à presença de pequenos bancos de plantas aquáticas nas amostras. Para as classes *Scirpus* e Heterogêneo esta variação pode estar associada a variação na altura das plantas nestas classes. Variação esta, que possui grande influência no retroespalhamento da banda C (Rosenthal et al., 1985). Por outro lado a classe Floresta apresenta uma pequena variação do  $\sigma^\circ$  nas amostras. Le Toan et al. (1992) também encontraram baixos valores no range dinâmico de florestas, e este fato foi associado à saturação do  $\sigma^\circ$  na banda C em florestas com mais de 10 anos, proporcionando assim, uma certa estabilidade nos mecanismos de espalhamento. Estes mecanismos se concentram na camada superior da floresta.

A Figura 4.11 mostra ainda, que os valores do  $\sigma^\circ$  na polarização VV apresentam-se ligeiramente maiores que na HH nas amostras das classes Água ( $\sigma_{VV}^\circ - \sigma_{HH}^\circ = 1,73$  dB), *Salvinia* (0,26 dB), *Eichhornia* (0,83 dB) e Floresta (0,42 dB). Este tipo de comportamento na classe Água, como já comentado na Seção 4.2 pode ser associado ao maior retorno da polarização VV sobre pequenas ondulações sobre a superfície da água, e no caso da classe *Salvinia* esta mesma justificativa pode ter influência, uma vez que as folhas de *Salvinia sp.* são flutuantes e pequenas (3cm), podendo assim, causar efeito semelhante ao de rugosidade na superfície da água. Além disso a classe *Salvinia* sofre ainda, a influência de paliteiros presentes em seus bancos. Nas classes Floresta e *Eichhornia*, um  $\sigma^\circ$  ligeiramente maior na polarização VV pode ser atribuído à uma orientação preferencialmente vertical dos galhos no caso da Floresta, e dos pecíolos no caso da *Eichhornia*. Isto confirma a influência da orientação das estruturas da vegetação no  $\sigma^\circ$  das diferentes polarizações, anteriormente relatadas por Ulaby e Wilson (1985) e Ulaby et al. (1987), estudando dosséis de soja e milho respectivamente, e Mougin et al. (1993) estudando a influência da orientação dos espalhadores no  $\sigma^\circ$  em dosséis de coníferas.

A variação dos índices biofísicos nas amostras, para cada classe, pode ser observada na Figura 4.12. Nesta figura todos os índices foram codificados como nível digital, para melhor visualização da variação.



(continua)

Fig. 4.12 - Conclusão.

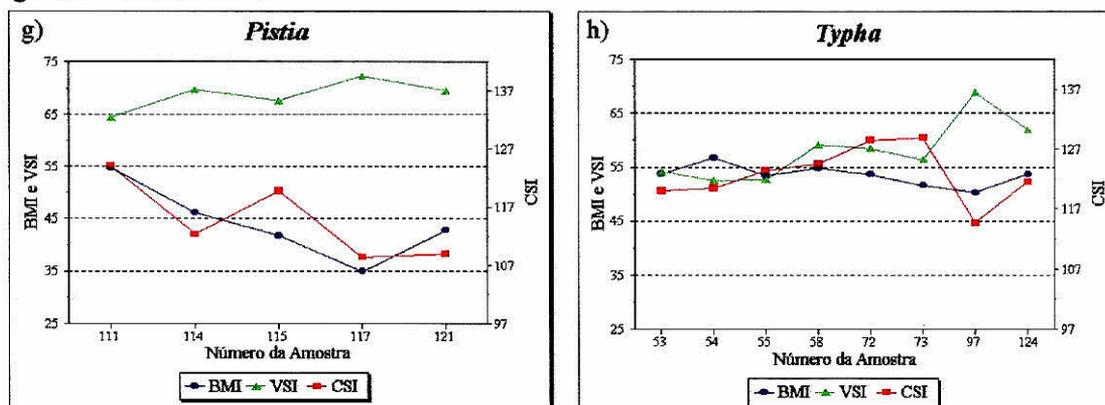


Fig. 4.12 - Variação dos índices biofísicos nas amostras, para cada classe.

Na análise da Figura 4.12 observa-se uma grande instabilidade dos índices em relação às amostras coletadas nas diferentes classes, principalmente nas classes *Scirpus*, Heterogêneo, *Eichhornia* e *Salvinia*.

O índice CSI (estrutura da cobertura) discrimina a classe Paliteiros das classes Floresta e *Eichhornia*. O fato do CSI também ser um indicador das interações do tipo reflexão de canto, o qual, segundo Pope et al. (1994), diminui com o aumento deste tipo de interação, torna possível a discriminação entre a classe Paliteiros das classes Floresta e *Eichhornia* através do número de interações do tipo reflexão de canto, mais frequentes na classe Paliteiros.

A grande variação do CSI nas amostras das classes *Salvinia*, *Scirpus* e Heterogêneo pode estar associada à maior ou menor quantidade de paliteiros nas amostras, os quais influem no valor do CSI, e também na variação da altura das plantas, principalmente nas classes *Scirpus* e Heterogêneo, onde estas variações da amplitude altimétrica são mais acentuadas.

O índice VSI (espalhamento do volume) apresenta maiores valores para a classe Floresta, indicando espalhamento no volume. Já para as classes de plantas aquáticas o VSI parece não indicar este tipo de espalhamento. Esta afirmação é feita devido aos altos valores apresentados pelo VSI na classe *Scirpus*, os quais não concordam com os dados obtidos por Freeman e Durben (1996), que indicam pouca

penetração da onda, na banda C, na camada de um dossel de *cyperacea*, pelo fato de este tipo de dossel ser muito espesso.

Entretanto, sabe-se que o conteúdo de água na planta possui uma correlação positiva com o  $\sigma^\circ$  (Ulaby et al., 1986). Sabe-se também, a partir dos dados obtidos no trabalho de campo de maio de 1996, que a biomassa úmida da classe *Scirpus* é menor que a biomassa úmida de outras classes como *Eichhornia*, como já citado anteriormente. Para avaliar se ocorre influência dessa biomassa úmida no retroespalhamento e nos índices biofísicos, os valores médios do  $\sigma^\circ$  e dos índices em relação à quatro classes, postas em ordem decrescente de biomassa úmida (Floresta, *Eichhornia*, Heterogêneo e *Scirpus*) são apresentados na Figura 4.13. É interessante observar que existe uma relação inversa entre a biomassa e a altura das três classes de plantas aquáticas analisadas na Figura 4.13.

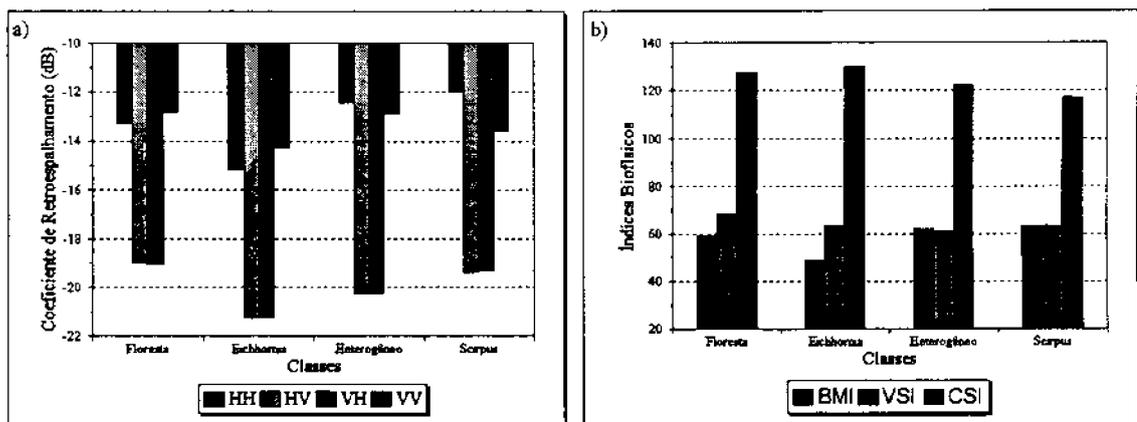


Fig. 4.13 - Valores médios do  $\sigma^\circ$  e dos índices biofísicos das classes: Floresta; *Eichhornia*; Heterogêneo e *Scirpus*. Esta ordem de apresentação representa uma ordem decrescente da biomassa úmida nas classes. Estes dados de biomassa foram obtidos no mês de maio de 1996, no reservatório de Tucuruí.

A Figura 4.13 mostra um aumento do  $\sigma^\circ$  nas polarizações HV e VH a medida que a biomassa úmida das classes de plantas aquáticas diminui. A polarização HH também mostra este comportamento, mas o aumento do  $\sigma^\circ$  é mais acentuado entre a classe *Eichhornia* e Heterogêneo, que entre Heterogêneo e *Scirpus*.

É interessante observar que apesar da classe *Eichhornia* possuir maior biomassa úmida, o que levaria a supor um maior valor do  $\sigma^\circ$ , possui retroespalhamento menor que o das classes *Scirpus* e Heterogêneo. Este fato provavelmente está associado com o tipo de interação ocorrido nestas classes, devido a orientação de seus elementos espalhadores. Observando a Figura 4.14, que ilustra as classes *Eichhornia* (Figura 4.14a) e *Scirpus* (4.14b) em seu habitat, percebe-se que as folhas da *Eichhornia* apresentam uma orientação preferencial voltada para cima. Como essas folhas geralmente são maiores que 5,6 cm, que é o comprimento de onda utilizado, supõem-se que essas folhas podem estar favorecendo uma reflexão especular da onda, o que explicaria os baixos valores do  $\sigma^\circ$ . E quando esta onda consegue penetrar no dossel a maior influência seria dos pecíolos, os quais são orientados verticalmente, daí o maior retorno na polarização VV nesta classe. Já na classe *Scirpus* a sua orientação aleatória, seu aspecto denso e emaranhado, além da sua variação na altura agiriam como uma superfície mais rugosa, favorecendo uma maior componente retroespalhada.

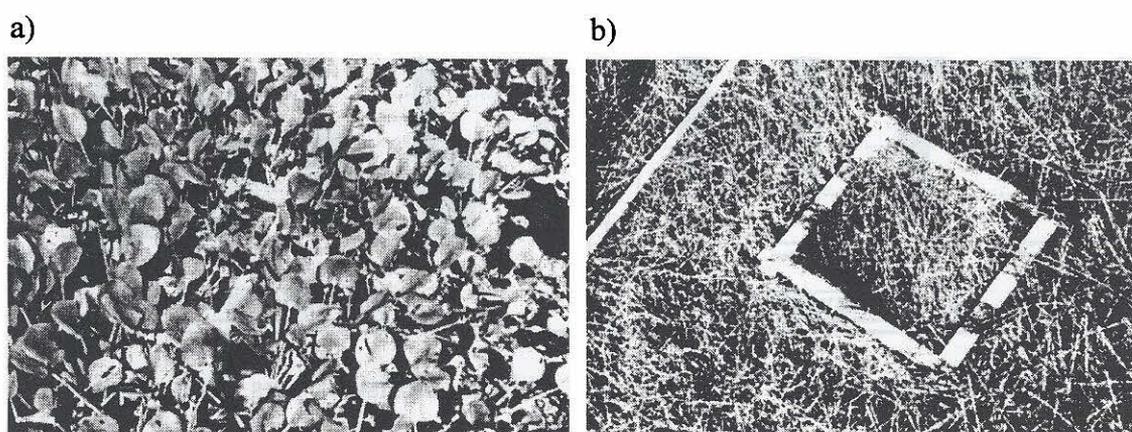


Fig. 4.14 - Fotografias ilustrando um dossel de *Eichhornia* (a) e um de *Scirpus* (b) em seu habitat.

Quanto ao comportamento dos índices, somente o CSI apresenta uma relação direta com a biomassa, o qual apresentou um decréscimo no sentido das classes de plantas aquáticas com menor biomassa úmida. Talvez isto esteja vinculado a maior presença de paliteiros, e conseqüentemente mecanismos de reflexão de canto nas classes Heterogêneo e *Scirpus*, o que tende a uma diminuição dos valores do CSI nestas classes. O BMI (índice de biomassa) apresenta uma relação inversa com a biomassa, mas é a

mesma relação apresentada pelas polarizações paralelas, como já constatado na seção anterior. O VSI, que também poderia funcionar como um indicador de biomassa, não apresenta variação com a variação da biomassa nas classes.

No momento da seleção das amostras tentou-se obter amostras as mais homogêneas possíveis para cada classe, em termos das características das fotografias aéreas e das observações de campo. Com isto era esperado que os índices apresentassem comportamentos semelhantes nas amostras. Contudo isto não ocorreu em algumas amostras de algumas classes. No sentido de tentar explicar este comportamento diferenciado de algumas amostras dentro da classe, analisaram-se as características individuais destas amostras.

