

INPE-5621-PRP/190

PRIMEIRO RELATÓRIO DO PROJETO SAREX-92 - TUCURUÍ

Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo  
Maycira Pereira de Farias Costa  
Maurício Almeida Noernberg

Convênio INPE/CCRS e INPE/ELETRONORTE

INPE  
São José dos Campos  
1995



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-5621-PRP/190

PRIMEIRO RELATÓRIO DO PROJETO SAREX-92 - TUCURUÍ

Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo  
Maycira Pereira de Farias Costa  
Maurício Almeida Noernberg

Convênio INPE/CCRS e INPE/ELETRONORTE

INPE  
São José dos Campos  
1995

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

PRIMEIRO RELATÓRIO DO PROJETO SAREX-92 - TUCURUÍ

Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo  
Maycira Pereira de Farias Costa  
Maurício Almeida Noernberg

Convênio INPE/CCRS e INPE/ELETRONORTE

INPE  
São José dos Campos  
1995

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Canadian International Development Agency (CIDA) pelo financiamento parcial do projeto e às Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.(ELETRONORTE) por proporcionar o suporte logístico. Em particular os autores agradecem ao Engenheiro Newton Zerbini que organizou toda a infra-estrutura de campo para que a Missão SAREX-92 tivesse êxito, ao biólogo Tacachi Hatanaka pela colaboração constante em todas as fases do projeto, à bióloga Maryon Meyer pela colaboração durante a missão de campo e a todos os técnicos da ELETRONORTE que, durante a Páscoa de 1992, se dispuseram a trabalhar na análise das amostras. Os autores agradecem a João Ávila pelo apoio técnico na impressão final do relatório.

## RESUMO

O objetivo deste relatório é o de apresentar as atividades realizadas no contexto da cooperação INPE-CCRS na área teste do reservatório de Tucuruí. O capítulo 2 apresenta uma descrição da área de estudo, no capítulo 3 é apresentado um resumo da Missão SAREX 92 em Tucuruí, no capítulo 4 é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre a aplicação de dados de radar no estudo de ambientes aquáticos e regiões alagadas, no capítulo 5 é feita uma descrição da metodologia e no capítulo 6 são apresentados os resultados preliminares do projeto.

# FIRST REPORT OF THE SAREX-92 - TUCURUÍ PROJECT

## ABSTRACT

The objective of this report is to present the activities developed through the scientific cooperation between INPE and CCRS in the Tucuruí test site. The chapter 2 presents a description of the test site, chapter 3 describes the SAREX 92 mission, chapter 4 presents a brief bibliography review on radar principles, chapter 5 describes the methodology and chapter 6 presents the preliminary results of the project.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	vi
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - O RESERVATÓRIO DE TUCURUÍ .....	4
3 - A MISSÃO SAREX 92 NA ÁREA TESTE DE TUCURUÍ .....	8
4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
4.1 - Características Radiométricas das Imagens de Radar .....	23
4.2 - Interações entre Vegetação Aquática e Radiação de Microondas .....	27
5 - METODOLOGIA .....	40
6 - RESULTADOS PRELIMINARES .....	47
6.1 - Mapa de Referência .....	47
6.2 - O Número de Classes Mapeáveis .....	55
7 - CONCLUSÕES PRELIMINARES .....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Localização da área de estudo .....	5
2 - Região levantada durante a seleção da área do reservatório de Tucuruí a ser imageada pelo SAR-CCRS .....	11
3 - Localização das faixas imageadas na área teste de Tucuruí .....	15
4 - Áreas ocupadas por Floresta/Ocupação Humana .....	17
5 - Plantas aquáticas do gênero Scirpus, sp. ....	19
6 - Plantas aquáticas do gênero Pistia, sp. ....	19
7 - Plantas aquáticas do gênero Eichhornia, sp. ....	20
8 - Plantas aquáticas do gênero Salvinia, sp. ....	21
9 - Plantas aquáticas mistas .....	21
10 - Área com alta incidência de Paliteiros .....	22
11 - Espelho d'água .....	22
12 - Efeito do ângulo de incidência, polarização e comprimento de onda sobre o retroespalhamento de uma superfície lisa. (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p.1809) .....	31
13 - Efeito do ângulo de incidência, polarização e comprimento de onda sobre o retroespalhamento de uma superfície rugosa. (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p.1810) .....	32
14 - Efeito da umidade do solo sobre a profundidade de penetração da radiação de microondas (Adaptada de Elachi, 1987, p.172) .....	33
15 - Representação esquemática da variação da profundidade de penetração da radiação de microondas em um dossel composto por espalhadores orientados verticalmente, em função da direção de polarização em relação ao plano de incidência (Adaptada de Elachi, 1987, p.170) .....	35
16 - Contribuições do dossel e do substrato na composição do retroespalhamento (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p.1856) .....	36



17 - Efeito da densidade do dossel e do ângulo de incidência sobre o retroespalhamento (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p.1857) .....	38
18 - Coeficiente de retroespalhamento da cultura de alfafa em duas fases de crescimento .....	39
19 - Variação do índice de modulação do retroespalhamento com o tipo de polarização. (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p.1876) .....	40
20 - Mapa de Referência .....	50
21 - Mapa resultante da interpretação visual da imagem ERS-1 .....	67
22 - Mapa resultante da interpretação visual da imagem SAR C-HH .....	67

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Dados SAR obtidos sobre Tucuruí .....	16
2 - Classes mapeáveis definidas em trabalho de campo simultâneo à missão SAREX .....	18
3 - Chave de identificação desenvolvida para a confecção do Mapa de Referência .....	48
4 - Número de classes identificadas a partir da interpretação visual de diferentes produtos de sensoriamento remoto .....	55
5 - Área ocupada por polígonos comuns aos diferentes mapas .....	58
6 - Comparação da área total ocupada pelas diferentes classes resultantes da interpretação visual dos diferentes produtos de sensoriamento remoto .....	63
7 - Comparação dos dados para uma legenda simplificada	68

MFN= 008332

01 SID/SCD

02 5621

03 INPE-5621-RPR/190

04 SRE

05 S

06 as

16 Novo, Evlyn Marcia Leao de Moraes

16 Costa, Maycira Pereira de Farias

16 Noernberg, Mauricio Almeida

18 Primeiro relatorio do Projeto SAREX-92: Tucurui

20 64

40 Pt

41 Pt

41 En

42 <E>

58 DSR

59 PROJETO SAREX-92

62 INPE

64 <1995>

66 Sao Jose dos Campos

67 BR

68 PRP

83 O objetivo deste relatorio e o de apresentar as atividades realizadas no contexto da cooperacao INPE-CCRS na area teste do reservatorio de Tucurui. O capitulo 2 apresenta uma descricao da area de estudo, no capitulo 3 e apresentado um resumo da Missao SAREX 92 em Tucurui, no capitulo 4 e apresentada uma breve revisao bibliografica sobre a aplicacao de dados de radar no estudo de ambientes aquaticos e regioes alagadas, no capitulo 5 e feita uma descricao da metodologia e no capitulo 6 sao apresentados os resultados preliminares do projeto.

90 b

91 FDB-19990316

92 FDB-MLR

## 1 - INTRODUÇÃO

Assim como a década de 80 foi dominada por sensores orbitais operando na região óptica do espectro eletromagnético, a década de 90 se caracteriza pela disponibilidade de dados de sensores ativos na faixa das microondas.

A grande vantagem dos sensores de microondas em relação aos sensores ópticos é a possibilidade de imageamento independentemente das condições atmosféricas. Com isto, os dados de radar se tornam potencialmente úteis para estudos em regiões tropicais. Nestas regiões a elevada porcentagem de nuvens ao longo de todo o ano, torna bastante limitado o uso de dados do sistema Landsat ou SPOT. Na região de Tucuruí, por exemplo, os dados de satélite disponíveis sem cobertura de nuvens se limitam aos meses de junho, julho e agosto. Com isto, estudos voltados para a análise de aspectos sujeitos à variação sazonal ficam bastante comprometidos.

Em março de 1991, a antiga agência espacial soviética (Glavkosmos) lançou a bordo do satélite Almaz-1 com um radar de abertura sintética operando na banda S (10 cm), polarização HH, e ângulo de incidência selecionável entre 30 e 60 graus. A faixa imageada pelo sistema também variável entre 20 e 45 km, com resolução transversal entre 15 e 30 metros e azimutal de 15 metros.

Ainda, em julho de 1991, a European Space Agency (ESA) colocou em órbita o primeiro European Remote

Sensing Satellite (ERS-1) cuja carga útil incluiu o Active Microwave Instrument (AMI) o qual pode operar como um radar de abertura sintética (SAR). O ERS-1 é um satélite de sensoriamento remoto otimizado para aplicações oceanográficas mas tem sido utilizado com sucesso em aplicações terrestres. O SAR, a bordo do ERS-1, permite a obtenção de dados na banda C (5,66 cm) com polarização VV. Sua maior limitação para aplicações terrestres é o pequeno ângulo de incidência (23° no meio da faixa imageada). A largura de faixa imageada é de 100 km e a resolução espacial é de 25m x 25m.

O ERS-1 tem uma órbita polar, síncrona com o Sol, a uma altitude média de 785 km. O horário médio de cruzamento do Equador na órbita descendente (Norte - Sul) é às 10h30min, com um ciclo de recobrimento que pode variar entre 3 e 135 dias em função da opção de cobertura da superfície terrestre (amostral ou global).

A agência espacial japonesa (NASDA) também colocou em órbita em 1992 o satélite JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite) com dois sensores, o Optical Sensor (OPS) e o SAR operando na banda L (23,6 cm) e polarização HH. Ao contrário do AIS do ERS-1, o SAR desenvolvido pelos japoneses está voltado, prioritariamente, a aplicações geológicas. O ângulo de incidência da antena é de 35° e a largura da faixa imageada é de 75 km, com uma resolução azimutal e transversal(range) de 18 metros.

Embora com lançamento tardio em relação aos demais sensores ativos de microondas, o Canadian Centre

for Remote Sensing (CCRS) pretende colocar em órbita, em 1995, o RADARSAT cuja principal característica é a de adquirir imagens na faixa das microondas, de modo operacional, para atender diversas necessidades das diferentes áreas de aplicação de sensoriamento remoto, não contempladas pelos outros sensores (Ahern et al., 1990). A carga útil do satélite incluirá um Radar de Abertura Sintética (SAR), operando na banda C (5,66cm), com possibilidade de operar com ângulo de incidência entre 20° e 45°. A largura da faixa imageada pode variar entre 10 e 500 km, com resolução transversal e azimutal entre 10 e 100 m.

O RADARSAT será lançado segundo uma órbita polar, a uma altura em torno de 800 km, num período orbital de 104,2 minutos e uma inclinação de 99°5' em relação ao plano do Equador. O intervalo de recobrimento sobre uma mesma região do terreno será de 16 dias. O imageamento na faixa de microondas pode ser programado para diferentes ângulos de incidência e largura de faixa imageada, o que permite que uma mesma região possa ser imageada num intervalo de até três dias.

Embora existam diversos trabalhos que indiquem o potencial de aplicação dos dados de radar no levantamento de recursos naturais, é pequena a experiência acumulada neste campo, tendo em vista que o primeiro satélite levando a bordo um sistema RADAR (o SEASAT), em 1978, operou por tempo bastante limitado e os resultados apresentados na literatura, referentes aos sistemas lançados na década de 90, são, ainda, bastante preliminares.

Devido à grande quantidade e variedade de dados SAR disponíveis atualmente, tornou-se necessário um esforço de avaliação das características de complementariedade que os dados do RADARSAT possuem em relação aos demais sensores. Tendo em mente os aspectos anteriormente mencionados, o CCRS propôs ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a realização de uma campanha experimental de aquisição de dados com um sistema de SAR aerotransportado em áreas testes da Amazônia Brasileira, como parte da Missão SAREX 92 (Wooding et al., 1993).

O objetivo deste relatório é o de apresentar as atividades realizadas no contexto da cooperação INPE-CCRS, na área teste do reservatório de Tucuruí. O capítulo 2 apresenta uma descrição da área de estudo, no capítulo 3 é apresentado um resumo da Missão SAREX 92 em Tucuruí, no capítulo 4 é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre a aplicação de dados de radar no estudo de ambientes aquáticos e regiões alagadas, no capítulo 5 é feita uma descrição da metodologia e no capítulo 6 são apresentados os resultados preliminares do projeto.

## **2 - O RESERVATÓRIO DE TUCURUÍ**

A barragem de Tucuruí possui uma extensão de carga de 7,8km e uma altura máxima de cerca de 100m. A usina possui uma potência instalada de 4.000MW e uma previsão de expansão para 7.960MW até a finalização do empreendimento (Forattini et al., 1990).

Esta barragem encontra-se construída no rio Tocantins, Estado do Pará (Figura 1). A bacia do rio Tocantins se estende entre os paralelos de 2° e 18° de latitude sul e os meridianos de 46° e 55° de longitude oeste. 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, principal afluente do rio Tocantins.