Na análise individual das amostras na classe Paliteiros, observa-se que os índices comportam-se de maneira diferenciada quando sofrem as mesmas variações nas características das amostras. Este fato é bem caracterizado nas amostras 206 e 207 que apresentam variação diferenciada no comportamento dos índices, tal que na amostra 206 o CSI é maior que o BMI, e na 207 o comportamento é inverso, embora a descrição dessas duas amostras, feita a partir das fotografias aéreas, seja a mesma, a qual representa paliteiros densos com bancos médios de plantas aquáticas e água. Talvez a disposição dos paliteiros na amostra possa influir de forma diferente na resposta das diferentes polarizações, causando este efeito diferenciado nos índices. Duas amostras consideradas bem características desta classe, com praticamente só paliteiros, são as amostras 208 e 209.

Na classe Floresta as amostras 29 e 171 são caracterizadas pela presença de floresta mais baixa e por serem ilhas. Talvez estas, por serem mais baixas, possuam uma orientação dos espalhadores diferente, variando, assim o comportamento dos índices, que apresentam queda no CSI e VSI. Já as amostras 161, 162 e 163 são descritas como florestas menos densas e aparentemente inundadas. Isto pode indicar o aumento do VSI nestas amostras, devido o aumento do espalhamento no volume. Mas estas características também favorecem os mecanismos de reflexão de canto que tendem a uma

diminuição do CSI. Entretanto, estas amostras não apresentam uma diminuição nos valores de CSI.

Na classe *Scirpus* observa-se grande variação dos índices em relação às amostras. Contudo estas variações não parecem estarem relacionadas com as características de cada amostra. Um exemplo disto pode ser constatado através da análise das amostras 95 e 155 que apresentam valores de CSI semelhantes, mas diferentes comportamentos para VSI e BMI, apesar dessas amostras apresentarem a mesma descrição de suas características. A mesma descrição das amostras, comentadas anteriormente, possui a amostra 126, que apresenta valores de CSI bem menores que os das amostras 95 e 155. Talvez a presença de paliteiros além das variações na altura das plantas dentro das amostras, as quais não são perceptíveis nas fotografias aéreas, possam influenciar no índice CSI.

Na classe *Salvinia*, o índice CSI parece estar relacionado com a densidade dessa planta e a quantidade de paliteiros. A descrição das amostras 47, 51 e 108 mostram maior presença de paliteiros e apresentam baixos valores de CSI. Já as amostras 77, 83, 84 e 123, que apresentam altos valores de CSI, são caracterizadas por possuírem poucos paliteiros e grande densidade de *Salvinia*.

A classe *Echhornia* possui pouca variação nos índices. O CSI apresenta um aumento na amostra 89, na qual o banco é caracterizado por ser pouco denso, pouco homogêneo e apresentar um pouco de água. Já o BMI apresenta, nas amostras 79 e 98, baixos valores, o que indicaria maior biomassa. Contudo o que ocorre nestas amostras é justamente o inverso, elas são caracterizadas por serem homogêneas, densas e sem paliteiros. O VSI apresenta um pequeno aumento nas amostras 98 e 101, as quais são caracterizadas por serem densas com pouco ou nenhum paliteiro. Entretanto as características dessas amostras deveriam causar um decréscimo do VSI. Talvez a elevada biomassa úmida apresentada nesta classe além da orientação de suas folhas, como comentado anteriormente, sejam a causa dessa pouca variação dos índices nesta classe. Sendo resultado de um espalhamento dominante na superfície do dossel.

Esta Seção mostrou que as variações nas características estruturais e morfológicas das amostras, de uma mesma classe, influem no comportamento do  $\sigma^\circ$  e dos índices biofísicos. Mostrou ainda, que as classes Água, *Salvinia*, *Eichhornia* e Floresta apresentam um  $\sigma^\circ$  ligeiramente maior na polarização VV.

Observou-se ainda que, o mecanismo de reflexão de canto é responsável pelas variações do  $\sigma^\circ$  nas amostras da classe Paliteiros. Este mecanismo possui relação inversa com o índice da estrutura da cobertura (CSI), principalmente nas classes Paliteiros e *Salvinia*. O índice de espalhamento do volume (VSI) parece estar relacionado ao espalhamento no volume na classe Floresta. Entretanto, o VSI não está relacionado a este tipo de espalhamento nas classes de plantas aquáticas. Não foi encontrada nenhuma relação entre as características das amostras e o índice de biomassa (BMI), em nenhuma das classes.

Esta Seção mostrou ainda, através da visualização de uma composição colorida das polarizações HH, VV e HV, uma grande quantidade de informações contidas nas imagens de radar multipolarimétrico, as quais não são totalmente observadas nas fotografias aéreas na escala 1:10.000.

#### 4.4 - DISCRIMINAÇÃO ENTRE CLASSES

O estudo da discriminação das classes serve como pré-requisito para avaliar a possibilidade de sucesso na aplicação de técnicas de classificação automática das classes estudadas.

A análise da Figura 4.15, que apresenta o  $\sigma^\circ$  médio de cada classe nas quatro polarizações, indica possibilidade de discriminação das classes estudadas através do  $\sigma^\circ$  médio. O intervalo de confiança de 95% para cada classe foi calculado utilizando os valores médios do nível digital e o número de pixels, e apresentaram valores do erro máximo ( $e$ ) muito pequenos, ficando abaixo de 0.6, e quando transformados em dB ficam menores ainda. Estes pequenos valores são devido ao elevado número de pixels amostrados, e desta forma não são mostrados na Figura 4.15.

Uma análise visual da Figura 4.15 sugere a possibilidade de discriminação de algumas classes, como por exemplo, a possibilidade de discriminação, na polarização HH, entre *Scirpus*, Floresta, *Eichhornia*, Paliteiros e Água. Entretanto nas polarizações HV e VH a discriminação entre *Scirpus* e Floresta não é possível.

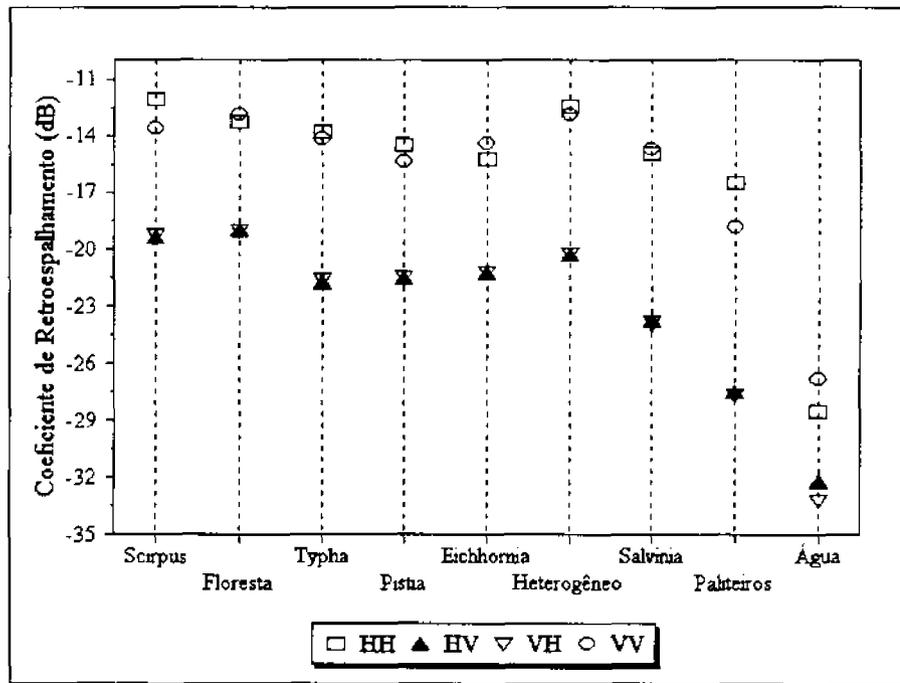


Fig. 4.15 - Valores médios do  $\sigma^{\circ}$  de cada classe nas quatro polarizações.

Costa (1995) aplicou a distância de Battacharya, que supõe a normalidade dos dados, para avaliar a separabilidade das mesmas classes deste estudo. Costa (1995) conclui que as polarizações cruzadas apresentaram melhor separabilidade das classes que as polarizações paralelas, e que, em uma escala de ruim, razoável e boa, as classes *Pistia*, *Salvinia*, *Eichhornia* e *Typha* apresentaram separabilidade ruim. Somente as classes *Scirpus*, Água e Paliteiros apresentaram separabilidade razoável e boa, para as polarizações cruzadas.

A comparação entre os resultados deste estudo e os apresentados por Costa (1995) aponta diferenças significativas entre os dois métodos. As polarizações cruzadas, pela análise dos  $\sigma^{\circ}$  médios, parecem não discriminar a classe *Scirpus* da classe Floresta. Contudo os resultados apresentados por Costa (1995) não tratam da separabilidade das

classes individualmente, não sendo possível avaliar a separabilidade entre as classes *Scirpus* e Floresta no referido estudo. Estudos realizados por Rosenthal et al (1985) apontam a polarização HV com a mais sensível para a discriminação de diferentes tipos de culturas agrícolas.

Porém quando observa-se as Figuras 4.7 e 4.10 percebe-se que a imagem da polarização HV possui uma melhor nitidez. Esta melhor nitidez, entretanto, está associada a ausência de resposta dos mecanismos de reflexão de canto, mecanismos estes mais evidentes na polarização HH. Com isto as polarizações cruzadas não indicam a presença de paliteiros, que são caracterizados por estes mecanismos. Com isto diminui seu potencial para discriminar as classes deste estudo.

Outro aspecto relacionado aos dados obtidos por Costa (1995) é que o número total de pixels amostrados variou entre 100 e 345 pixels, número este muito pequeno comparado aos amostrados neste estudo. Este fato pode ser um fator diferencial na caracterização das classes e conseqüentemente nos resultados encontrados.

Para avaliar a análise visual da Figura 4.15 aplicou-se o teste  $z$  de igualdade entre médias (Equação 4.1). Testou-se a igualdade entre as médias, duas a duas, para todas as combinações de pares de classes possíveis, em todas as polarizações.

$$z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (4.1)$$

onde:  $\bar{x}_1$  e  $\bar{x}_2$  são os níveis digitais médio das classes testadas;

$s_1^2$  e  $s_2^2$  são as variâncias das classes testadas;

$n_1$  e  $n_2$  são os números de pixels amostrados nas classes testadas.

O resultado destes testes foi o de que todas as médias de todas as classes são diferentes entre si. Provavelmente este resultado foi influenciado pelo elevado número de pixels amostrados nas classes. Isto leva a questionar até que ponto o número

de pixels amostrado, e conseqüentemente a sua variância, altera os resultados de uma avaliação da separabilidade de classes em imagens de radar.

Foi calculado o coeficiente de variação, o qual pode ser utilizado como parâmetro de separabilidade, sendo apresentado na Figura 4.16. Na análise desta figura observam-se outras possibilidades de discriminação entre as classes. Somente as classes *Salvinia*, Paliteiros e Água apresentam diferença visual significativa entre as polarizações dentro da classe. Analisando visualmente as classes, o coeficiente de variação indica possibilidade de discriminação entre *Scirpus*, Floresta, *Typha*, Paliteiros e Água. O coeficiente de variação não indica a possibilidade de discriminação entre *Eichhornia* e *Scirpus*, possível quando analisa-se a discriminação utilizando o  $\sigma^\circ$  médio. É interessante observar a impossibilidade de discriminação, através do coeficiente de variação, da classe Água com outras classes como Heterogêneo, *Pistia* e *Typha*.

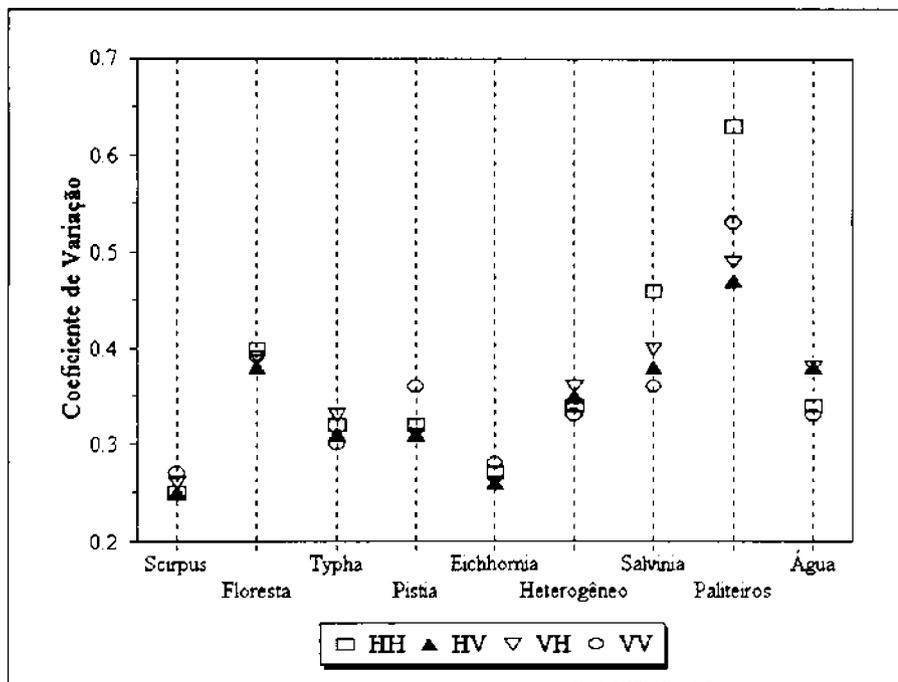


Fig. 4.16 - Valores do coeficiente de variação de cada classe nas quatro polarizações.