O regime hidrológico da bacia é caracterizado por um período de cheias que ocorre entre fevereiro e abril e um período de vazões mínimas que ocorre entre setembro e outubro. As vazões médias do Tocantins na foz são da ordem de 11.000m<sup>3</sup>/s.

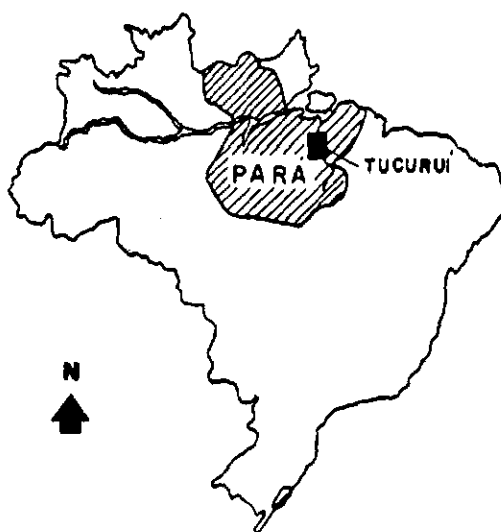


Figura 1 - Localização da Área de Estudo



As características hidrológicas do rio Tocantins determinaram em grande parte as características atuais do reservatório de Tucuruí.

O nível mínimo normal do reservatório é de 58m e o nível máximo normal é de 72m, em relação ao nível do mar. O reservatório de Tucuruí abriga um volume aproximado de água de cerca de 45 bilhões de metros cúbicos, inundando uma área estimada em 2.875km<sup>2</sup>. Estima-se que a profundidade máxima do reservatório esteja em torno de 72 metros e que a profundidade média seja de 18 metros. O tempo de residência hidráulica, dadas as características do reservatório, pode variar entre 20 e 500 dias (Pereira, 1990).

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

A oscilação do nível da água do reservatório afeta bastante sua margem esquerda devido ao pequeno gradiente dos seus afluentes. Oscilações de nível da ordem de centímetros já são suficientes para alterar a área inundada pelo reservatório, o que traz consequências para o ecossistema aquático.

Devido às dificuldades de acesso às margens em decorrência da ocupação por macrófitas, não se consegue avaliar corretamente o efeito que a oscilação de nível de água tem sobre a área inundada do reservatório.

Estas oscilações contribuem, também, para que a área ocupada por plantas aquáticas, ao longo do ano, seja bastante variável.

Em face da necessidade de se conhecer a área afetada por plantas aquáticas do reservatório da UHE de Tucuruí, em 1988 a ELETRONORTE e o INPE passaram a desenvolver trabalhos de cooperação científica visando o uso de imagens do satélite Landsat para o monitoramento das plantas aquáticas e da qualidade da água. Os resultados desses trabalhos encontram-se descritos em Abdon e Meyer (1990), Pereira (1990), Braga (1990), Pires e Novo (1991), Silva (1993), Steffen et al. (1993). A análise dos resultados destes trabalhos evidencia que a grande limitação dos dados é a sua baixa frequência de aquisição, em decorrência da cobertura de nuvens. Assim sendo, as informações disponíveis referem-se apenas ao período seco.

No contexto do projeto EOS (Earth Observation System) foram realizados trabalhos preliminares no sentido de se utilizar dados do sistema TM/Landsat para determinar o limite terra/água e definir a classe "espelho d'água" ("open water"), e a partir de diferentes limiares de corte de histograma, definir a área de transição sujeita à inundação periódica. Os resultados da utilização de dados do infra-vermelho próximo não permitiram uma delimitação precisa da fronteira terra/água. A menos que o efeito do alagamento seja tal que afete totalmente o espectro de reflexão da vegetação, não é possível delimitar as áreas alagadas sob a floresta (Novo e Tundisi, 1993). Outro aspecto que

prejudica a utilização de imagens TM na identificação do limite terra/água é a presença de "paliteiros" e de vegetação aquática flutuante. Assim sendo, diferentes limites do reservatório são obtidos para diferentes limiares de corte de histograma.

A literatura de sensoriamento remoto recomenda o uso de sistemas radares de abertura sintética para a identificação de áreas de floresta inundada devido aos seguintes aspectos: 1) maior penetração da radiação de microondas em relação à da radiação infra-vermelha, o que permite atingir o substrato da floresta e o solo; 2) sensibilidade da radiação de microondas às diferenças entre as constantes dielétricas da água (elevada) e as do solo/vegetação (baixa).

### **3 - A MISSÃO SAREX 92 NA ÁREA TESTE DE TUCURUÍ**

A missão SAREX-92 forneceu a primeira oportunidade para o estudo científico do comportamento de alvos tropicais na banda C. Esta banda estará amplamente disponível em sistemas orbitais operacionais de radar conforme visto anteriormente.

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 infra-vermelho próximo. Os resultados da missão também permitiriam determinar as melhores configurações de aquisição de

dados de sistemas SAR a serem colocados a bordo de satélites programados para lançamento até o fim desta década. O sistema C/X SAR de propriedade do Canadian Centre for Remote Sensing (CCRS) possibilitou a aquisição de imagens SAR de alta qualidade em diferentes configurações de modo a permitir que os usos potenciais e as características de sistemas orbitais futuros pudessem ser exploradas.

O sistema C/X SAR-CCRS é um sistema de frequência dupla e polarização múltipla que opera a partir de um avião Convair 580. Durante a missão SAREX 92 o avião operou a uma altura de 6 km e três modos de operação selecionáveis: NADIR (largura da faixa imageada igual a 22 Km), (NARROW SWATH) FAIXA ESTREITA (largura da faixa imageada igual a 18 Km), (WIDE SWATH) FAIXA LARGA (largura da faixa imageada igual a 63 km). No modo NADIR foram obtidas imagens de alta resolução (6m x 6m) com ângulos de incidência variando entre 20 e 74 graus. No modo FAIXA ESTREITA foram adquiridas imagens de alta resolução (6m x 6m), com ângulos de incidência entre 45 e 76 graus. No modo FAIXA LARGA as imagens foram obtidas com resolução mais baixa (10m x 20m) e com ângulos de incidência variando entre 45 a 85 graus.

Durante a missão SAREX 92 os dados foram processados com um processador que permitiu a obtenção de imagens digitais com 7 looks e também quick-looks em papel (Wooding et al., 1993).

Tendo em vista todas as possibilidades de aquisição de dados proporcionadas pelo SAR/CCRS, o

objetivo específico da missão em Tucuruí foi o de avaliar o uso de dados SAR aerotransportado operando na banda C para: 1) identificar o limite do reservatório em regiões infestadas por plantas aquáticas; 2) delimitar a superfície da água de reservatórios artificiais em regiões de florestas; 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; 6) diferenciar espécies de macrófitas flutuantes.

O projeto SAREX-Tucuruí pode ser dividido em três fases: a da preparação para a missão durante o ano de 1991, a da missão SAREX-92 em abril de 1992, e a do processamento e análise dos dados obtidos durante a missão a partir de 1993.

A preparação para a missão pode ser dividida também em duas fases. Na primeira fase, foi realizado um trabalho de campo na região de Tucuruí, área a ser recoberta pelos dados SAR.

A missão de campo realizada entre 18 e 20 de novembro de 1991 teve como objetivo identificar, claramente, os tipos de alvos a serem imageados pelo SAR-CCRS e avaliar o tipo de "dados de verdade terrestre" necessários para apoiar a interpretação das imagens de RADAR.

A missão de campo consistiu da realização de 02 transectos de barco e 02 transectos por terra. (Figura 2)

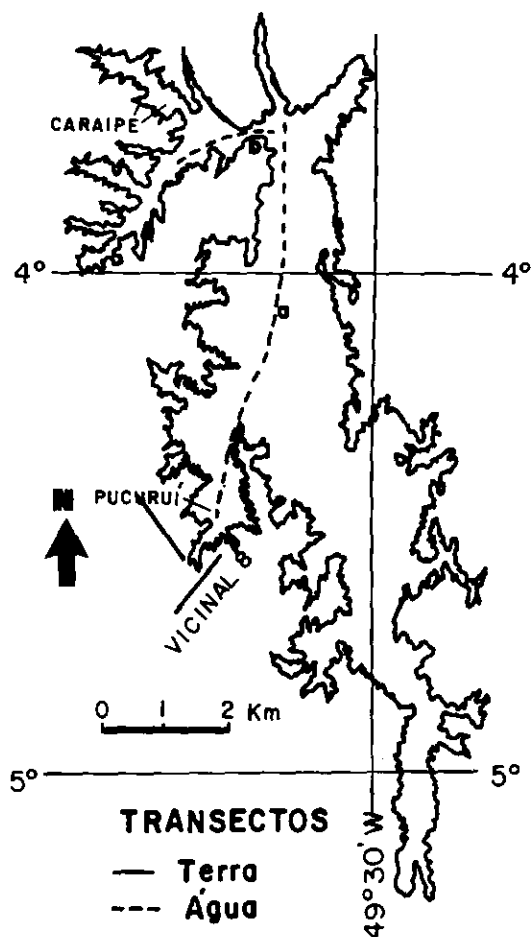


Figura 2 - Região levantada durante a seleção da área do reservatório de Tucuruí a ser imageada pelo SAR-CCRS.

O transecto do rio Caraipé permitiu verificar que trata-se de uma área de reservatório em que os limites terra/água foram muito bem definidos e que não ofereciam, em princípio, dificuldades para sua identificação precisa a partir do uso de sensores óticos.

A navegação ao longo do transecto do rio Pucuruí ficou bastante dificultada devido ao baixo nível do reservatório. Não foram encontrados bancos de macrófitas expressivos, os quais passaram a ocorrer,

somente, numa faixa a cerca de 1km da antiga rodovia Transamazônica. Os bancos encontrados eram de aproximadamente 30cm de altura, e os gêneros dominantes eram o *Scirpus sp* e a *Salvinia sp.*, ou seja, os mesmos já mapeados por Abdon e Meyer (1991), só que restritos a uma área menor.

O transecto pela vicinal 8 permitiu constatar que toda a área ocupada pelo lago, ao longo do rio Pucuruí, desde a ponte nova da rodovia Transamazônica até cerca de 1km para o interior do lago, se encontrava seca.

O transecto pela margem do rio Pucuruí apresentou condições semelhantes ao da vicinal 08. Até cerca de 300 metros da ponte sobre o Pucuruí, a vegetação das margens encontrava-se queimada e o rio correndo em seu leito menor. Observaram-se os antigos bancos de macrófitas já secos e o nível da água mais constante marcado nos troncos emersos. A partir de 300 metros à jusante da ponte começam aparecer bancos secos de macrófitas flutuantes, com predomínio da *Eichhornia sp.*

Durante a missão de campo foi constatada a grande dificuldade de acesso e localização de alguns tipos de alvos por terra e/ou por água. Devido às grandes distâncias envolvidas, o tempo gasto para se chegar a área teste por barco é de cerca de 2 horas. Por terra este tempo é de 2 horas até a ponte sobre o rio Pucuruí, havendo ainda a necessidade de caminhadas que envolvem distâncias superiores a 3 km pela mata ou pelas margens do reservatório, em região alagável ou pantanosa.

A falta de cartografia de detalhe da área (mapas desatualizados) e sua complexidade (devido ao nível variável do reservatório) tornam difícil a localização exata dos alvos de interesse nos percursos terrestres e/ou aquáticos.

Tendo em vista os objetivos do projeto e o conhecimento disponível sobre as interações da radiação de microondas com os alvos de interesse, foram propostos os seguintes modos de aquisição: 1) Faixa Nadir, Faixa Estreita e Faixa Larga; 2) três linhas de vôo no modo Faixa Estreita, com o centro da linha posicionado tal que a área de interesse fosse imageada segundo os ângulos de incidência de 15°, 25° e 45° aproximadamente.

Teoricamente, os ângulos menores permitiriam maior penetração no dossel da floresta, enquanto os ângulos maiores permitiriam realçar diferenças na rugosidade da superfície da água, provocadas pela presença de vegetação aquática de diferentes espécies, paliteiros de diferentes densidades, e com espécies dominantes. Os dados seriam adquiridos em diferentes polarizações (HH, VV e HV) para realçar a lâmina d'água sob a floresta (HH) e para permitir discriminar espécies de macrófitas com arranjo vertical de folhas (VV). A aquisição de dados HV permitiria obter-se composições multipolarizadas.

Em virtude das dificuldades anteriormente apontadas, definiram-se as seguintes necessidades de suporte de campo: - recobrimento aerofotográfico simultâneo ao sobrevôo do SAR; - sobrevôo com helicóptero



nas áreas inacessíveis para reconhecimento dos gêneros dominantes nos maiores bancos de vegetação aquática; - transectos de barco e por terra com o apoio de Ground Positioning System (GPS), para auxiliar na localização dos pontos amostrais.

A segunda fase da preparação da Missão SAREX consistiu do planejamento do aerolevanteamento sobre Tucuruí, da definição de escala das fotografias aéreas e da viabilização da equipe e infra-estrutura necessária.