Uma análise dos resultados obtidos através dos  $\sigma^\circ$  médios e do coeficiente de variação, poderia levar à conclusão que é possível a discriminação de todas, ou quase todas, as classes estudadas usando as quatro polarizações. Entretanto, foram feitos alguns

testes com classificadores que utilizam o método da máxima verossimilhança, e estes testes não apresentaram resultados satisfatórios. Certamente isto está relacionado ao fato de que tanto o  $\sigma^{\circ}$  médio quanto o coeficiente de variação são derivados de um grande número de pixels amostrados, fazendo com que a média e a variância da amostra estejam próximas da média e da variância verdadeiras de cada classe. Com isso, quando se aplica um tratamento para classificação ao nível de pixel, a variância tende a aumentar, prejudicando a discriminação entre as classes.

O uso de classificadores por regiões talvez apresente melhores resultados. Alguns métodos de classificação têm sido aplicados com certo sucesso em imagens SAR. Segundo Dobson et al. (1995), estes métodos são os baseados em árvores de decisão hierárquicas, e os baseados na determinação dos mecanismos dominantes de espalhamento, a partir da teoria eletromagnética. Pierce et al. (1994) encontraram resultados satisfatórios na classificação de área urbana, vegetação alta, vegetação baixa e solo exposto, utilizando classificador de decisão hierárquica.

Nas Figuras 4.17 e 4.18 observa-se o cruzamento dos  $\sigma^{\circ}$  médios e dos coeficientes de variação das amostras de cada classe para cada polarização. É possível observar a formação de agrupamentos bem definidos de algumas classes.

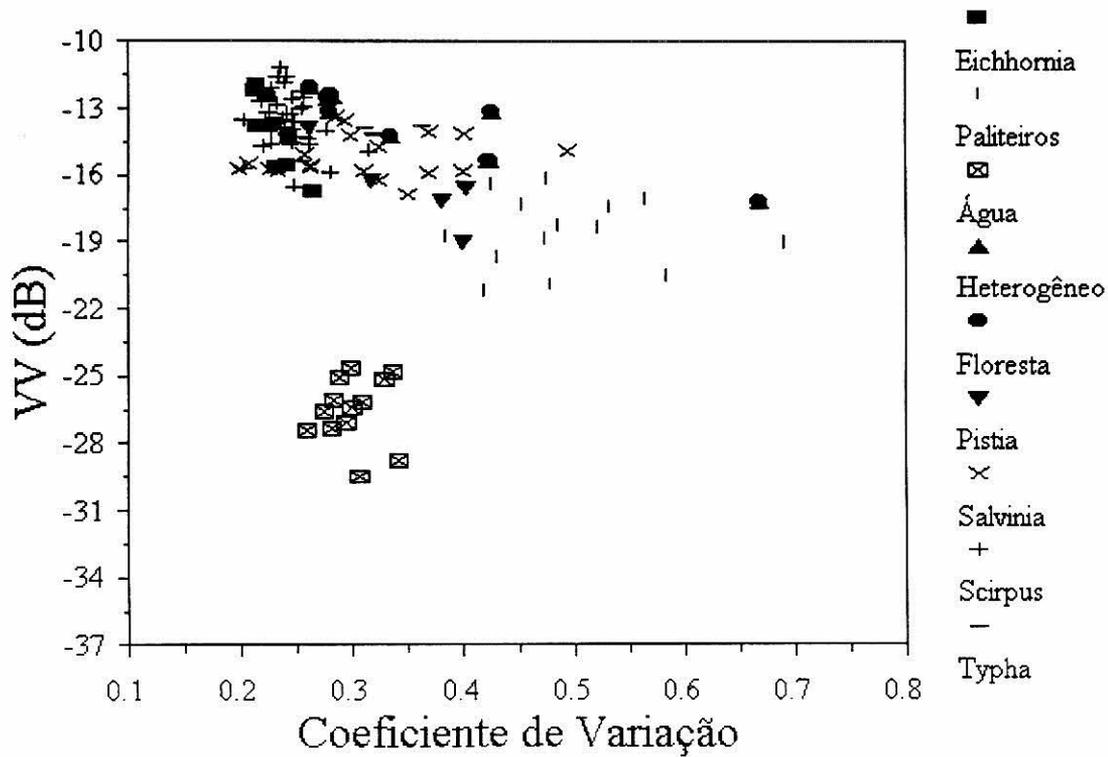
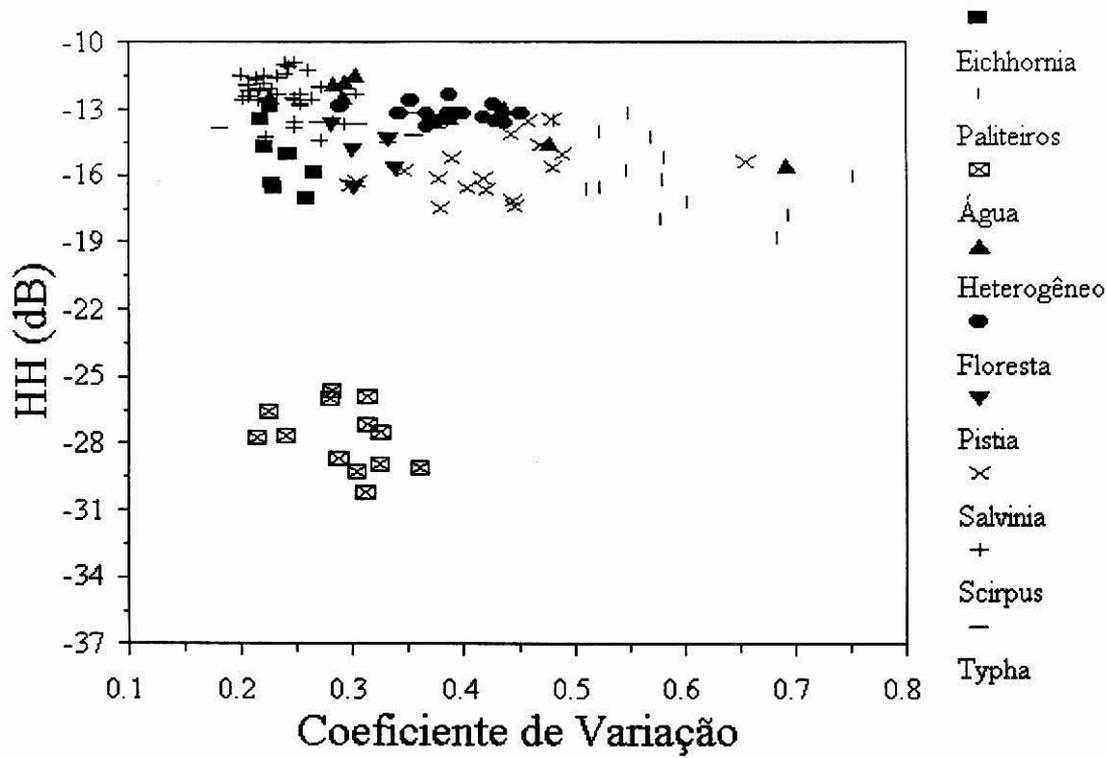


Fig. 4.17 - Diagramas de dispersão do  $\sigma^0$  nas polarizações paralelas, com o coeficiente de variação médio das amostras.

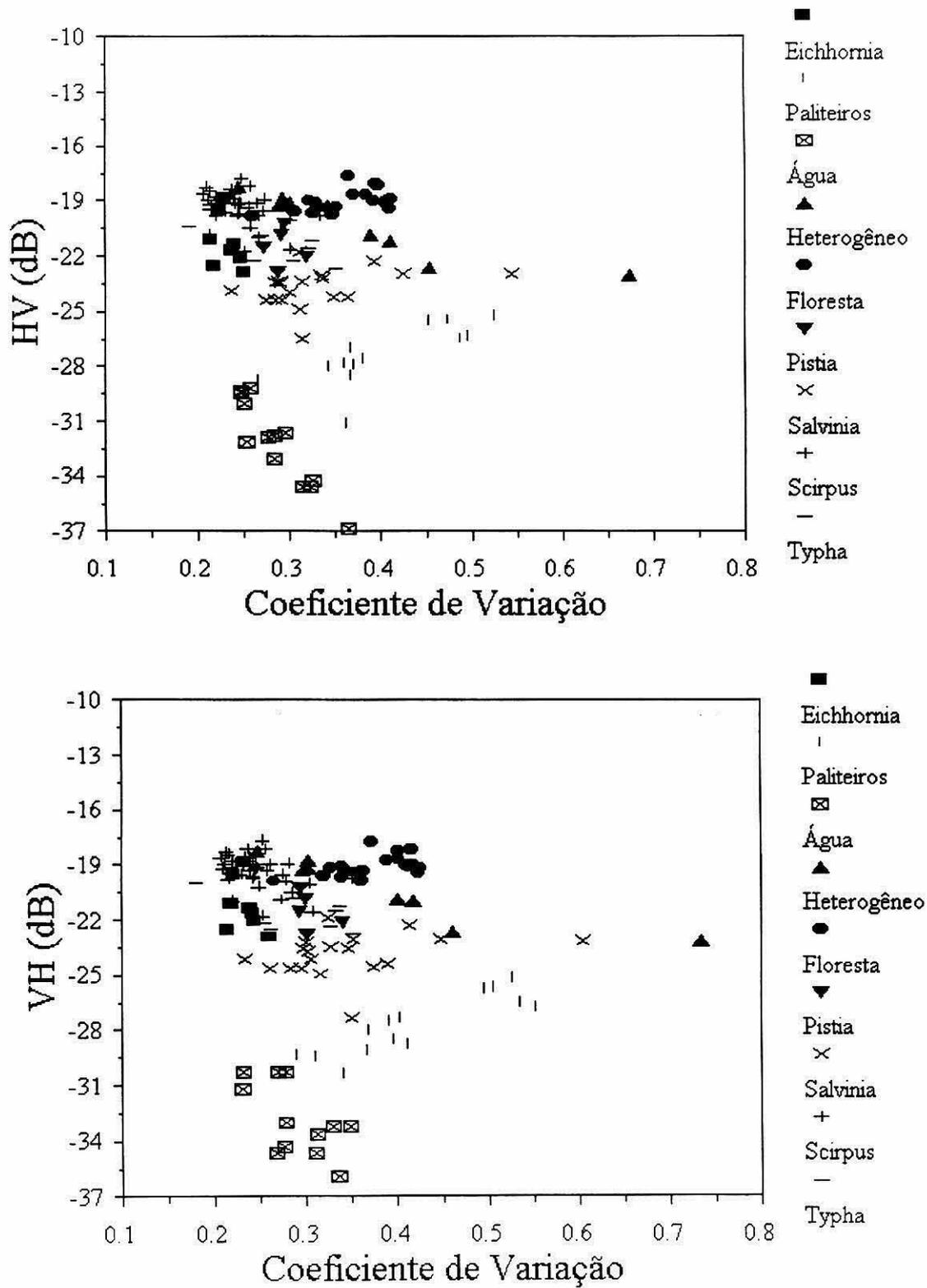


Fig. 4.18 - Diagramas de dispersão do  $\sigma^{\circ}$  nas polarizações cruzadas, com o coeficiente de variação médio das amostras.

A polarização HH parece apresentar melhor definição dos agrupamentos, sendo possível uma boa identificação dos agrupamentos das classes Água, Paliteiros, Floresta, *Scirpus*, *Salvinia* e *Eichhornia*, o que seria um indicador de discriminação dessas classes. Entretanto, apesar da possibilidade de identificação desses agrupamentos, é evidente a sobreposição entre alguns agrupamentos, principalmente entre as classes de vegetação.

A Figura 4.19 mostra um diagrama de dispersão semelhante ao das Figuras 4.17 e 4.18, utilizando as médias totais do  $\sigma^\circ$  e do coeficiente de variação de cada classe.