Durante a missão SAREX-92 o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais deslocou para Tucuruí uma equipe composta de 07 técnicos. As Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (ELETRONORTE) forneceram todo o suporte logístico para a missão, o qual consistiu da cessão de barcos, viaturas e horas de sobrevôo com helicóptero. A ELETRONORTE também forneceu suporte técnico ao trabalho, cedendo funcionários para auxiliar na tarefa de identificação de espécies de vegetação flutuante.

No dia 14 de abril de 1992, foram recobertas 05 faixas com o CCRS SAR 580 C - band System, conforme figura 3. Cópias de quick-looks resultantes do sobrevôo foram, então, interpretadas e feita uma seleção preliminar de pontos de amostragem para verificação de campo. As características dos dados SAR obtidos em Tucuruí encontram-se resumidas na Tabela 1.

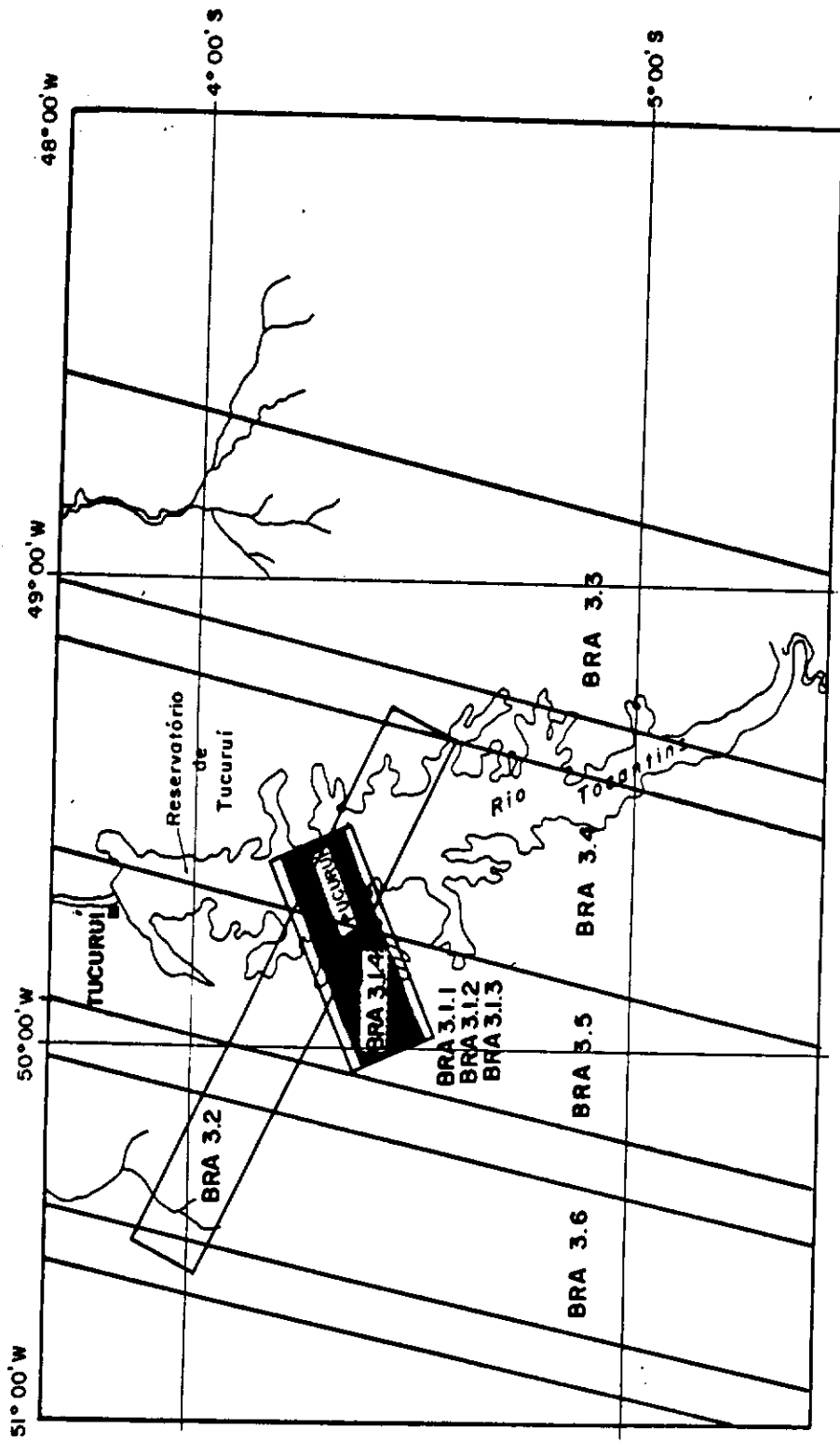


Figura 3 - Localização das faixas imageadas na área teste de Tucuruí.

Tabela 1 - Dados SAR obtidos sobre Tucuruí

MODO	POLARIZAÇÃO	DIREÇÃO DO VÔO	RESOLUÇÃO	ÂNGULO DE DEPRESSÃO
Nadir	HH	Paralelo à órbita do ERS-1	6m Range 6m Azimute	16° a 74°
Nadir	VV	Paralelo à órbita do ERS-1	6m Range 6m Azimute	16° a 74°
Nadir	HH	NW-SW orientação do voo	6m Range 6m Azimute	16° a 74°
Nadir	HV	NW-SW orientação do voo	6m Range 6m Azimute	16° a 74°
Nadir	VV	NE-SW orientação do voo	6m Range 6m Azimute	16° a 74°
Nadir	VH	NE-SW orientação do voo	6m Range 6m Azimute	16° a 74°
Narrow	VV	NE-SW orientação do voo	6m Range 6m Azimute	14° a 45°
Narrow	HH	NE-SW orientação do voo	6m Range 6m Azimute	14° a 45°
Wide	HH	Orientação da órbita do ERS-1	20m Range 10m Azimute	5° a 45°
Wide	VV	Orientação da órbita do ERS-1	20m Range 10m Azimute	5° a 45°

Foram realizados dois sobrevôos com helicóptero ao longo dos braços do Tucuruí e Repartimento. Durante o sobrevôo foram obtidas fotografias 35 mm e feitas gravações com uma filmadora SONY para registrar as características dos pontos amostrados em termos de: densidade e altura da vegetação, grau de uniformidade dos bancos, espécies

dominantes etc. O avião Bandeirantes do INPE fez o aerolevante de uma faixa ao longo do braço do Pucuruí, permitindo a aquisição de fotografias aéreas coloridas na escala 1:10.000.

Foram também determinadas com o receptor GPS as coordenadas de pontos amostrais durante um transecto de barco. Estes pontos amostrais foram fotografados com o objetivo de auxiliar a interpretação das imagens SAR e para avaliar o efeito do tipo de vegetação aquática sobre a demarcação do limite terra/água. Ainda, as informações foram sistematizadas num mapa com a distribuição espacial dos alvos identificados no campo. As classes potencialmente mapeáveis encontram-se descritas na Tabela 2.



Figura 4 - Áreas ocupadas por Floresta/Ocupação Humana

Tabela 2 - Classes mapeáveis definidas em trabalho de campo simultâneo à missão SAREX.

CLASSE TEMÁTICA	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS
Floresta/Ocupação Humana	Áreas ocupadas por floresta primária, regeneração, pastagens, culturas, extrativismo vegetal. (Figura 4)
<i>Scirpus, sp.</i>	Áreas com predomínio de <i>Scirpus, sp.</i> em diferentes estágios fenológicos, e espécies, e com ocorrência de bancos esparsos de outros gêneros de plantas aquáticas. (Figura 5)
<i>Pistia, sp.</i>	Áreas com predomínio do gênero <i>Pistia, sp.</i> . Bancos pequenos, de 50 m x 50 m de extensão em média, associados a ocorrências de <i>Scirpus, sp.</i> (Figura 6).
<i>Eichhornia, sp.</i>	Áreas com predomínio do gênero <i>Eichhornia, sp.</i> . Bancos alongados, estreitos, com plantas de até 30 cm de altura. Os bancos são densos, compactos e acompanham o setor mais profundo do braço do reservatório, com baixa densidade de paliteiros. (Figura 7)
<i>Salvinia, sp.</i>	Áreas com bancos homogêneos de <i>Salvinia, sp.</i> , localizadas na periferia dos bancos de <i>Scirpus, sp.</i> e nos braços mais próximos às nascentes dos braços da represa. (Figura 8)
Vegetação Aquática Mista	Áreas com bancos heterogêneos em que se misturam diversos gêneros tais como o <i>Scirpus, sp.</i> ; <i>Ninpha, sp.</i> ; <i>Typha, sp.</i> ; <i>Montrichardia, sp.</i> . (Figura 9)
Paliteiro	Áreas com elevada densidade de troncos de árvores mortas, sem ou com baixa densidade de plantas aquáticas associadas. (Figura 10)
Espelho d'água	Superfície d'água sem alta densidade de paliteiros e/ou plantas aquáticas. (Figura 10)



Figura 5 - Plantas aquáticas do gênero *Scirpus*, sp.

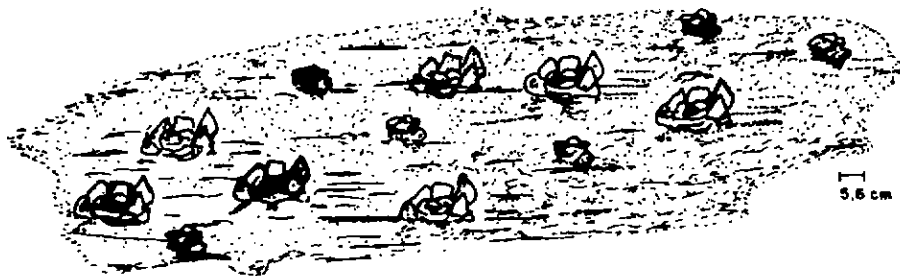


Figura 6 - Plantas aquáticas do gênero *Pistia*, sp.

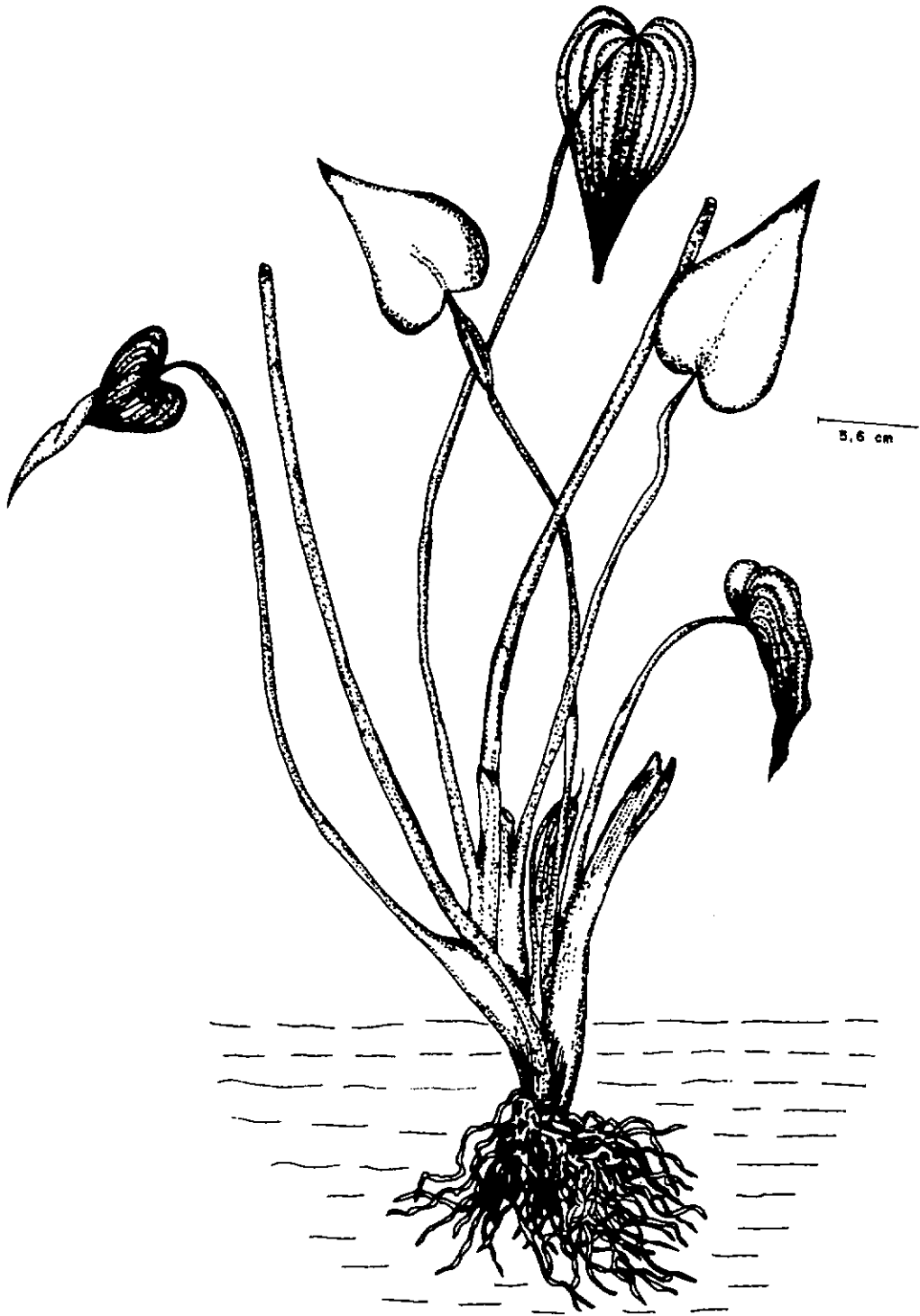


Figura 7 - Plantas aquáticas do gênero *Eichhornia*, sp.