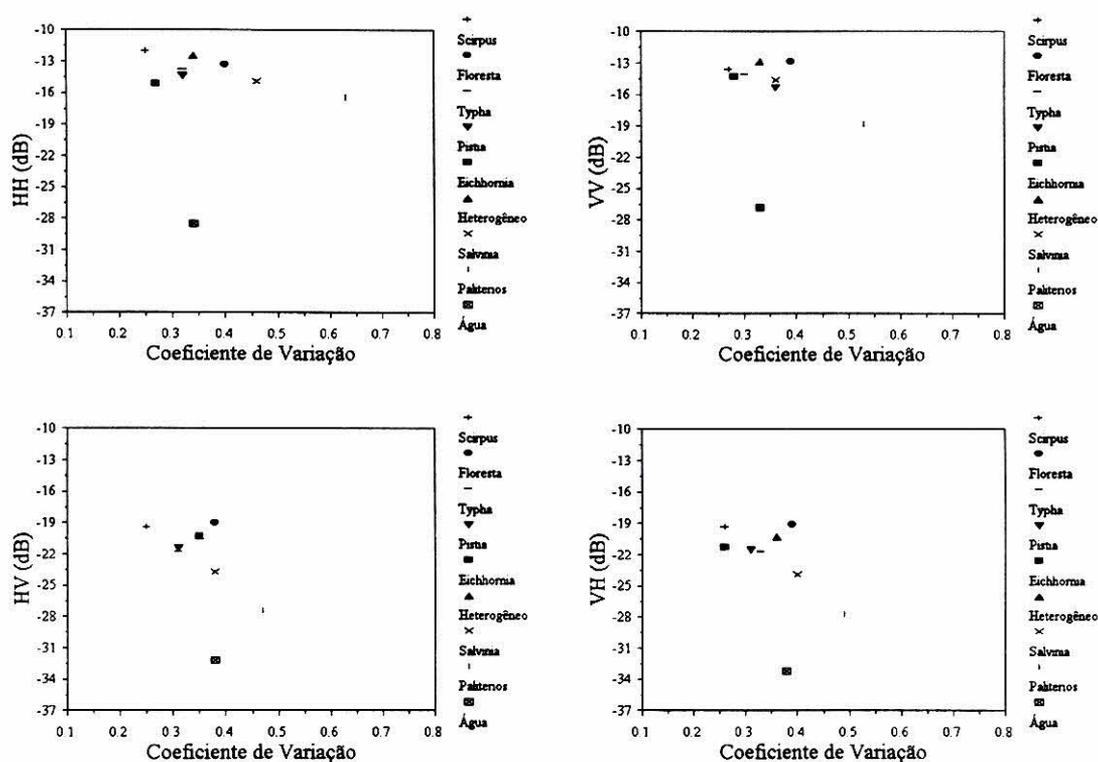


Fig. 4.19 - Diagramas de dispersão do  $\sigma^\circ$  das quatro polarizações com o coeficiente de variação médio.

Na análise da Figura 4.19 fica mais evidente a dificuldade de discriminação das classes utilizando o  $\sigma^\circ$  e o coeficiente de variação, devido a proximidade dos valores destes parâmetros. Nota-se que as classes compostas por vegetação formam um agrupamento em todas as polarizações, permitindo praticamente,

somente a discriminação dessas classes de vegetação com as classes Água e Paliteiros. Somente na polarização HH é que as classes Floresta, *Salvinia*, *Scirpus* e *Eichhornia* aparecem um pouco menos agrupadas.

Para avaliar a possibilidade de discriminação das classes a partir dos índices biofísicos, seus valores são apresentados na Figura 4.20. A análise da Figura 4.20 permite observar três grupos de classes com possibilidade de discriminação no índice CSI (estrutura da cobertura), sendo um grupo formado pelas classes Floresta, *Eichhornia* e *Salvinia*; outro grupo pelas classes *Scirpus*, *Typha*, *Pistia* e Heterogêneo; e o terceiro pela classe Paliteiros.

No VSI (espalhamento do volume) observa-se uma variação menor entre os valores médios das classes, destacando-se das demais somente a classe Paliteiros, destacam-se ainda, mas com menos evidência, as classe Floresta e *Pistia*. No índice BMI (biomassa) também observa-se a formação de três grupos de classes com possibilidade de discriminação, sendo um formado pelas classes Floresta, *Scirpus* e Heterogêneo, outro pelas classes *Eichhornia*, *Typha*, *Salvinia* e *Pistia*; e o outro pela classe Paliteiros.

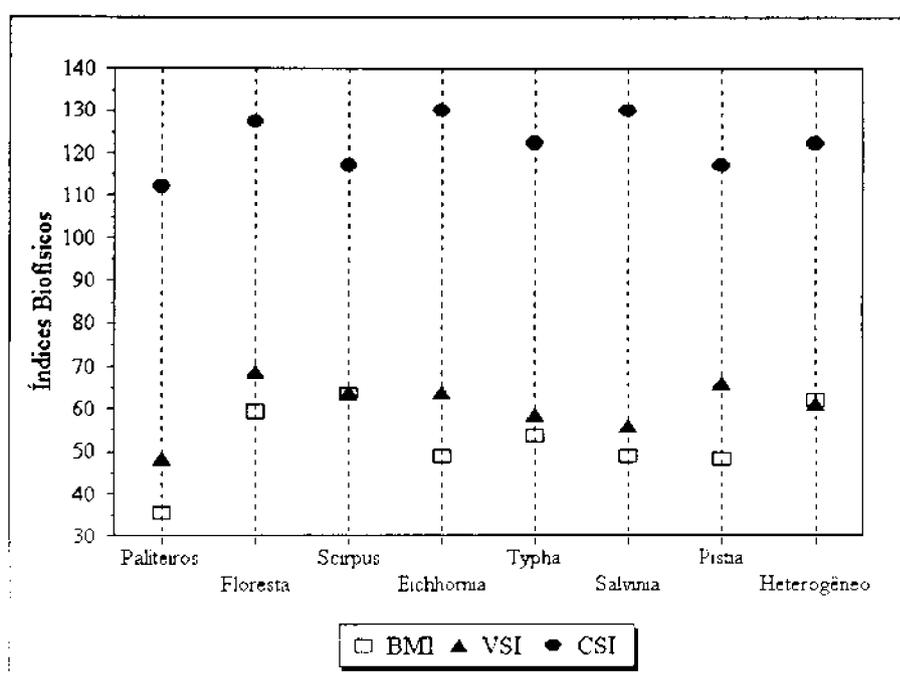


Fig. 4.20 - Valores médios dos índices biofísicos de cada classe.

Apesar dos valores médios dos índices apresentarem possibilidades de discriminação, estas diferenças nos valores médios parecem muito tênues. Devido a isto, são apresentados nas Figuras 4.21 e 4.22 o cruzamento dos valores médios do  $\sigma^\circ$  e dos índices biofísicos, obtidos nas amostras de cada classe para cada polarização, e nas Figuras 4.22d, 4.22e , 4.22f observam-se o cruzamento, entre os valores dos índices biofísicos, das amostras para cada classe.

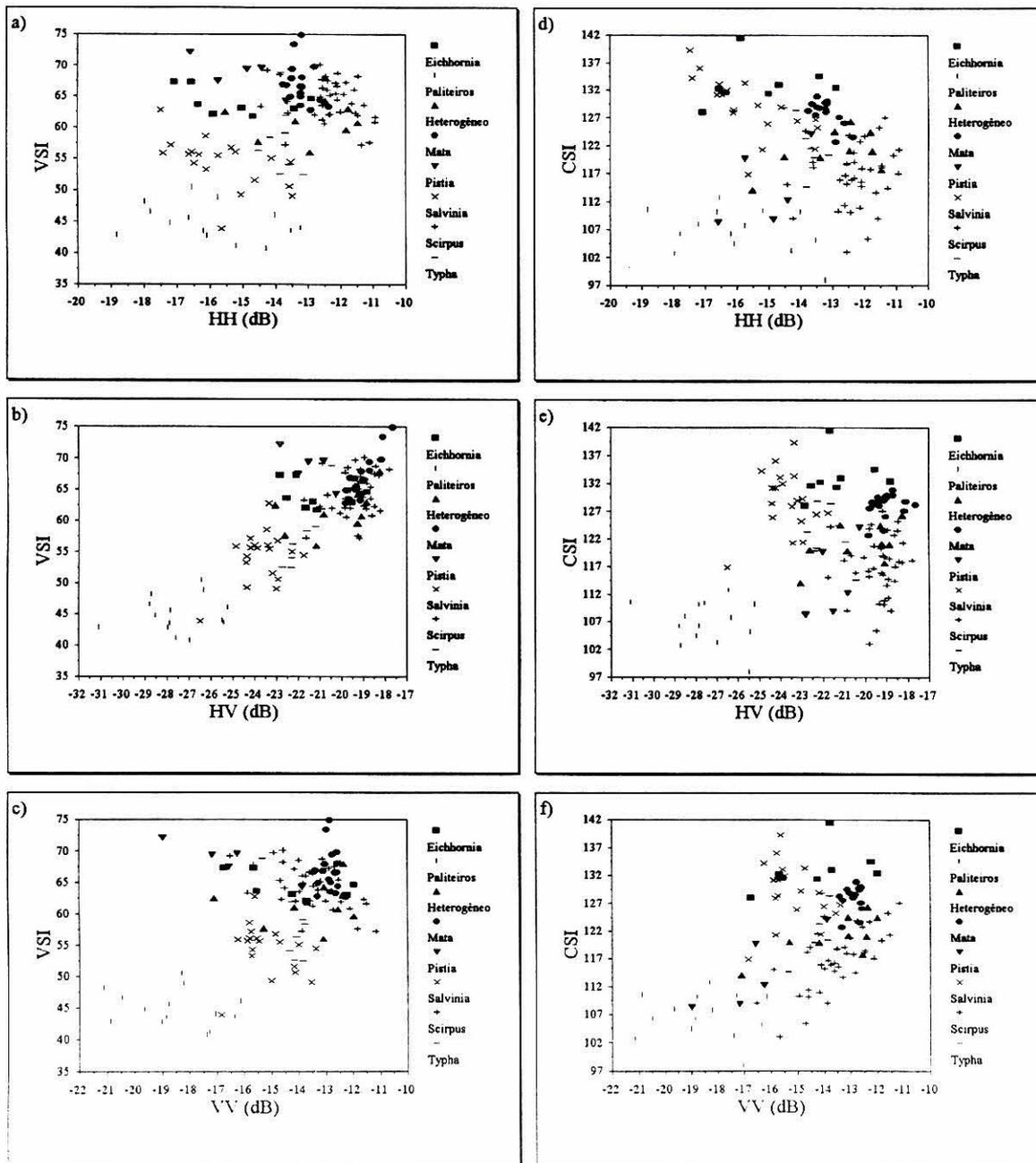


Fig. 4.21 - Diagramas de dispersão do  $\sigma^\circ$  das polarizações com os índices VSI e CSI.