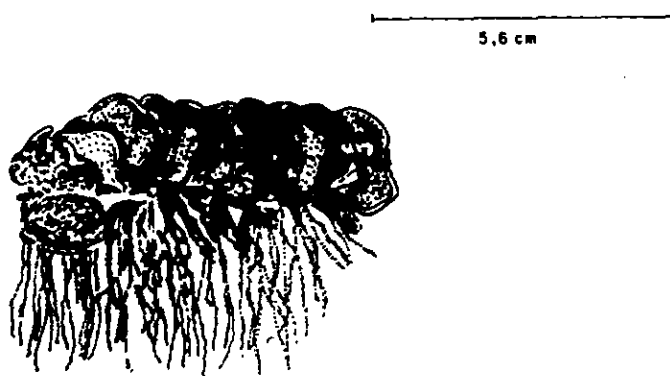


Figura 8 - Plantas aquáticas do gênero *Salvinia*, *sp.*



Figura 9 - Plantas Aquáticas Mistas



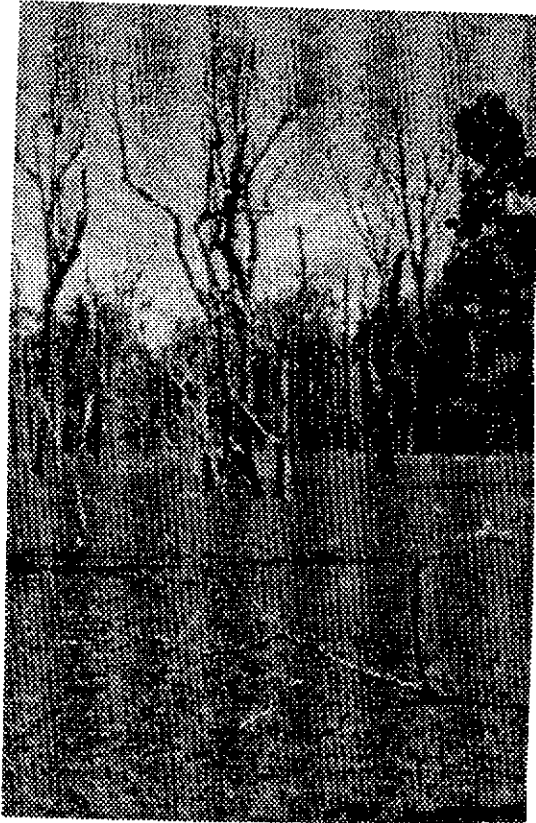


Figura 10 - Área com alta incidência de Paliteiros.

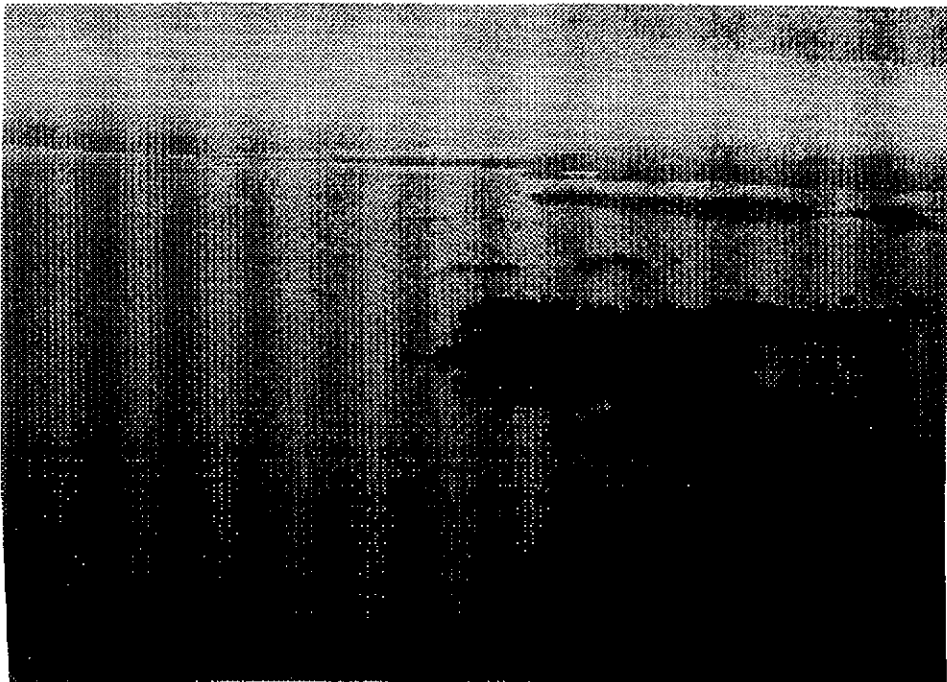


Figura 11 - Espelho d'água.

## 4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 - Características Radiométricas das Imagens de Radar

O nível digital ou a intensidade de um dado pixel de uma imagem de Radar é proporcional à seção transversal do espalhamento ( $\sigma$ ) da área imageada. A seção transversal de espalhamento é definida como a razão entre a energia recebida pelo sensor e a energia teoricamente produzida por um difusor isotrópico. Esta grandeza é tipicamente expressa em decibéis (dB) que é dado por:

$$\sigma = 10 \log (E_a/E_i) \quad (1)$$

onde,  $\sigma$  é a seção transversal de espalhamento,  $E_a$  é a energia proveniente do alvo e  $E_i$  a energia proveniente do difusor isotrópico.

Existem diferentes tipos de forma de apresentação dos dados de radar ou tipos de detecção da energia retroespalhada do alvo. Se o radar se caracteriza por uma forma linear de detecção, a voltagem  $V$  correspondente a um dado pixel  $(x,y)$  no terreno pode ser expressa como:

$$V = k_1 f_{1(x,y)} [\sigma_{(x,y)}]^{1/2} \quad (2)$$

onde  $k_1$  é uma constante do equipamento,  $f_{1(x,y)}$  é um fator de perda por propagação para a célula localizada em  $(x,y)$ .

O valor de  $\sigma_{(x,y)}$  é relacionado ao coeficiente de retroespalhamento médio do pixel  $\sigma^{\circ}_{(x,y)}$  tal que

$$\sigma_{(x,y)} = \sigma^{\circ}_{(x,y)} A_{(x,y)} \quad (3)$$

onde  $A_{(x,y)}$  é a área imageada definida pela resolução azimutal e transversal do sensor.

Se o tipo de detecção utilizada pelo sistema radar é quadrática, o valor registrado,  $V$ , é dado por:

$$V = k_2 f_2(x,y) \sigma^{\circ}_{(x,y)} \quad (4)$$

onde  $k_2$  e  $f_2$  são constantes do equipamento.

A transformação da voltagem  $V$  medida pela antena em nível digital (ND) pode ser realizada de modo uniforme ou não uniforme. As transformações mais comuns são a raiz quadrática e a logarítmica.

A amplitude do sinal registrado pelo radar é dada pela razão entre a máxima e mínima voltagem detectada pela antena. Geralmente, esta amplitude é expressa em dB e é definida como:

$$R_s = 20 \log (V_{\max} / V_{\min}) \quad (5)$$

onde  $R_s$  é a amplitude (range dinâmico) e  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$  as voltagens máxima e mínima registradas pelo sensor.

Diferentes tipos de imagens podem ser obtidas em função do nível de processamento do sinal detectado pelo sistema radar. A imagem bruta (raw image) é aquela em que o nível digital corresponde à voltagem recebida pela antena, sem nenhum tipo de correção do sinal detectado. Quando o fator de perda por propagação (propagation loss factor) da energia entre a antena e o alvo é conhecido, ele pode ser removido, dando origem a uma imagem em que o nível digital é proporcional à seção transversal de retroespalhamento relativa, ou seja,

$$ND \sim \sigma(x, y) \quad (6)$$

ou

$$ND \sim \sigma(x, y)^{1/2} \quad (7)$$

onde, **ND** é o nível digital da imagem, para um receptor linear ou quadrático, respectivamente.

Esta imagem relativa, pode ser transformada em uma imagem em que cada ponto da cena é proporcional ao coeficiente de retroespalhamento relativo quando se remove a dependência do sinal em relação à sua localização na cena. Este tipo de imagem é considerada uma imagem com calibração relativa e permite a comparação dos objetos da cena em termos de sua interação com a radiação de microondas.

A imagem com calibração relativa pode ser transformada em uma imagem em que cada **ND** é proporcional ao coeficiente de retroespalhamento, se for submetida à calibração absoluta. Neste tipo de imagem, o **ND** de cada

pixel corresponde ao valor absoluto da energia retroespalhada por aquele pixel.

Uma imagem de radar processada é caracterizada geralmente por uma resolução azimutal ( $R_a$ ) e uma resolução transversal ou de range ( $R_g$ ) e um número de amostras independentes (ou número de looks),  $N$ . A cada instante, o pulso de radar ilumina uma certa área da superfície que é composta de vários espalhadores individuais. O sinal de retorno detectado pela antena representa, portanto, a adição coerente do sinal de retorno de um grande número de espalhadores. Os sinais de retorno produzidos pelo terreno, em cada célula de resolução são adicionados vetorialmente e resultam num único vetor representado pela amplitude  $V$  e pela fase  $\phi$ . A fase  $\phi$  de cada vetor elementar encontra-se relacionada à distância entre o sensor e o ponto espalhador correspondente. Quando o sensor se desloca ao longo da linha de vôo, todas as fases  $\phi$  se modificam, levando a uma modificação na amplitude composta  $V$ . Deste modo, observações sucessivas de um mesmo ponto da superfície resultaram em diferentes valores de  $V$ . Esta modificação do sinal de retorno de um mesmo alvo, em função do deslocamento da plataforma, é chamado "fading". Assim sendo, para se caracterizar o coeficiente de retroespalhamento de uma dada área da superfície terrestre, tornam-se necessárias várias medidas, as quais serão posteriormente utilizadas para a determinação do valor médio de  $\sigma^0$ . Devido, portanto, à natureza do processo de formação da imagem de radar, a voltagem recebida, correspondente a uma dada célula do terreno, pode fornecer apenas uma estimativa da média de seu

coeficiente de retroespalhamento. A incerteza associada a esta estimativa é determinada por **N**. Esta mesma incerteza faz com que uma imagem de uma superfície homogênea apresente variações de brilho de um pixel para outro. A estas variações de brilho entre pixels de um alvo homogêneo dá-se o nome de **speckle** (Ulaby et al., 1986). A ocorrência de **speckle** pode ser reduzida aumentando-se **N**, e para qualquer que seja o tipo de detecção (linear ou quadrática), pode-se demonstrar que o coeficiente de variação do sinal recebido pela antena é proporcional a  $N^{-1/2}$ .

Em termos práticos, o aumento de **N** representa uma redução na resolução espacial, o que significa que sempre haverá um compromisso entre a interpretabilidade da imagem e a resolução espacial.

#### **4.2 - Interações entre Vegetação Aquática e Radiação de Microondas.**

Existem vários parâmetros que afetam o coeficiente de retroespalhamento detectado por um sistema radar. Estes parâmetros podem ser classificados, didaticamente, em parâmetros relacionados ao sistema de aquisição das imagens e parâmetros relacionados à superfície imageada.

Dentre os parâmetros relacionados ao sistema de aquisição destacam-se: - o comprimento de onda da radiação de microondas, - o ângulo de incidência do feixe de radiação ( $\theta$ ) em relação à incidência normal, - a polarização da onda transmitida e/ou recebida e o ângulo azimutal de incidência ( $\phi$ ) quando o alvo é espacialmente

periódico (culturas agrícolas com espaçamento constante, por exemplo). Dentre os parâmetros relacionados com as superfícies imageadas, os principais fatores controladores do retroespalhamento são a rugosidade, a umidade e o arranjo espacial.

Face a isto, o problema geral das pesquisas na faixa de microondas tem sido o de selecionar os parâmetros de aquisição mais favoráveis ao realce das características da cena. No caso particular das plantas aquáticas, o problema se resume às interações entre a radiação de microondas e dosséis de vegetação com diferentes arquiteturas, cujo substrato é a água. As características da cena que se deseja avaliar são os gêneros de plantas aquáticas, a biomassa verde, a densidade de paliteiros, a extensão das áreas ocupadas por plantas aquáticas etc.

Um dossel de plantas aquáticas pode ser entendido como um volume de espalhadores delimitado por duas superfícies: - a superfície de contato entre a vegetação e o ar e a superfície de contato entre a vegetação e a água. Estas superfícies de contato podem ser lisas ou rugosas em função de fatores tais como vento, densidade do dossel etc.