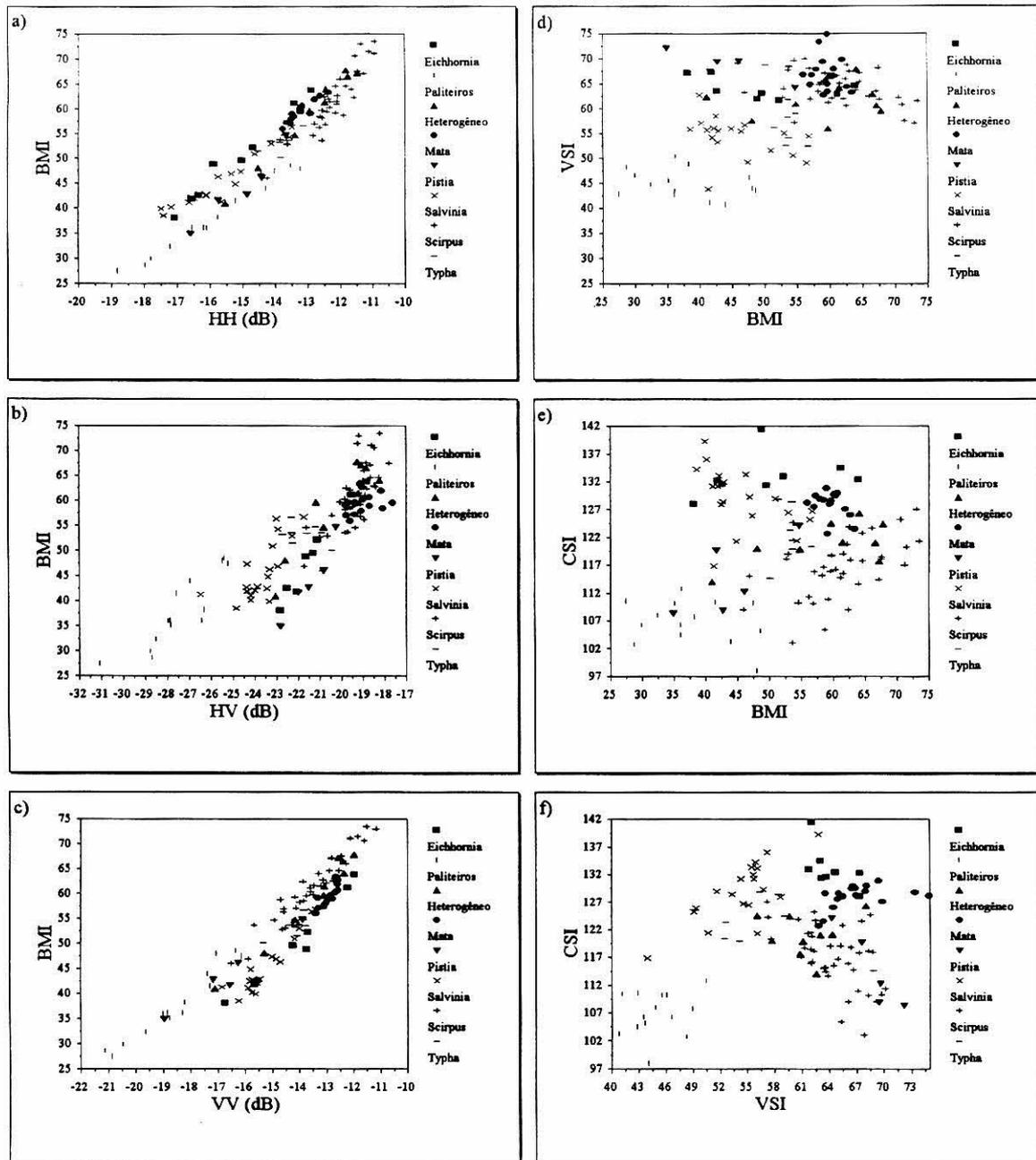


Fig. 4.22 - Diagramas de dispersão do  $\sigma^\circ$  das quatro polarizações com o índice BMI; e entre os índices.

Após a análise dessas figuras, não foi observado a formação de agrupamentos definidos das classes. A exceção foi a classe Paliteiros, que tende a formar agrupamentos em alguns dos cruzamentos, principalmente nos cruzamentos envolvendo os índices CSI e o VSI. Isto indica um baixo potencial de discriminação das classes

utilizando os índices biofísicos. Apesar de que, quando suas médias são analisadas, indiquem alguma possibilidade de discriminação.

Em síntese, nesta Seção pode-se concluir que os valores médios do  $\sigma^{\circ}$  das classes nas diferentes polarizações, juntamente com o coeficiente de variação apresentam baixo potencial de discriminação das classes estudadas. Entretanto, o potencial de discriminação das classes aumenta consideravelmente se estes parâmetros forem analisados simultaneamente nas quatro polarizações. Conclui-se ainda que, para possibilitar uma classificação das classes estudadas se faz necessário o uso classificadores que não atuam pixel a pixel, como os classificadores por regiões e os de decisão hierárquica. E finalmente, que os índices biofísicos apresentam baixo potencial de discriminação das classes estudadas.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho indicam que as imagens de radar multipolarimétrico de alta resolução, na banda C, são sensíveis a algumas variações estruturais e morfológicas dos dosséis de alguns gêneros de plantas aquáticas, principalmente variações na composição e na altura dos mesmos. Contudo, a caracterização radiométrica dessas classes, visando uma classificação automática, é extremamente difícil devido às variações nos fatores do próprio sistema radar, e também das variações intra e inter-dossel nas classes estudadas.

A metodologia de utilizar fotografias aéreas, na escala 1:10.000, como verdade terrestre, mostrou-se útil na localização de alvos de interesse, quando da inexistência de dados de campo que possam ser utilizados no estudo destes alvos. Entretanto, a utilização de fotografias aéreas na identificação de amostras homogêneas de classes de vegetação herbácea, com o objetivo de estudar estas classes com imagens de radar, parece não ser a metodologia mais indicada. Isto devido às grandes variações no modo de aquisição das informações desses dois tipos de produto.

O  $\sigma^{\circ}$  mostrou-se sensível às variações morfológicas e estruturais das classes estudadas. E o range dinâmico mostrou-se indicador da homogeneidade das amostras nas classes. Confirmando assim, a hipótese inicial de que a arquitetura do dossel influencia no retroespalhamento do sinal recebido pelo radar. Contudo, o potencial de discriminação das classes estudadas, apresentado pelos parâmetros  $\sigma^{\circ}$ , coeficiente de variação e índices biofísicos, foi baixo. A polarização que apresentou melhor potencial de discriminação das classes estudadas foi a HH.

O estudo dos aspectos distribucionais das classes, ainda que não muito aprofundado, apresentou a dominância das distribuições Log-Normal e Amplitude GO entre as diferentes polarizações das classes estudadas.

O estudo dos índices biofísicos mostrou que há fortes indícios de que os mecanismos de interação microonda-alvo das plantas aquáticas na banda C, ocorram preferencialmente na superfície do dossel. Entretanto no geral, os índices biofísicos, obtidos na banda C, não se mostraram eficientes na caracterização dos fatores aos quais inicialmente se propunham, para as classes propostas neste estudo.

O índice de biomassa (BMI) não apresentou informações adicionais das já contidas no  $\sigma^\circ$  das diferentes polarizações. Este índice, na banda C, parece não estar relacionado nem com a biomassa das plantas aquáticas, nem com a biomassa da floresta.

O índice de espalhamento do volume (VSI) apresentou relação com a penetração da onda no dossel de floresta. Entretanto esta relação não ocorre com as plantas aquáticas.

O índice da estrutura da cobertura (CSI) se mostrou um bom indicador dos mecanismos de reflexão de canto, presentes principalmente nas classes Paliteiros, *Scirpus* e *Salvinia*.

Este trabalho procurou discutir as potencialidades de dados SAR multipolarimétricos no estudo e discriminação de plantas aquáticas, a partir de alguns parâmetros. No entanto, é necessário discutir-se ainda, muitos aspectos dessas imagens para um melhor conhecimento de todas as informações de que elas dispõe.

Alguns pontos devem receber mais atenção em pesquisas futuras, entre eles pode-se citar:

- 1) coleta de dados detalhados das características morfológicas e estruturais das classes estudadas no momento da aquisição das imagens, para explicar e validar os mecanismos de espalhamento presentes nas imagens de radar;
- 2) repensar os tipos de informações a serem obtidas em trabalhos de verdade terrestre, levando-se em conta o aspecto de homogeneidade de um alvo identificado por um observador no campo, e a escala de aquisição dos dados de radar, em função dos seus princípios de interação microonda-alvo:

- 3) avaliação da influência do número de pixels amostrados no estudo das classes;
- 4) aplicação de técnicas de análises de texturas;
- 5) testes com classificadores por regiões;
- 6) testes com classificadores baseados em árvores de decisão hierárquica.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahem, F.J.; Leckie, D.J.; Drieman, J.A. Seasonal changes in relative C-band backscatter of Northern forest cover types. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **GE-31**(3) : 668-680, 1993.
- Allen, C.T.; Ulaby, F.T. Modeling the polarization dependence of the attenuation in vegetation canopies. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'84). Strasbourg, 27-30, Aug. 1984. **Remote Sensing - From Research Towards Operational Use**. Noordwijk, ESA/ESTEC, 1984. v.1, p. 119-124. (ESA SP-215).
- Barrow, C.J. The environmental impacts of the Tucuruí dam on the middle and lower Tocantins river basin, Brazil. **Regulated Rivers**, **1** : 49-60, 1987.
- Basic concepts of imaging radar: intensive course. São José dos Campos, 17-20, Oct. 1994. São José dos Campos, INPE/CCRS/CIDA, 1994. 65p. Curso ministrado dentro do projeto PRORADAR Brasil-Canadá.
- Beaudoin, A.; Deshayes, M.; Hardy, S.; Le Toan, T.; Girou, D. Use of airborne SAR data for the mapping of shifting cultivation in French Guiana. In: South American Radar Experiment - SAREX-92, Paris, Dec. 6-8, 1993. **Proceedings**. Paris, ESA WPP. 1994. (ESA WPP - 76).
- Bouman, B.A.M. Crop parameter estimation from ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering data. **Remote Sensing of Environment**, **37**(3) : 193-205. 1991.
- Burrows, C.J. **Processes of vegetation change**. London, Unwin Hyman, 1990. 551 p.
- Costa, M.P. **The effect of airborne SAR-C multipolarization and multiangle images in backscattering separability of aquatic plants in the Brazilian Amazon basin**. Ottawa. 1995. (CCRS - Technical Report)

- Costa, M.P.; Ahern, F.J.; Novo, E.M.; Pietsch, R.W.; Noernberg, M.A. Efeito dos dados de multipolarização SAR-C aero-transportado na separabilidade do retroespalhamento de plantas aquáticas do reservatório de Tucuruí - Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, Salvador, 1996. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1996. Em CD-ROM.
- Dallemand, J.F.; Lichtenegger, J.; Raney, R.K.; Schumann, R. **Principes d'imagerie radar**. Rome, FAO/ESA, 1991. (RSC Series 67).
- Dobson, M.C.; Ulaby, F.T.; Le Toan, T.; Beaudoin, A.; Kasischke, E.S.; Christensen, N. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 30(2) : 412-415, 1992.
- Dobson, M.C.; Ulaby, F.T.; Pierce, L.E.; Sharik, T.L.; Bergen, K.M.; Kellndorfer, J.; Kendra, J.R.; Li, E.; Lin, C.; Nashashibi, A.; Sarabandi, K.; Siqueira, P. Estimation of forest biophysical characteristics in Northern Michigan with SIR-C/X-SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 33(4) : 877-895, 1995.
- Durben, S.L.; Morrissey, L.A.; Livingston, G.P. Microwave backscatter and attenuation dependence on leaf area index for flooded rice fields. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 33(3) : 807-810, 1995.
- Dutra, L.V.; Frery, A.C.; Filho, P.H.; Sant'Anna, S.J.S.; Yanasse, C.C.F. **Avaliação do uso de imagens SAR polarimétricas para levantamento de recursos terrestres na Amazônia: Reserva Florestal de Tapajós**. São José dos Campos, INPE, 1993. (INPE-5517-PRE/1792)
- Elachi, C. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**. Pasadena, John Wiley, 1987.
- Evans, D.L. Multipolarization radar images for geologic mapping and vegetation discrimination. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-24(2) : 246-256, 1986.

- Freeman, A.; Villasenor, J.; Klein, J.D.; Hoogeboom, P.; Goot, J. On the use of multi-frequency and polarimetric radar backscatter features for classification of agricultural crops. **International Journal of Remote Sensing**, 15(9) : 1799-1812, 1994.
- Freeman, A.; Durben, S. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. 1996. No prelo.
- Fung, A.K.; Ulaby, F.T. Matter-energy interaction in the microwave region. In: Simonett, D.S. ed. **Manual of remote sensing**. 2.ed. Falls Church, ASP, 1983. v.1, cap. 4, p. 115-164.
- Haralick, R.M.; Caspall, F.; Simonett, D.S. Using radar imagery for crop discrimination: a statistical and conditional probability study. **Remote Sensing of Environment**, 1(2) : 131-142, 1970.
- Hawkins, R.K.; Teany, L.D. SAREX 1992, data calibration. In: South American Radar Experiment - SAREX-92, Paris, Dec. 6-8, 1993. **Proceedings**. Paris, ESA WPP. 1994. p. 41-53. (ESA WPP - 76).
- Hess, L.L.; Melack, J.M.; Simonett, D.S. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. **International Journal of Remote Sensing**, 11(7) : 1313-1325, 1990.
- Hoehne, F.C. **Plantas aquáticas**. São Paulo, Instituto de Botânica, 1948. 168 p. (Instituto de Botânica, D).
- Imnhoff, M.; Story, M.; Vermillion, C.; Khan, F.; Polcyn, F. Forest canopy characterization and vegetation penetration assessment with space-born radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-24(4) : 535-542. 1986.
- Jones, E.R.; Childers, R.L. **Contemporary college physics**. Reading, Addison-Wesley, 1992. 941 p.

- Johnson, R.W.; Munday, J.C. The marine environment. In: Simonett, D.S. ed. **Manual of remote sensing**. 2 ed. Falls Church, ASP, 1983. v. 2, cap. 28, p. 1371-1496.
- Junk, W.J. **Macrófitas aquáticas nas várzeas da Amazônia e possibilidades do seu uso na agropecuária**. Manaus, INPA, 1979.
- Junk, W.J.; Howard-Williams, C. Ecology of aquatic macrophytes in Amazonia. In: Sioli, H. **The Amazon: limnology and landscape ecology of a might tropical river and its basin**. Dordrecht, Dr. W. Junk Publishers, 1984. p. 269-293. (Monographiae Biologicae, 56).
- Kelly, C.A.; Rudd, J.W.M.; St. Louis, V.L.; Moore, T. Turning attention to reservoir surfaces, a neglected area in greenhouse studies. **EOS, Transactions, American Geophysical Union, 75(29) : 332-334**, July, 1994.
- Le Toan, T.; Lopes, A.; Huet, M. On the relationships between radar backscattering coefficient and vegetation canopy characteristics. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'84). Strasbourg, 27-30, Aug. 1984. **Remote Sensing - From Research Towards Operational Use**. Noorwijk, ESA/ESTEC, 1984. v. 1, p. 155-160. (ESA SP-215).
- Le Toan, T.; Beaudoin, A.; Riou, J.; Guyon, D. Relating forest biomass to SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(2) : 403-411**, 1992.
- Morrisey, L.A.; Livingston, G.P.; Durben, S.L. Use of SAR in regional methane exchange studies. **International Journal of Remote Sensing, 15(6) : 1337-1342**, 1994.
- Mougin, A.L.; Karam, M.A.; Fung, A.K. Effect of tree structure on X-band microwave signature of conifers. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 31(3) : 655-667**, 1993.

- NASA. **SAR-synthetic aperture radar**: instrument panel report. Washington, DC. NASA, s.d. 233 p. (Earth Observing System, 2f).
- Novo, E..M.; Costa, M.P.; Noernberg, M.A. Airborne SAR data to map Tucuruí reservoir (Amazon). In: South American Radar Experiment - SAREX-92, Paris, Dec. 6-8, 1993. **Proceedings**. Paris, ESA WPP. 1994. p. 71-86. (ESA WPP - 76).
- Novo, E..M.; Costa, M.P.; Noernberg, M.A. **Relatório preliminar do Projeto SAREX Tucuruí**. São José dos Campos, INPE, 1995. (INPE-5621-RRP/190)
- Novo, E..M.; Costa, M.P.; Noernberg, M.A.; Ahern, F.J. Application of C-Band SAR data for detection and mapping of aquatic vegetation in the Tucuruí reservoir, Brazilian Amazon. jul. 1996. Submetido para publicação no Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
- Ott, J.S.; Kasischke, E.S.; French, N.H.; Gross, M.F.; Klemas, V. Preliminary evaluation of a multi-channel SAR data set for a Mid-Atlantic coastal marsh. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'90). College Park, 20-24, May, 1990. **Digest**. Piscataway, IEEE, 1990. p.453-456. (IGRSE3).
- Paris, J.F. Radar backscattering properties of corn and soybeans at frequencies of 1.6, 4.75, and 13.3 GHz. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-21(3) : 392-400, 1983.
- Paris, J.F.; Ustin, S.L. Quantitative estimation of standing biomass from L-band multipolarization data. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'90). College Park, 20-24, May, 1990. **Digest**. Piscataway, IEEE, 1990. p.147-150. (IGRSE3).
- Payne, A.I. **The ecology of tropical lakes and rivers**. Chichester, John Wiley and Sons. 1986. 310 p.

- Pereira, A.; Tassin, B.; Mouchel, J.M. Estudo hidrodinâmico e de balanço de cargas de um reservatório tropical. In: Hydrology and Water Management of the Amazon Basin. 05-09, Aug. 1991. **Proceedings**. Montevideo, UNESCO, 1991. p. 03-19.
- Pierce, L.E.; Ulaby, F.T.; Sarabandi, K.; Dobson, M.C. Knowledge-based classification of polarimetric SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **32(5)** : 1081-1086, 1994.
- 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**, **48(2)** : 205-219, 1994.
- Pullianen, J.T.; Heiska, K.; Hyypää, J.; Hallikainen, M.T. Backscattering properties of Boreal forest at the C- and X-bands. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **32(5)** : 1041-1049, 1994.
- Rosenthal, W.D.; Blanchard, B.J.; Blanchard, A.J. Visible / infrared / microwave agriculture classification, biomass, and plant height algorithms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **GE-23(2)** : 84-89, 1985.
- Sader, S.A. Forest biomass, canopy structure, and species composition relationships with multipolarization L-band Synthetic Aperture Radar data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, **53(2)** : 193-202, 1987.
- Siegel, S. Estatística não paramétrica para ciências do comportamento. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 350 p.
- Simonett, D.S.; Davis, R.E. Image analysis - active microwave. In: Simonett, D.S. ed. **Manual of remote sensing**. 2. ed. Falls Church, ASP, 1983. v. 1, cap. 25. p. 1125-1180.
- Trevett, J.W. **Imaging radar for resources surveys**. New York. Chapman and Hall, 1986. 313 p.

- Ulaby, F.T.; Bradley, G.A.; Dobson, M.C. Microwave backscattering dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part II - vegetation-covered soil. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-17(2)** : 33-40, 1979.
- Ulaby, F.T. Vegetation clutter model. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-28(4)** : 538-545, 1980.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: fundamentals and radiometry.** Lawrence, Addison-Wesley, 1981. v. 1.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive.** Washington, DC, Addison-Wesley, 1982. v. 2.
- Ulaby, F.T.; Wilson, E.A. Microwave attenuation properties of vegetation canopies. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-23(5)** : 746-753, 1985.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive.** Reading, Addison-Wesley, 1986. v. 3.
- Ulaby, F.T.; Tavakoli, A.; Senior, T.B.A. Microwave propagation constant for a vegetation canopy with vertical stalks. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-25(6)** : 714-725, 1987.
- Ulaby, F.T.; Dobson, M.C. **Handbook of radar scattering statistics for terrain.** Norwood, Artech House, 1989.
- Vieira, P.R. **Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança para imagens SAR.** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996. No prelo.
- Wang, J.R.; Engman, E.T.; Shiue, J.C.; Rusek, M.; Steinmeier, C. The SIR-B observations of microwave backscatter dependence on soil moisture, surface roughness, and vegetation covers. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-24(4)** : 510-616, 1986.

Wang, Y.; Kasischke, E.S.; Melack, J.M.; Davis, F.W.; Christensen, N.L. The effects of changes in loblolly pine biomass and soil moisture on ERS-1 SAR backscatter. **Remote Sensing of Environment**, **49** : 25-31, 1994.

Wetzel, R.G. **Limnology**. W.B. Philadelphia, Saunders Company, 1975. 743 p.

Wooding, M.G.; Zmuda, A.D. An overview of SAREX-92 data acquisition and analysis of the tropical forest environment. In: South American Radar Experiment - SAREX-92, Paris, Dec. 6-8, 1993. **Proceedings**. Paris, ESA WPP. 1994. p. 3-14. (ESA WPP - 76).

Yanasse, C.C.F.; Frery, A.C.; Sant'Anna, S.J.S.; Filho, P.H.; Dutra, L.V. Statistical analysis of SAREX data over the Tapajós - Brazil. In: South American Radar Experiment - SAREX-92, Paris, Dec. 6-8, 1993. **Proceedings**. Paris, ESA WPP. 1994. p. 25-40. (ESA WPP - 76).

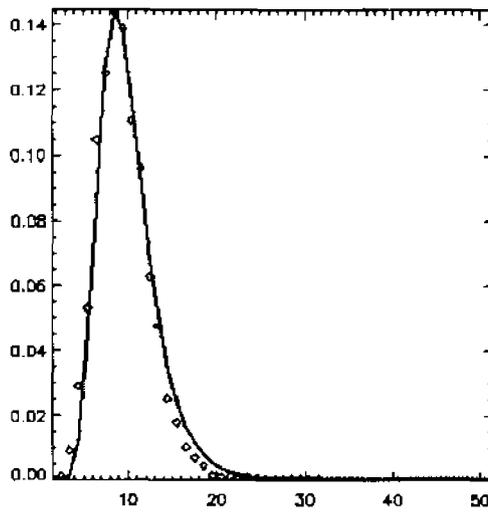
Yanasse, C.C.F.; Frery, A.C.; Sant'Anna. **Stochastic distributions and the multiplicative model**: relations, properties, estimators and applications to SAR image analysis. São José dos Campos, INPE, 1995. (INPE-5630-NTC/318).

Yanasse, C.C.F. **Classificadores**. São José dos Campos, 1996. Comunicação pessoal.

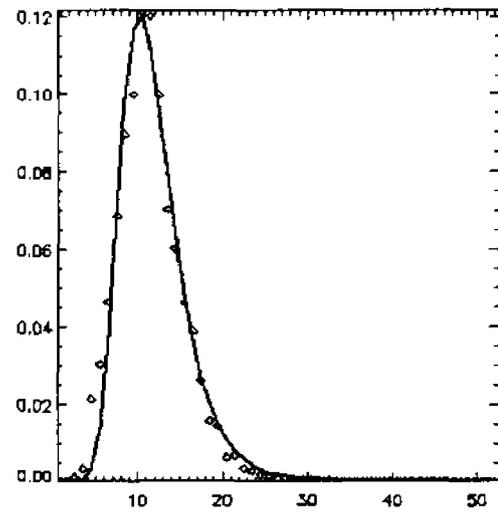
APÊNDICE ADISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS ASSOCIADAS A CADA CLASSES NAS QUATRO POLARIZAÇÕES

## ÁGUA

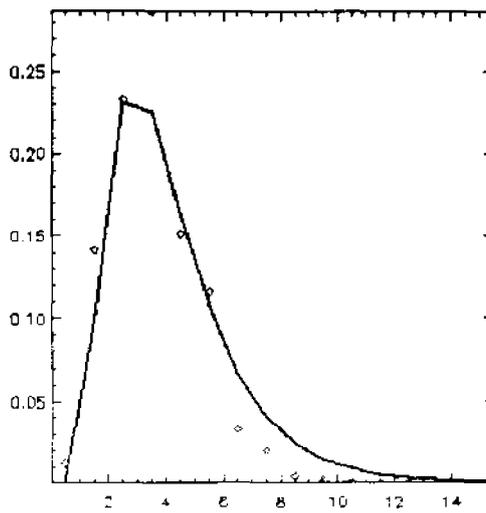
HH (Amplitude GO)



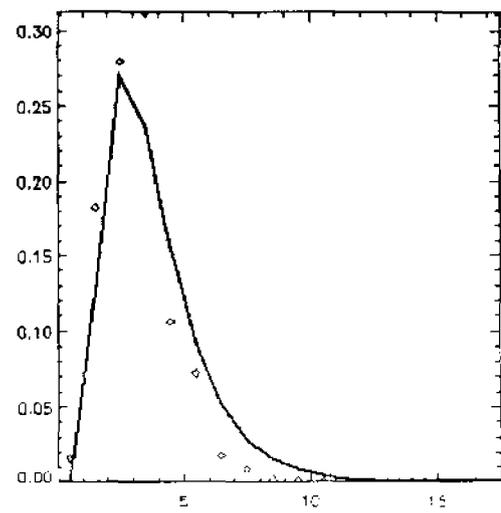
VV (Amplitude GO)



HV (Log-Normal)

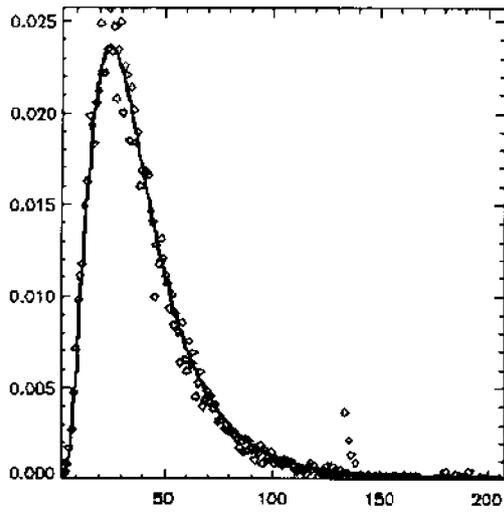


VH (Log-Normal)