A literatura sobre interações entre a radiação de microondas e os dosséis de vegetação, na sua maioria, se limita ao estudo de vegetação terrestre e mais especificamente culturas agrícolas (Ulaby et al., 1986). A presença da água como substrato, no caso específico das plantas aquáticas, pode introduzir

modificações no comportamento do retroespalhamento dos dosséis, principalmente no caso em que estes apresentam baixa densidade e altura, ou seja, quando podem ser atravessados pela radiação e interagir diretamente com a água.

Independentemente do substrato (água ou solo), existem certos fatores que afetam o comportamento do retroespalhamento dos dosséis de vegetação. Estes fatores incluem a constante dielétrica da vegetação, que é fortemente afetada pela umidade. Com isto, pode-se admitir que as plantas aquáticas apresentam maior constante dielétrica que as plantas terrestres, pois, via de regra, tendem a possuir um maior teor de umidade. Como o conteúdo de umidade das plantas aquáticas pode variar de espécie para espécie, seu retroespalhamento também pode apresentar variações.

Outros fatores que afetam o retroespalhamento pelos dosséis de vegetação são o tamanho, a forma e a orientação de seus componentes: folhas, galhos etc, em relação ao comprimento de onda da radiação de microondas. No caso das plantas aquáticas o tamanho das folhas pode variar de 1 cm, no caso da *Salvinia, sp.*, até 15 cm, no caso da *Eichhornia, sp.*. A forma das folhas também é bastante variável, havendo gêneros, como o *Scirpus, sp.* e *Typha, sp.*, que apresentam folhas estreitas (1 e 2 cm, respectivamente) e longas (1 e 2m, respectivamente) e outros em que as folhas tendem a um formato ovalado ou circular, como a *Eichhornia, sp.* e a *Pistia, sp.*.



A geometria do dossel, que inclui aspectos como espaçamento, direção de alinhamento dos bancos em relação à direção de imageamento e porcentagem de cobertura do substrado, também interfere na magnitude do retroespalhamento.

A Figura 12 ilustra como as interações entre estes diferentes parâmetros do sistema de aquisição podem afetar o retroespalhamento quando a interface com o dossel é uma superfície lisa. O eixo  $y$  representa a variação do coeficiente de retroespalhamento e o eixo  $x$  a variação do ângulo de incidência da radiação. Cada curva representa uma dada combinação de polarização da onda transmitida e recebida pela antena. A análise da figura permite verificar que: - em qualquer comprimento de onda as polarizações HH e VV são idênticas para ângulos de incidência até  $\theta=10^\circ$ ; - para ângulos maiores que  $10^\circ$ , o retroespalhamento diverge e os valores da polarização vertical (VV) tornam-se sempre maiores que os da polarização horizontal (HH).

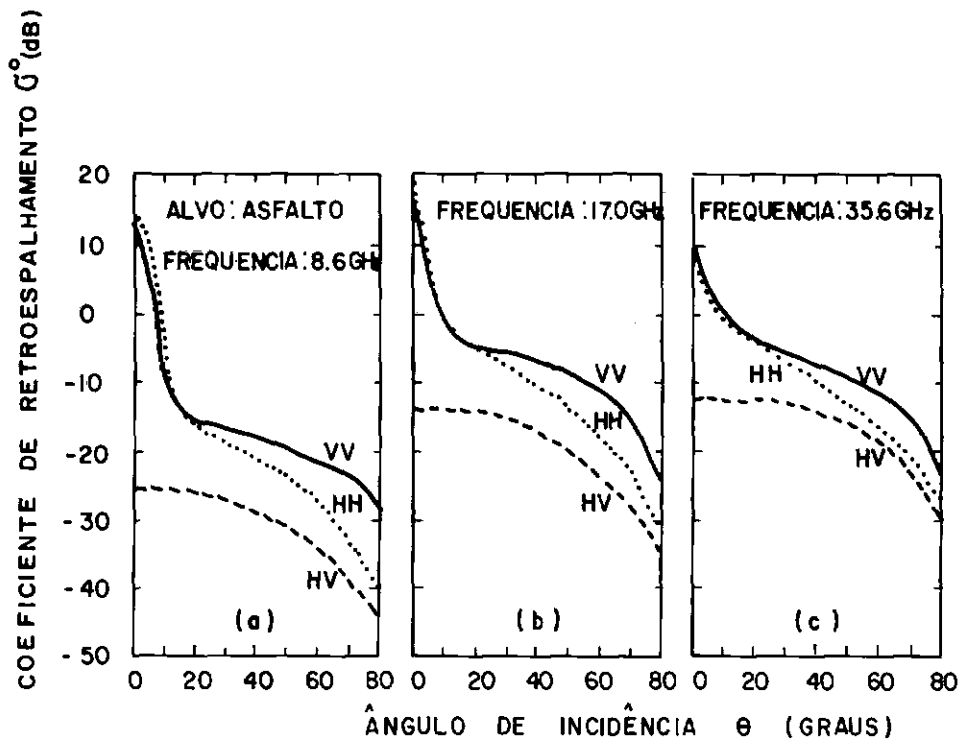


Figura 12 - Efeito do ângulo de incidência, polarização e comprimento de onda sobre o retroespalhamento de uma superfície lisa. (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p.1809).

O comportamento das superfícies rugosas é ilustrado pela Figura 13. Pode-se verificar que as diferenças entre as polarizações são menores para as superfícies rugosas, o que indica que quanto maior a rugosidade da superfície, maior o seu poder de despolarização da radiação.

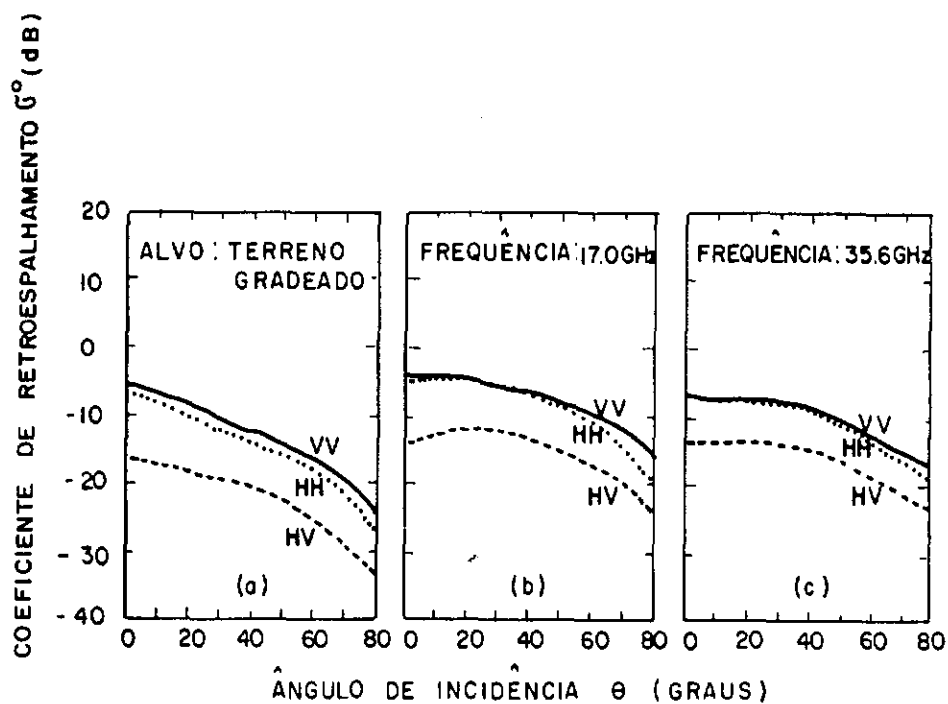


Figura 13 - Efeito do ângulo de incidência, polarização e comprimento de onda sobre o retroespalhamento de uma superfície rugosa. (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p.1810).

O comprimento de onda da radiação incidente tem um efeito fundamental em seu grau de penetração, definindo, portanto, até que ponto o coeficiente de espalhamento será determinado pela interação com a superfície do alvo ou com o seu volume. O grau de penetração da radiação é também diretamente proporcional à razão  $\lambda/\tan \delta$  em que  $\lambda$  é o comprimento de onda, e  $\tan \delta$  é a tangente de perda do meio, a qual varia com a umidade da superfície (Ulaby et al., 1986). Assim sendo, o pulso

emitido pela antena na banda L (comprimento de onda de 24 cm) tem capacidade de penetrar cerca de 10 vezes mais profundamente numa dada superfície do que aquele emitido na banda  $K_u$  (2 cm).

A Figura 14 mostra o efeito da umidade sobre a profundidade de penetração. Independentemente do comprimento de onda da radiação, há uma diminuição da profundidade de penetração com o aumento da umidade do solo, mantidos outros parâmetros constantes.

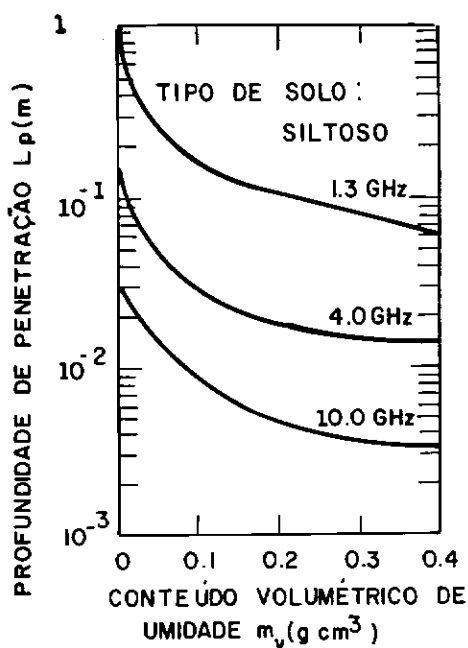


Figura 14 - Efeito da umidade do solo sobre a profundidade de penetração da radiação de microondas (Adaptada de Elachi, 1987, p.172).

Mantendo-se fixo o comprimento de onda do pulso emitido pela antena, a profundidade de penetração da radiação poderá ser afetada também pela polarização. A Figura 15 mostra, esquematicamente, o efeito da polarização sobre a profundidade de penetração de um pulso em um dossel caracterizado pela presença de folhas que se comportam, teoricamente, como pequenos espalhadores verticais. Neste caso, a onda polarizada horizontalmente tenderá a não interagir com o dossel e apresentará uma maior profundidade de penetração, podendo interagir com o solo. O sinal de retorno representará, portanto, o retroespalhamento proveniente do solo. No caso de uma onda polarizada verticalmente, haverá uma forte interação da radiação com o dossel, havendo maior atenuação da radiação pela vegetação e conseqüente redução de sua profundidade de penetração. Com isto, o sinal de retorno para a antena representará o retroespalhamento produzido predominantemente pelo dossel.

Como já anteriormente mencionado, a magnitude do retroespalhamento produzido por um dossel depende da forma, orientação e espessura de seus componentes (folhas, galhos, frutos etc). Quando os elementos que compõem o dossel são orientados aleatoriamente (sem uma direção preferencial), o coeficiente de retroespalhamento se torna mais dependente do ângulo de incidência, tornando-se praticamente independente da polarização. Independentemente da geometria específica do dossel, entretanto, pode-se admitir que o aumento do ângulo de incidência da onda determina uma menor capacidade de penetração da radiação

no dossel, reduzindo o efeito do substrato da vegetação (solo ou água, por exemplo) sobre o seu retroespalhamento. Portanto, quanto maior o ângulo de incidência, maior o efeito do dossel sobre o retroespalhamento, qualquer que seja a sua configuração, e conseqüentemente, menor a probabilidade de se utilizar o valor do retroespalhamento como parâmetro discriminador dos diferentes tipos de vegetação.

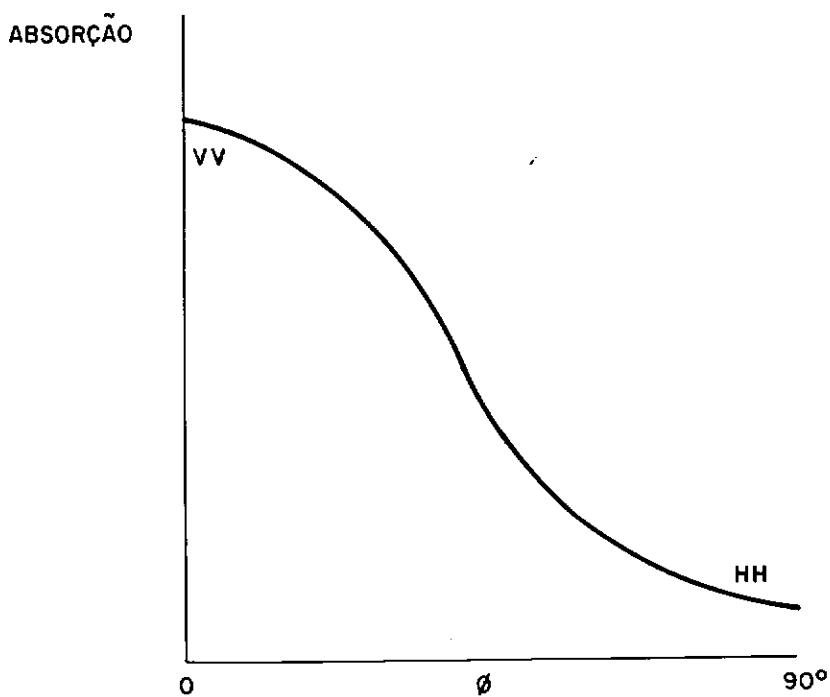


Figura 15 - Representação esquemática da variação da profundidade de penetração da radiação de microondas em um dossel composto por espalhadores orientados verticalmente, em função da direção de polarização ( $\phi$ ) em relação ao plano de incidência (Adaptada de Elachi, 1987, p. 170)

A Figura 16 ilustra as possíveis interações que um dossel, com baixo coeficiente de espalhamento, pode ter com a radiação de microondas. A frente da onda eletromagnética pode atingir um dos componentes do dossel (folha) e ser retroespalhada para a antena (retroespalhamento direto). A onda pode atravessar o dossel e atingir o substrato, sendo por ele retroespalhada, fazendo com que a onda seja duplamente atenuada. Finalmente, a onda pode sofrer interações diversas e sofrer espalhamento múltiplo dentro do dossel e na interface entre o substrato e o dossel.

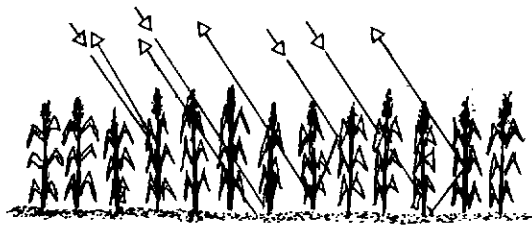


Figura 16 - Contribuições do dossel e do substrato na composição do retroespalhamento (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p.1856).

A Figura 17 permite comparar a contribuição dos diferentes componentes do retroespalhamento de um dossel cujo substrato é um solo úmido com elevada constante dielétrica. Os dosséis se diferenciam em termos

de sua espessura ótica ( $\tau$ ) e do seu coeficiente de espalhamento ( $a$ ). Pode-se verificar que nos dosséis menos densos o retroespalhamento total ( $\sigma_d^0$ ) diminui rapidamente com o ângulo de incidência, e que o termo ( $\sigma_{sv}^0$ ), que indica as interações com o substrato e o dossel de vegetação, só é significativo com ângulos de incidência maiores que  $20^\circ$  e quando o dossel é pouco difusor.



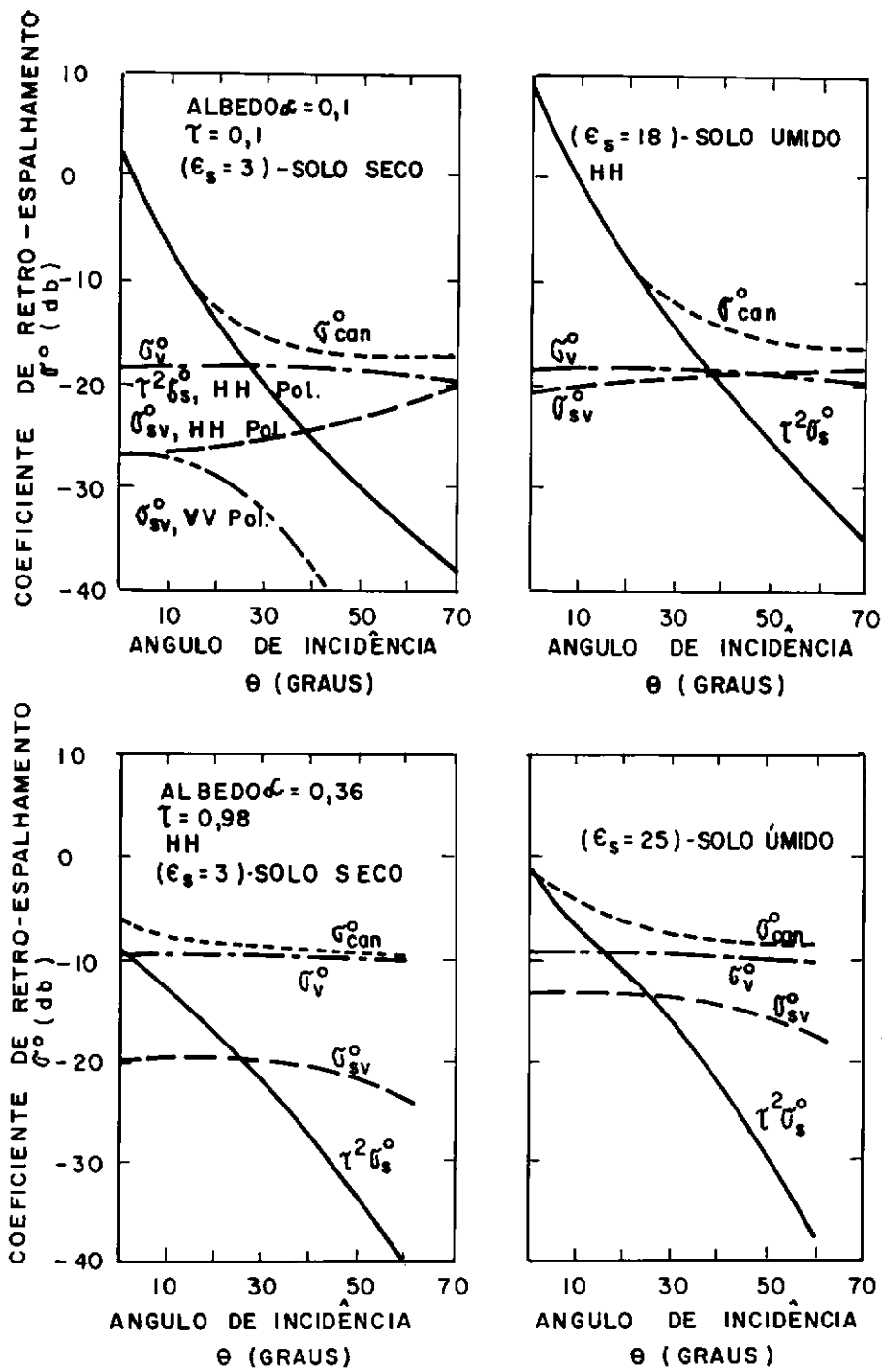


Figura 17 - Efeito da densidade do dossel e do ângulo de incidência sobre o retroespalhamento (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p. 1857).

Estes resultados de modelagem são bastante semelhantes a resultados experimentais obtidos para a cultura de alfafa em dois estágios de crescimento (Figura 18) mantendo-se praticamente constante a umidade do solo. No início do crescimento da alfafa, o retroespalhamento é fortemente modulado pelo ângulo de incidência, indicando a interação com o substrato. Na fase final, quando a cultura é mais espessa, o retroespalhamento torna-se pouco afetado pelo ângulo de incidência.

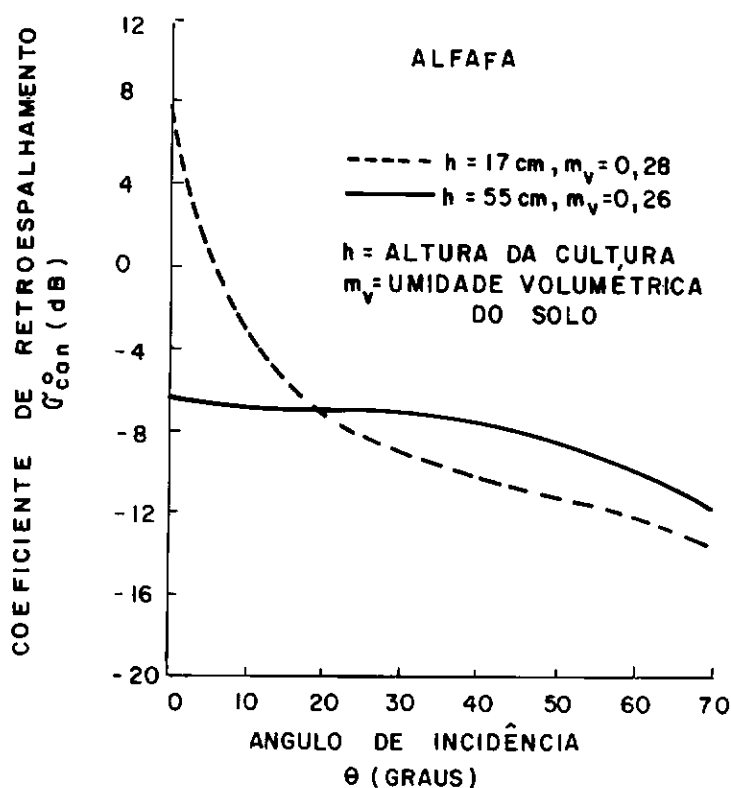


Figura 18 - Coeficiente de retroespalhamento da cultura de alfafa em duas fases de crescimento.

Diversos estudos também foram feitos para se avaliar o efeito da direção de imageamento sobre o retroespalhamento dos dosséis de vegetação. O valor  $M$  (Figura 19) representa a razão entre o retroespalhamento

do dossel quando observado a um ângulo de  $90^\circ$  em relação à direção das fileiras da cultura e o retroespalhamento do dossel medido a um ângulo de  $0^\circ$  em relação à direção das fileiras. A análise da Figura 19 permite verificar que o efeito da direção de imageamento é desprezível quando se utiliza a polarização cruzada.

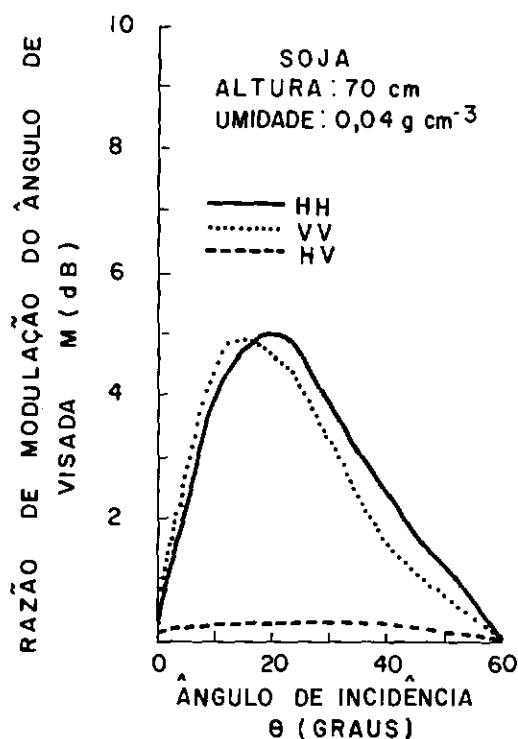


Figura 19 - Variação do índice de modulação do retroespalhamento com o tipo de polarização. (Adaptada de Ulaby et al., 1986, p.1876)

## 5 - METODOLOGIA

A metodologia básica utilizada no projeto consistiu na realização de uma missão de campo concomitante à aquisição de fotografias aéreas na escala de 1:10.000, recobrindo uma região representativa das classes a serem identificadas em imagens SAR na banda C.

As fotografias aéreas foram analisadas a partir de métodos convencionais de interpretação (ASP,

1983) para se gerar um Mapa de Referência na escala de 1:10.000. Este mapa foi utilizado em todas as fases posteriores do trabalho para avaliar a eficiência com que os dados SAR na banda C permitem o mapeamento de plantas aquáticas.

Devido ao grande volume de dados SAR obtidos, sua avaliação está sendo feita através de sub-projetos os quais estão sendo desenvolvidos no âmbito de dissertações de mestrado do curso de Sensoriamento Remoto e Aplicações (Almeida, 1995), pesquisas de iniciação científica (Silva, 1995) e pesquisas em andamento em cooperação com o CCRS (Novo et al., 1993; Novo et al., 1995; Costa, 1995).

Os dados SAR-C estão sendo submetidos a dois tipos básicos de análise: análise visual de imagens analógicas (transparências e cópias em papel) e análise digital de dados visando à correção e realce, seguida de análise visual para a identificação das classes de interesse.

Para a fase inicial de processamento digital dos dados SAR foi selecionada a faixa no modo Nadir, em quatro polarizações, HH, VV, HV e VH. O objetivo deste sub-projeto foi o de comparar o desempenho dos dados SAR-C aerotransportados em diferentes polarizações com o desempenho dos dados SAR orbitais providos pelo satélite ERS-1 na polarização VV e com os dados óticos do sensor TM/Landsat. Teoricamente, ao se utilizar dados no modo Nadir, ter-se-ia a minimização do efeito da geometria de aquisição em relação aos dados SAR-ERS-1 e Landsat,

restando como elementos de variação a resolução e polarização (no caso do ERS-1), e a resolução e região do espectro eletromagnético (no caso do TM/Landsat).

O processamento das imagens SAR foi feito através do software PCI que dispõe de um módulo especial para o processamento de dados de radar. Foram também utilizados algoritmos desenvolvidos pela Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e pelo Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais.