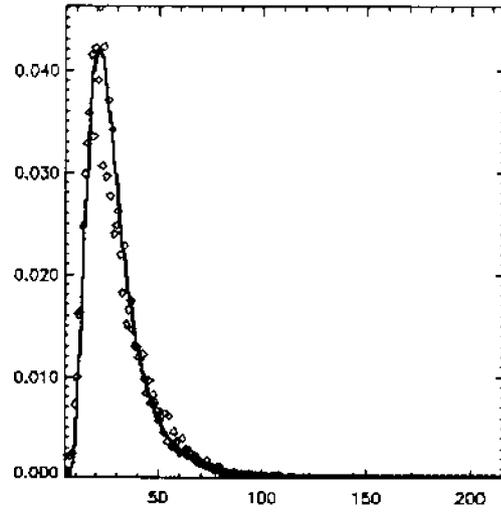


## PALITEIROS

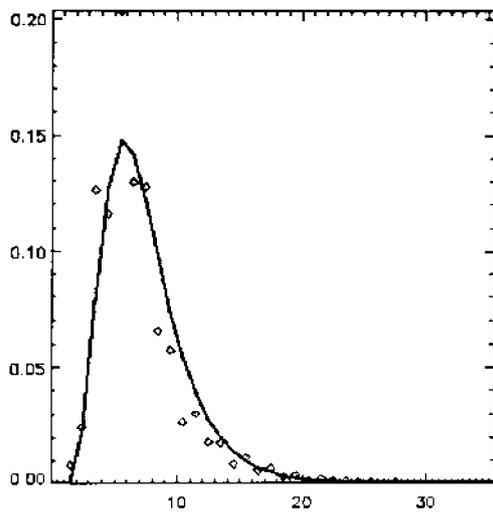
HH (Log-Normal)



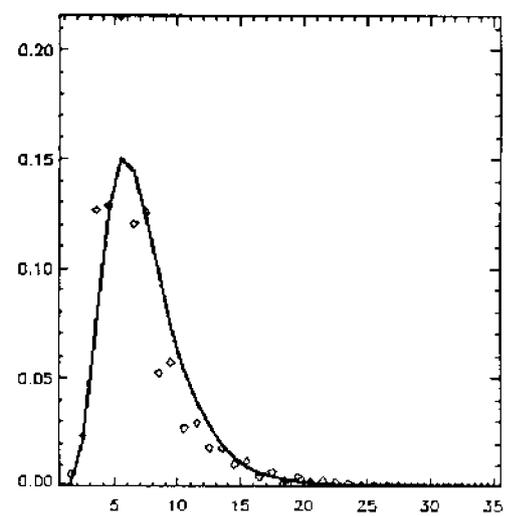
VV (Amplitude GO)



HV (Log-Normal)

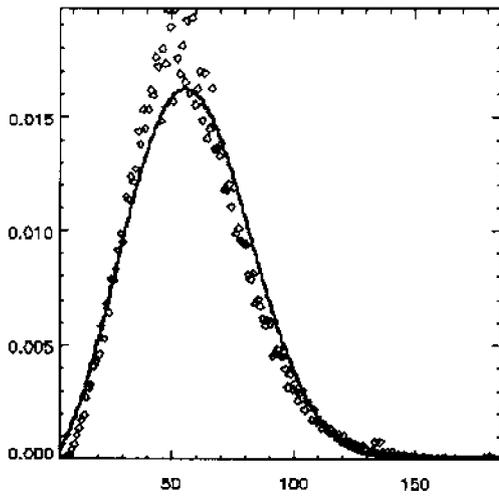


VH (Log-Normal)

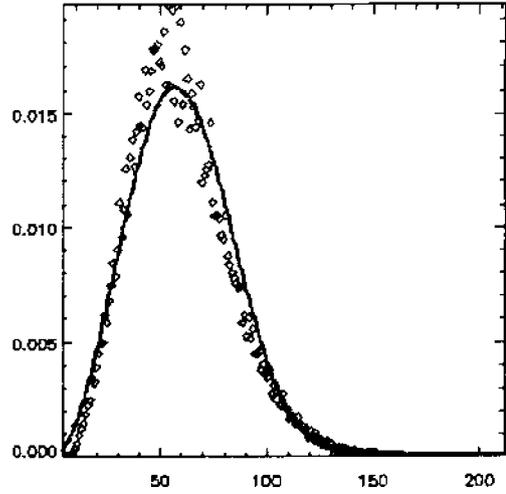


FLORESTA

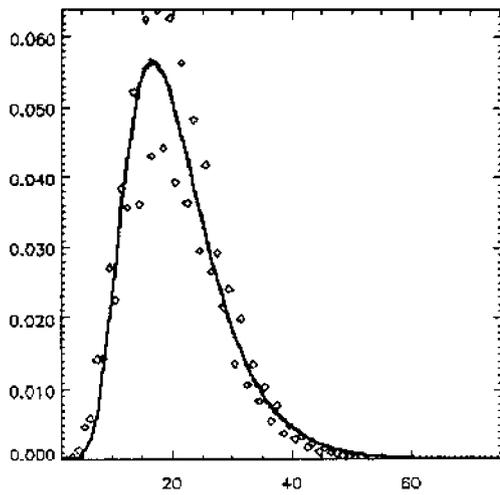
HH (Weibull)



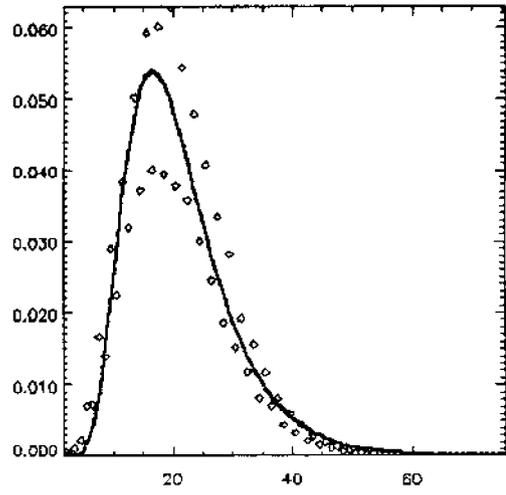
VV (Weibull)



HV (Log-Normal)

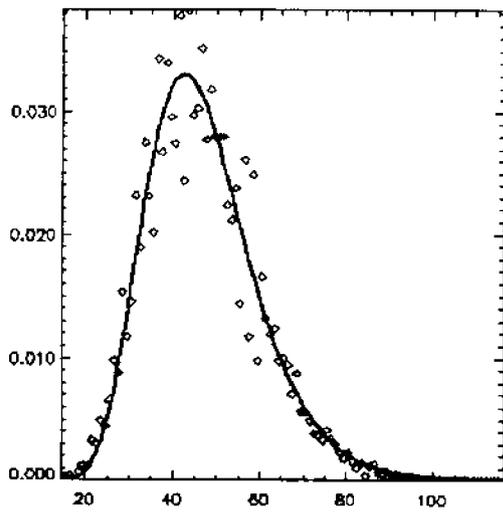


VH (Log-Normal)

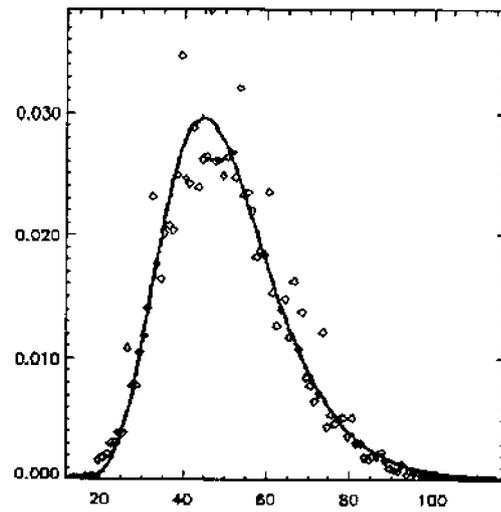


*EICHHORNIA*

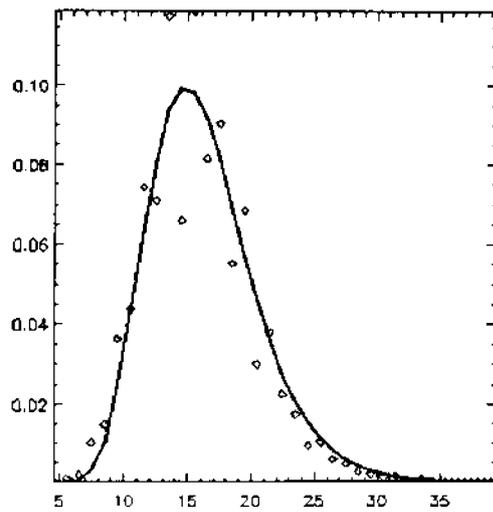
HH (Log-Normal)



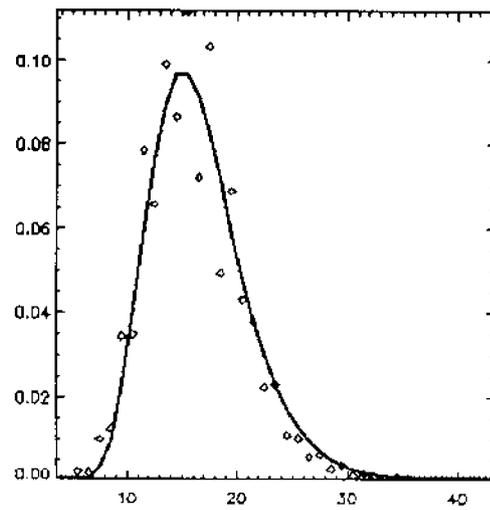
VV (Log-Normal)



HV (Log-Normal)

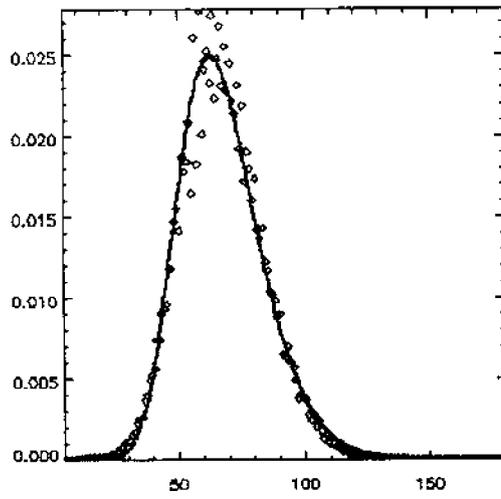


VH (Log-Normal)

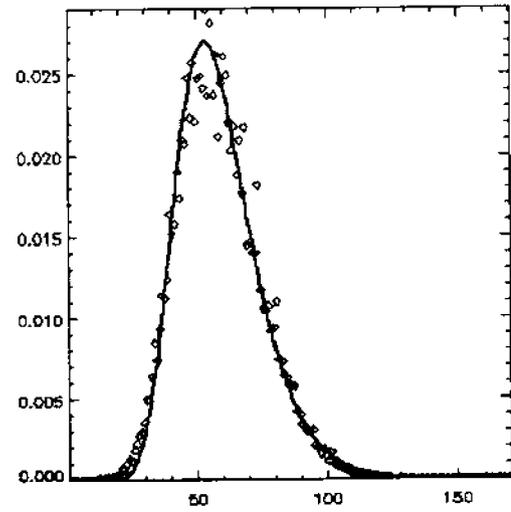


*SCIRPUS*

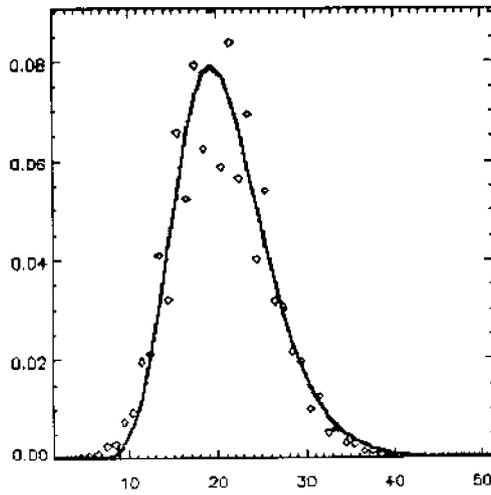
HH (Amplitude GO)



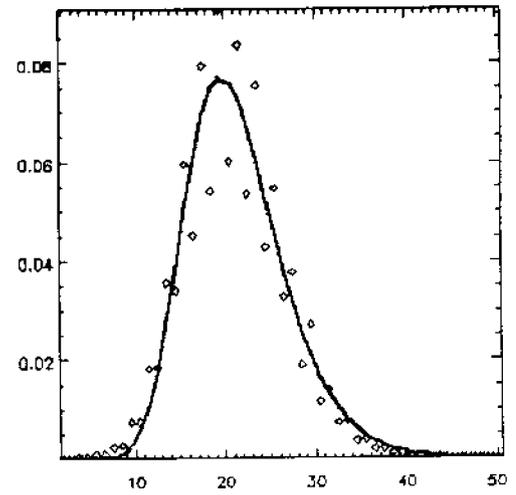
VV (Amplitude GO)



HV (Amplitude GO)