Os passos básicos do processamento das imagens SAR foram:

a - Correção radiométrica das imagens.

O feixe da antena de radar não produz uma iluminação uniforme ao longo da direção transversal (range). A intensidade do sinal de retorno, portanto, varia perpendicularmente à linha de vôo com a distância entre o sensor e o alvo. O efeito do padrão de antena é afetado pelo modo de imageamento mas, via de regra, as imagens sem correção de antena apresentam maior intensidade de sinal na região central da cena.

Para que se possa extrair informações quantitativas das imagens, deve-se corrigir o padrão da antena. Esta correção pode ser feita através de procedimentos empíricos ou através de dados de calibração fornecidos pelo CCRS.

Neste trabalho, foram testados dois procedimentos de calibração. O primeiro procedimento consistiu da aplicação do algoritmo e arquivos de calibração relativa fornecidos pelo CCRS (Hawkings, 1993). O segundo procedimento consistiu da utilização de um algoritmo desenvolvido por Tissi e Hiroshi(1993) o qual consiste no cálculo da média móvel das colunas a cada linha da imagem.

b - Correção geométrica da imagem SAR.

Esta correção foi realizada utilizando-se um algoritmo disponível no PCI que permite a conversão de imagens formadas no plano do pulso para o plano da superfície terrestre, quando não existem dados de elevação do terreno ou pontos de controle no terreno.

Os parâmetros necessários para aplicar a correção são: a) o espaçamento entre os pixels na direção azimutal e na direção transversal (range) da imagem não corrigida; b) o tempo de demora em microsegundos do pulso de radar para o primeiro pixel de entrada (delay). O delay é usado para determinar a distância em metros em relação ao primeiro pixel da imagem, sendo calculado através da fórmula:

$$D = (2 \times H) / c \quad (8)$$

onde **H** é a altura de vôo e **c** a velocidade da luz, em microsegundos.

Para o cálculo da altura de vôo são necessários alguns dados sobre o modo de aquisição e sobre o processamento das imagens SAR. Estes dados são: o atraso do pulso de retorno devido à distância (range gate delay-RD), o número de pixels nulos no início da cena (BP), o espaçamento entre os pixels, o tempo de compressão e expansão do sistema SAR (SAR expander/compression delay - SR) e a velocidade da luz ( $c=299,793$  m/microsegundo).

Para o modo Nadir, a altura de vôo é determinada pela fórmula:

$$H = (BP \times INPKSZ) + (RD - SR) \times c/2 \quad (9)$$

O valor de BP é extraído da imagem não corrigida, e os valores de INPKSZ, RD e SR são parâmetros de vôo e de processamento fornecidos junto com a cena SAR.

O algoritmo também requer que o usuário defina o tipo de interpolador que deverá ser aplicado no processo de reamostragem da imagem de saída. Neste trabalho foi utilizado um interpolador "Vizinho Mais Próximo". Ahern(1994) recomenda, entretanto, a utilização do algoritmo de convolução cúbica para que se preservem as propriedades radiométricas da imagem. O impacto do interpolador sobre as propriedades radiométricas das plantas aquáticas está sendo presentemente investigado.

Com estas informações, o algoritmo determina a localização de cada ponto da imagem corrigida a partir

da localização do ponto na imagem não-corrigida, e o valor do pixel da imagem de entrada é copiado para a imagem de saída.

c - Registro de imagens.

Após esta correção das imagens SAR, selecionou-se uma subcena representativa dos principais gêneros de plantas aquáticas encontradas no reservatório para que se procedesse ao registro com as imagens TM/Landsat e com imagem ERS-1 obtidas em datas próximas à aquisição de dados SAREX.

Como os três diferentes conjuntos de dados possuíam resolução espacial diferente, 6m x 6m, 25m x 25m e 30m x 30m para as imagens SAR, ERS-1 e TM/Landsat, respectivamente, optou-se por degradar a resolução mais fina para a resolução intermediária de 25m x 25m.

d - Aquisição de composições coloridas.

Após o registro foram produzidas diversas composições coloridas a partir da combinação de diferentes polarizações. As composições obtidas foram: **HH, HV, VV; HH, VH, VV; VV, VH, HV; HH, VH, HV.**

Devido às dificuldades de registro dos dados, principalmente derivadas do número pequeno de pontos de controle disponível na cena e das diferenças do processo de formação de imagem, algumas das composições tiveram que ser descartadas durante o processo de interpretação a que foram submetidas posteriormente.



As composições obtidas foram fotografadas para posterior análise. Embora o processo de aquisição de fotografia da tela do visualizador de imagens produza inúmeras distorções geométricas no produto final, ele foi adotado tendo em vista que o objetivo desta fase do trabalho era mais o de avaliação dos produtos em termos de seu potencial para separar alvos aquáticos.

e - Interpretação visual dos dados processados digitalmente.

Nesta fase foram interpretadas: - uma subcena da imagem ERS-1 obtida em 20 de Abril de 1992, composições coloridas TM, bandas 3,4,5, bandas individuais do SAR aerotransportado (HH,VV,VH,HV) e composições coloridas com diversas combinações de polarizações e produtos.

Esta interpretação foi realizada com o auxílio de um ampliador óptico (PROCOM) que permitiu colocar as imagens fotografadas na tela na escala aproximada de 1:50.000 A legenda utilizada para a interpretação destes dados é a descrita na Tabela 2.

f - Integração de mapas no Sistema de Informações Geográficas (SIG).

A análise visual dos produtos derivados do processamento digital permitiu selecionar os melhores conjuntos de dados para o mapeamento das diferentes espécies de macrófitas.

Os mapas resultantes da interpretação visual foram integrados através do SGI. As diferentes classes foram digitalizadas e poligonalizadas, permitindo o cálculo da área por elas ocupadas.

Foram também selecionados polígonos comuns aos diferentes mapas e ao mapa de referência, para se avaliar o desempenho geral das imagens SAR frente aos demais produtos.

## **6 - RESULTADOS PRELIMINARES**

### **6.1 - Mapa de Referência**

A partir da legenda definida em campo e descrita na Tabela 2, pôde-se criar uma chave de interpretação das fotografias aéreas coloridas na escala de 1:10.000. Esta chave foi definida a partir da localização dos pontos amostrais caracterizados em campo, sobre as fotografias aéreas. Durante a análise das fotografias aéreas, entretanto, foi constatado que algumas das classes identificadas em campo não eram perfeitamente separáveis devido ao tamanho reduzido dos bancos. Foi constatado também que classes homogêneas como o *Scirpus, sp.*, por exemplo, apresentavam características fotográficas variáveis em função de mudanças em sua densidade, estágio de crescimento e vigor, e que classes originalmente incluídas como parte de banco de vegetação mista, poderiam, em decorrência de sua dimensão, ser mapeadas individualmente. A Tabela 3 apresenta a chave de interpretação utilizada para classificar os diferentes alvos reconhecidos nas fotografias aéreas.

Tabela 3 - Chave de Identificação desenvolvida para a confecção do Mapa de Referência.

Classe	Cor	Textura	Forma	Observações
Floresta/Ocupação Agrícola	Verde Escuro a Verde	Rugosa a Lisa	Retângulos referentes à ocupação agrícola	Esta classe inclui Floresta Primária e Secundária, Pastagens e Culturas.
Espelho d'água	Preto a Azul Escuro	Lisa	Irregular	Áreas com ou sem baixa densidade de paliteiros emersos.
Paliteiros	Cinza	Rugosa	Irregular	Localização próxima a ilhas.
<i>Scirpus</i> , sp.	Verde claro a ocre	Lisa	Irregular	Bancos de <i>Scirpus</i> , sp. no início do ciclo apresenta cor verde clara. Na fase de senescência a cor apresenta-se ocre.
<i>Typha</i> , sp.	Verde	Lisa	Irregular	Os bancos de <i>Typha</i> , sp. têm aparência mais compacta e densa que os de <i>Scirpus</i> , sp.
<i>Salvinia</i> , sp.	Marrom	Lisa	Irregular	Localizada nas margens dos bancos de <i>Scirpus</i> , sp.
<i>Eichhornia</i> , sp.	Verde Escuro	Lisa	Forma alongada acompanhando os antigos canais fluviais.	Localizada nas partes mais profundas do reservatório e com menor incidência de paliteiros.
<i>Pistia</i> , sp.	Verde Claro	Lisa	Forma semi-circular ou circular.	Localizada nas margens de bancos de <i>Scirpus</i> , sp.
Paliteiro, <i>Scirpus</i> , Espelho d'água	Verde, Cinza, Preto	Mosqueada	Irregular	As dimensões dos bancos não são suficientes para serem separados. Formam uma unidade mista complexa.
Paliteiro, <i>Scirpus</i> , <i>Salvinia</i> , Espelho d'água	Verde, Marrom, Cinza, Preto	Mosqueada	Irregular	Unidade complexa com pequenos bancos intermeados de água e paliteiros.
<i>Scirpus</i> , sp. e <i>Salvinia</i> , sp.	Verde e Marrom	Mosqueada	Irregular	Unidade Complexa com pequenos bancos alongados de <i>Salvinia</i> , sp. e <i>Scirpus</i> , sp.
Bancos heterogêneos	Verde escuro, claro, Ocre, Marrom, Cinza	Mosqueada	Irregular	Bancos heterogêneos em que diversas espécies coexistem em áreas espacialmente restritas.

Com base nesta legenda foi, então, produzido o mapa da Figura 20, que representa o mapa de referência para a avaliação da eficiência das imagens de radar na discriminação das classes de interesse. Pode-se observar que a chave de interpretação inclui mais classes do que aquelas definidas pela legenda da Tabela 2. A classe Vegetação Aquática Mista, graças à escala das

fotografias (1:10.000), pode ser separada em classes distintas em função da dominância de uma ou outra espécie identificável, porém não suficientemente extensa para que pudesse ser incluída numa classe à parte.

UHE - TUCURUÍ - BRAÇO DO PUCURUÍ

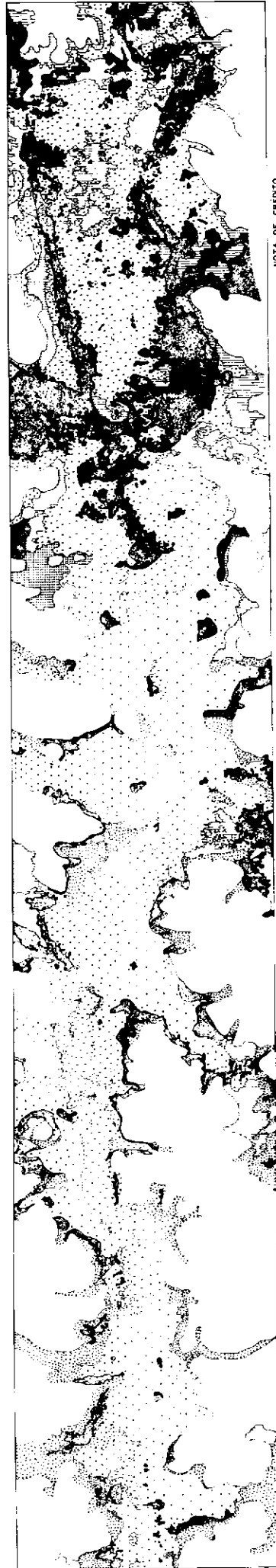


Figura 20 - Mapa de Referência

O mapa da Figura 20 foi levado ao campo em outubro de 1993 para ser submetido à verificação e correção através de observações colhidas durante um sobrevôo nos vales do Pucuruí e Repartimento.

Durante o sobrevôo foram feitas observações, as quais foram comparadas com as realizadas em dezembro de 1987, julho de 1989 e abril de 1991. Os resultados destas comparações levaram às seguintes conclusões:

a - A vegetação aquática dos braços do Pucuruí e Repartimento é extremamente dinâmica. Como as espécies dominantes são adaptadas à disponibilidade de nutrientes e às variações de nível da água, resultantes da operação do reservatório, os bancos mapeados em imagens obtidas em Abril de 1992, quando o reservatório estava na fase de enchimento, não se encontram presentes nem no mesmo estado fisiológico. Isto, obviamente, dificultou a verificação.

b - Devido ao intenso uso do solo (pastagens), à oscilação periódica do nível do reservatório e ao próprio dinamismo natural das comunidades de plantas aquáticas ao longo do tempo, está ocorrendo um processo de sucessão em relação às espécies dominantes.

A barragem foi fechada em novembro de 1984 e desde então, a vegetação aquática sofreu o seguinte dinamismo:

a - entre 1987 e 1989 os bancos passaram de uma expansão equivalente à cerca de 30% da área do

reservatório para cerca de 20% conforme estimativas feitas por Abdon e Meyer (1990) baseadas em interpretação de imagens TM/Landsat para o período de máximo nível d'água (Junho a Agosto).

b - as espécies dominantes no reservatório se alteraram entre 1987 e 1992:

Os gêneros dominantes em 1987 eram a *Salvinia, sp.* e o *Scirpus, sp.*. Gradativamente, os bancos de *Salvinia, sp.* foram sendo substituídos pelos bancos de *Scirpus, sp.*, que se expandiram rapidamente utilizando os troncos das árvores submersas como suporte. Conforme observações feitas por Hatanaka (com. pessoal), a maior expansão do *Scirpus, sp.* pode ser explicada pelo fato de que este possui um sistema radicular caracterizado por extensas raízes, as quais favorecem a obtenção dos nutrientes necessários à sua dominância. Nesta época havia ainda alguns bancos localizados de *Eichhornia, sp.* e *Pistia, sp.* nas regiões à montante dos braços do Pucuruí e Repartimento.