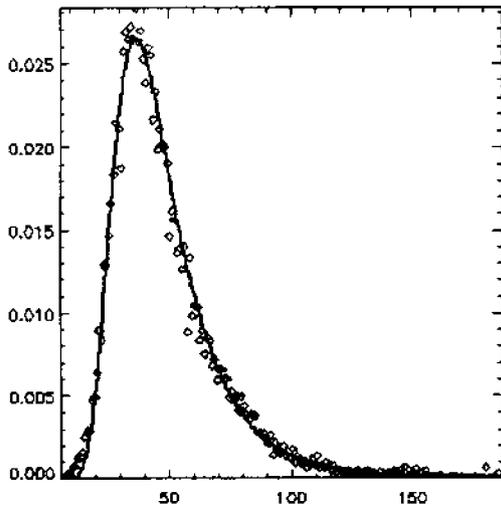


VH (Amplitude GO)

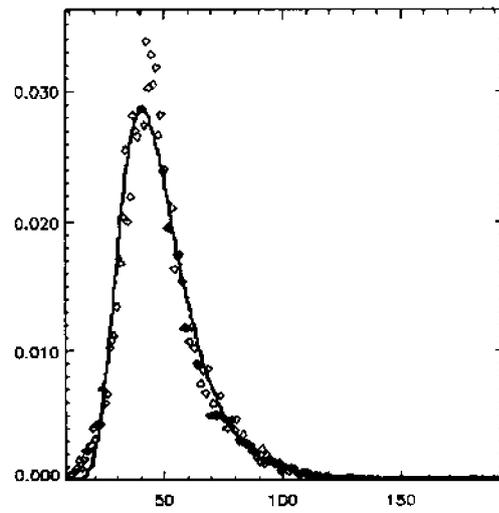


*SALVINIA*

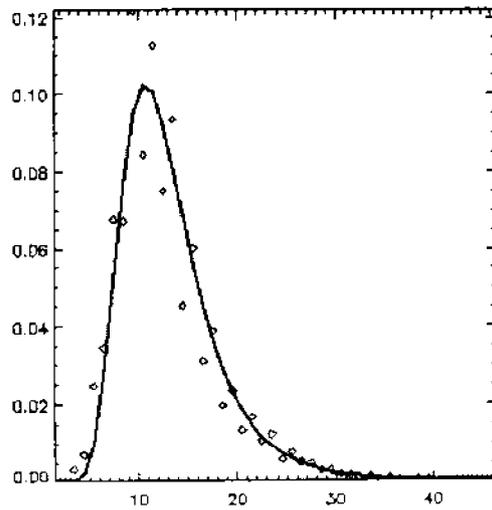
HH (Amplitude GO)



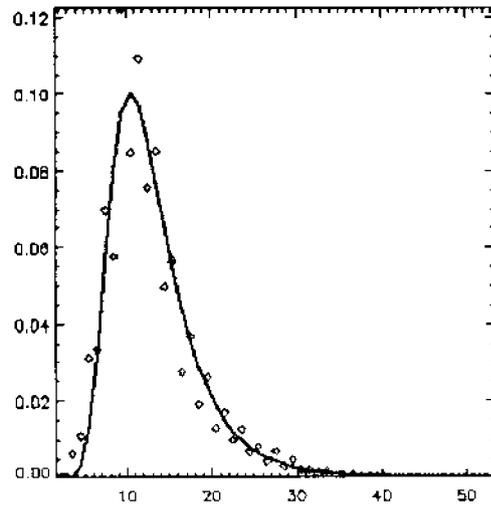
VV (Amplitude GO)



HV (Amplitude GO)

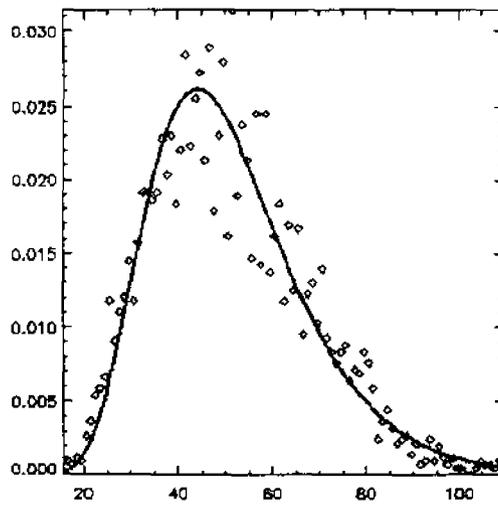


VH (Amplitude GO)

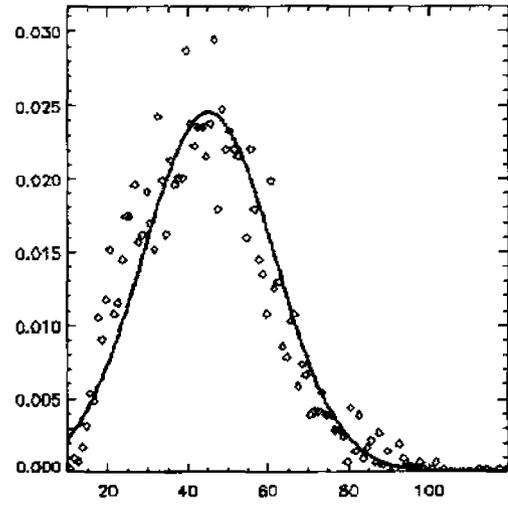


*PISTIA*

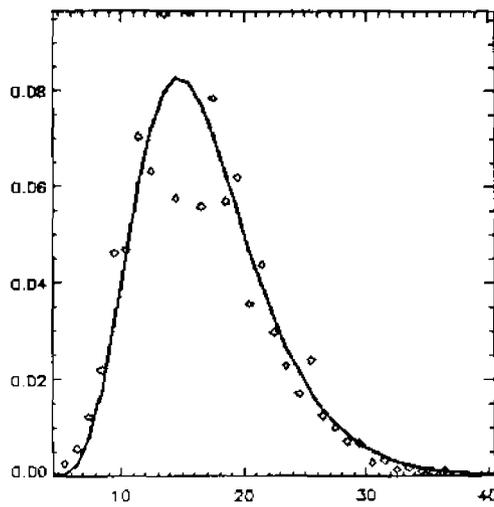
HH (Log-Normal)



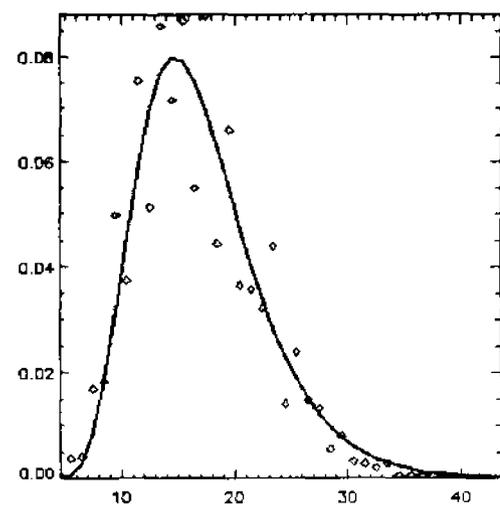
VV (Normal)



HV (Log-Normal)

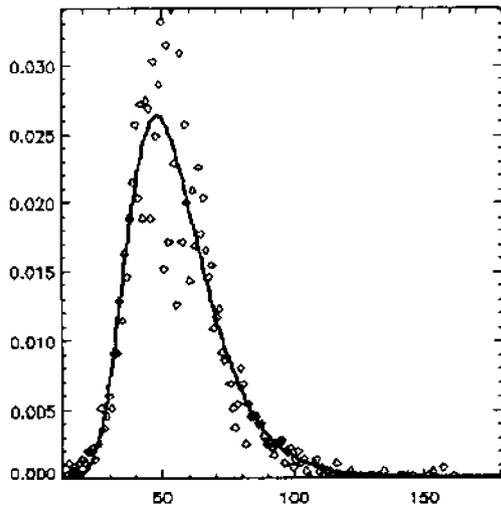


VH (Log-Normal)

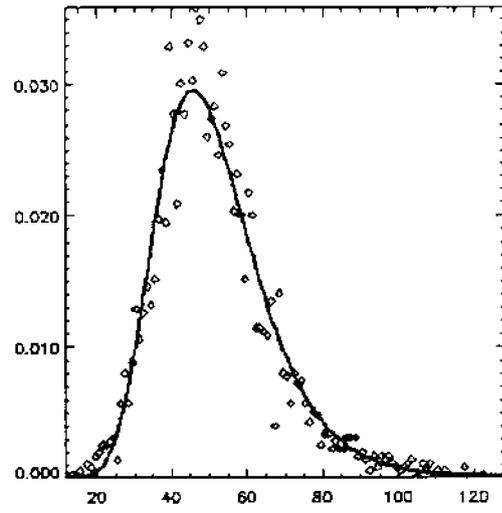


*TYPHA*

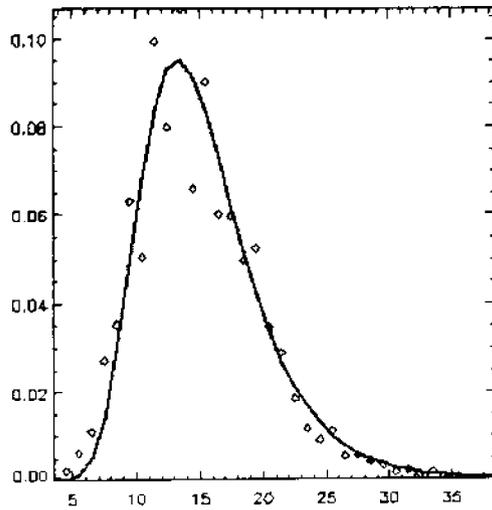
HH (Amplitude GO)



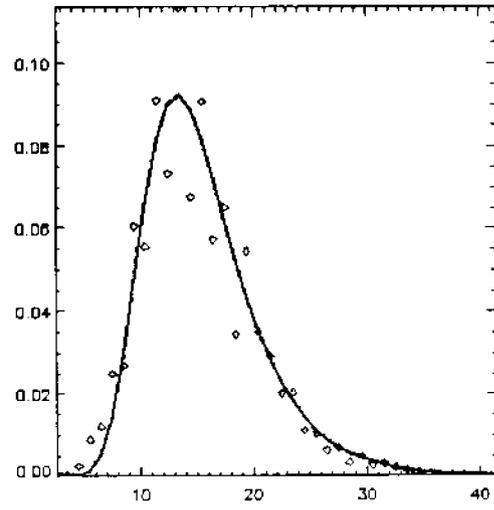
VV (Amplitude GO)



HV (Amplitude GO)

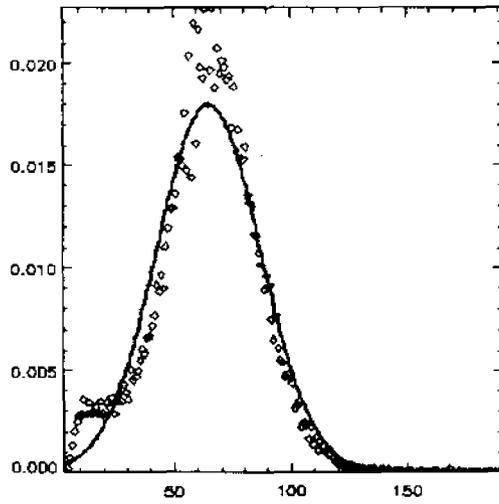


VH (Amplitude GO)

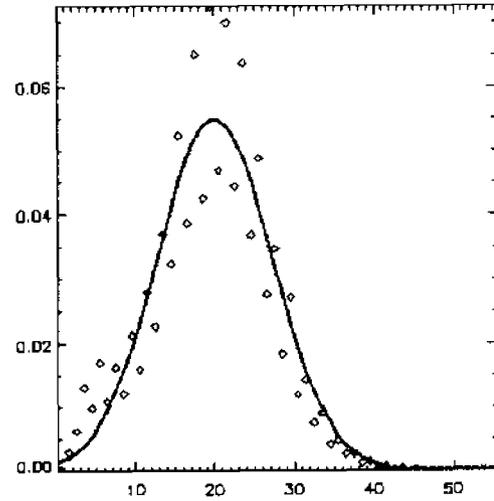


## HETEROGÊNIO

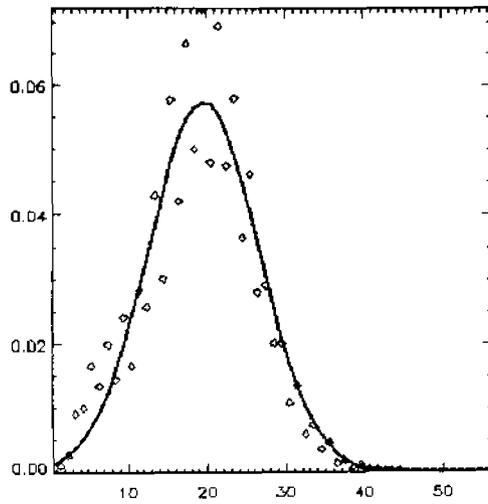
HH (Normal)



VV (Normal)



HV (Normal)



VH (Normal)