Durante o sobrevôo ao Pucuruí e ao Repartimento, foi observado que extensas áreas que eram ocupadas por bancos homogêneos de *Scirpus sp.*, em Abril de 1992, se encontravam ocupadas por uma associação entre *Scirpus, sp.*, *Montrichardia arborescens* e *Typha dominguensis*, em Outubro de 1993. À medida que se alcança a montante dos braços do Pucuruí e do Repartimento, os bancos mistos de *Scirpus, sp.* são substituídos por bancos de *Typha dominguensis*, que é uma espécie enraizada, mais adaptada à zona de transição com os ecossistemas

terrestres e aquáticos. Segundo Hatanaka, 1993 (comunicação pessoal), o aparecimento da *Typha dominguensis* pode ser um indicador do processo de assoreamento e 'morte' dos braços de reservatórios. Em Tucuruí, uma provável explicação para a ocorrência desta macrófita em locais profundos é que os troncos e galhos apodrecidos e flutuantes, além dos bancos de *Scirpus, sp.*, estejam servindo de suporte.

A *Salvinia, sp.* foi identificada nas fotografias aéreas pela cor marrom e pela localização marginal aos bancos de *Scirpus, sp.*. Durante o trabalho de campo, foi observado que, geralmente, os bancos de *Salvinia, sp.* se desenvolvem na periferia dos bancos de *Scirpus, sp.*. O padrão apresentado pela *Salvinia, sp.* é bastante consistente e permite sua fácil identificação nas fotografias aéreas coloridas.

Os bancos homogêneos de *Scirpus, sp.* também são facilmente identificados pela textura lisa e pela cor verde-amarelada, indicativo da presença de folhas secas.

Os bancos de *Pistia, sp.* também apresentam um padrão fotográfico bastante característico devido à cor verde clara, da cor da própria *Pistia, sp.* (alface d'água) e pela forma de ocorrência; geralmente em bancos pequenos, de formato semi-circular ou acompanhando a forma das margens côncavas dos canais fluviais onde a água é mais profunda.

Os bancos de *Eichhornia, sp.* apresentam cor verde escura, textura lisa e forma alongada,



localizando-se geralmente à montante do vale ou ao longo do canal fluvial, onde, devido à ausência de paliteiros, têm condições de flutuar livremente. Sob escassez de nutrientes, a côr tende a ser mais amarela. Quando o nível do reservatório desce e o banco fica sobre o solo, as folhas secam e morrem.

Um tipo de vegetação localmente conhecida como samambaia do brejo, desenvolve-se em algumas áreas na forma de bancos circulares que podem atingir diâmetros em torno de 10 metros. As áreas de ocorrência desta samambaia associada ao *Scirpus, sp.* apresentam-se com o mesmo aspecto das áreas de *Scirpus, sp.* mas possuem um verde mais intenso.

A *Typha, sp.* também ocorre na forma de bancos circulares mas tende a coalescer, formando grandes extensões que transicionam para bancos de *Scirpus, sp.* nas regiões mais profundas.

Ocorrem bancos de *Montrichardia, sp.* também com formato circular mas encontram-se dispersos no meio de bancos de outras espécies de maior dominância.

Os bancos homogêneos são facilmente identificáveis. Os bancos mistos são de difícil classificação, pois as variações de côr não estão apenas relacionadas às espécies presentes no banco mas também à densidade com que ocorrem e ao vigor que apresentam.

O maior problema encontrado durante o sobrevôo para o estabelecimento de padrões foi a

diferença das condições do reservatório em relação à época em que foram adquiridas as fotografias aéreas.

## 6.2 - O Número de Classes Mapeáveis

A Tabela 4 permite comparar o número de classes identificadas com os diferentes produtos de sensoriamento remoto submetidos à interpretação visual.

Pode-se observar que, no tocante ao número de classes mapeáveis, a composição polarimétrica e a composição TM/Landsat foram os produtos que apresentaram o melhor desempenho relativo ao resultado da interpretação de fotografias aéreas coloridas na escala de 1:10.000.

Tabela 4 - Número de classes identificadas a partir da interpretação visual de diferentes produtos de sensoriamento remoto.

<b>Produto de Sensoriamento Remoto</b>	<b>Número de classes mapeadas</b>
Foto Aérea	12
Composição TM3TM4TM5	09
ERS-1 SAR	04
SAR C HH	08
SAR C VV	06
SAR C HV	08
SAR C VH	08
Composição polarimétrica	09

O pior desempenho foi apresentado pelas imagens ERS-1 que permitiram distinguir apenas quatro classes. A questão fundamental em sensoriamento remoto, entretanto, não é apenas a do número de classes que o produto possa ou não distinguir, mas também a da consistência com que certos padrões fotográficos podem ser associados às características da cena, de forma biunívoca. A correspondência entre as classes mapeadas nas imagens e aquelas do terreno é medida através da determinação da exatidão do mapeamento.

Esta, entretanto, é uma tarefa bastante difícil devido à inexistência de mapas de referência que possam ser utilizados como base de comparação. Uma dificuldade adicional é que mesmo os mapas de referência têm um erro associado. Além disso, para que esta exatidão possa ser estatisticamente quantificada há, em geral, a necessidade de um número bastante elevado de amostras, o que nem sempre é viável em regiões de grande extensão territorial.

Na área teste de Tucuruí foram enfrentados problemas mais graves para se quantificar a exatidão dos mapas resultantes. Devido à dificuldade de acesso aos bancos de macrófitas, a alternativa adotada foi a da obtenção de fotografias aéreas na escala de 1:10.000. O mapa resultante desta interpretação (Mapa de Referência) foi corrigido em campo mas não foi possível quantificar sua exatidão devido ao número limitado de pontos visitados em campo e às mudanças no formato e densidade dos bancos entre a data de aquisição das fotografias e a missão de verificação.

Para contornar o problema, foram selecionados no mapa de referência alguns bancos identificados em campo como bancos de referência. Esses bancos foram localizados posteriormente nos diferentes mapas obtidos pela interpretação das imagens do SAR, imagens TM e imagens SAR do sistema ERS-1. A área destes polígonos foi determinada e o resultado pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 - Área ocupada por polígonos comuns aos diferentes mapas

Polígono	Foto Aérea (km <sup>2</sup> )	Composição TM colorida (km <sup>2</sup> )	ERS-1 SAR	SAR C HH (km <sup>2</sup> )	SAR C VV (km <sup>2</sup> )	SAR C HV (km <sup>2</sup> )	SAR C VH (km <sup>2</sup> )	Composição SAR polarimétrica (km <sup>2</sup> )
<i>Eichhornia, sp.</i>	0.0021	0.0010	nm	0.0024	nm	0.0015	0.0019	0.0014
<i>Pistia, sp.</i>	0.0007	0.0010	nm	0.0013	nm	0.0011	0.0009	0.0016
<i>Salvinia, sp.</i>	0.0002	0.0009	nm	0.0028	0.0030	0.0005	0.0043	0.0060
<i>Scirpus, sp.</i>	0.0094	0.0091	nm	0.0141	0.0157	0.0140	0.0152	0.0105
Paliteiro	0.0007	0.0002	0.0009	0.0032	0.0022	0.0022	0.0020	0.0008
Espelho d'água	0.0047	0.0845	0.0300	0.0334	0.0117	0.0194	0.0471	0.0011

nm = não mensurável

A análise da Tabela 5 permite verificar que o desempenho dos diferentes produtos é afetado pelas características das classes mapeadas e pelas características inerentes aos produtos utilizados. Com base no pressuposto de que o mapa de referência representa a melhor aproximação das classes homogêneas que podem ser encontradas no terreno, verifica-se que não existe um único produto de sensoriamento remoto que possa substituir a fotografia aérea colorida na escala de 1:10.000. Alguns produtos permitem identificar de forma eficiente uma determinada classe mas não permite identificar outras. O banco de *Eichhornia, sp.*, por exemplo, pôde ser mapeado com uma diferença de apenas 10% em relação à fotografia aérea, quando se utilizou a imagem SAR com polarização HH e VH, mas não foi nem mesmo identificada como um alvo distinto, quando se utilizou a imagem ERS-1.

O desempenho das imagens TM não é satisfatório, pois apresenta uma diferença de área mapeada em relação à fotografia de 50% em relação à *Eichhornia, sp.*. Este desempenho pode ser explicado pela baixa resolução espacial das imagens TM e pelas características apresentadas por este gênero de planta aquática. A *Eichhornia, sp.* ocorre em bancos estreitos margeados por bancos de *Scirpus, sp.*. Trata-se de uma espécie de pequeno porte que recobre muitas vezes a superfície, deixando lacunas que funcionam como sorvedouro de energia. Com isto, elas possuem uma baixa reflectância na região do espectro visível. O *Scirpus, sp.* é um gênero que se apresenta em bancos densos, de porte alto, cujas lacunas são ocupadas por outras espécies (*Salvinia, sp.*, por exemplo). Esses bancos, no estágio adulto, apresentam alta reflectância quando comparados com os de *Eichhornia, sp.*. Com isto, os pixels misturados tendem a ser dominados pela resposta do *Scirpus, sp.*, fazendo com que os bancos de *Eichhornia, sp.* sejam sub-estimados. Pode-se também verificar que a composição polarimétrica também apresenta um desempenho pouco satisfatório (33% de diferença) o qual pode, em parte, ser explicado pela dificuldade de registro das faixas com diferentes polarizações.

A Tabela 5 mostra que a área ocupada pelo banco de *Pistia, sp.* é super-estimada em cerca de 130% quando a composição polarimétrica é utilizada. Esta diferença de desempenho não pode ser explicada apenas pelos problemas de registro mencionados anteriormente. Quando se utiliza a polarização HV, entretanto, este banco pode ser identificado com uma diferença em área de

apenas 28%. As razões destas diferenças não estão, ainda, completamente compreendidas. Esta espécie é caracterizada por pequenas folhas que se organizam em plantas de formato circular. As plantas individuais, por sua vez, organizam-se em forma de rosáceas. O conjunto de rosáceas se estrutura em bancos circulares e semi-circulares de centenas de metros de extensão e dezenas de metros de largura. Entre esses bancos podem ocorrer outros gêneros como o *Scirpus*, *sp.* e a *Salvinia*, *sp.* ou podem ser circundados pelo espelho d'água. As folhas pequenas das plantas, menores que o comprimento de onda incidente, tendem a reduzir a rugosidade da superfície da água quando sua densidade não é suficiente para que estas se organizem em rosáceas. Quando a radiação interage com os bancos mais densos estruturados em semi-círculos, estes podem produzir retornos tão elevados quanto ao do *Scirpus*, *sp.* por darem origem a reflexão de canto na interface entre os dois bancos: um, com altura de 5 a 10 cm, e outro com altura em torno de 90 cm. Com isto, na polarização HH a área ocupada por *Pistia*, *sp.* é confundida com a área de ocorrência de *Scirpus*, *sp.*. O fato de a área ocupada pelos bancos de *Pistia*, *sp.* ter sido super-estimada em todos os produtos de sensoriamento remoto também pode ser explicada por sua forma alongada e sua pequena dimensão em relação aos produtos utilizados (resolução espacial reamostrada para 25 m).

A área ocupada por *Salvinia*, *sp.* não foi avaliada de forma consistente por nenhum dos produtos disponíveis. O melhor desempenho foi apresentado pela banda SAR C com polarização HV e ainda assim, super-estimou a área ocupada pelo banco em cerca de 150%. Isto

acontece devido à dificuldade de se discriminar a *Salvinia, sp.* do espelho d'água e/ou do Paliteiro. Quando se usa a polarização cruzada, a água e a *Salvinia, sp.* se confundem; no entanto, com a polarização paralela, as áreas de paliteiros podem ser mapeadas como bancos de *Salvinia, sp.* por apresentarem padrão bastante semelhante nas imagens. As razões para isto são semelhantes àquelas que explicam o comportamento dos bancos de *Pistia, sp.*.

Os bancos de *Scirpus, sp.* apresentaram diferenças em área que variaram entre 3% com os dados TM/Landsat e 67% com os dados SAR - CCRS, polarização VV. O melhor desempenho apresentado pelos dados SAR foi o da composição polarimétrica que proporcionou uma diferença de apenas 12% em relação às fotos aéreas. A explicação para isto é a de que em todas as polarizações os bancos de *Scirpus, sp.* se caracterizam por um elevado retroespalhamento.

A área ocupada pelos paliteiros é também super-estimada em todos os produtos SAR, com exceção, apenas, da composição polarimétrica. A área ocupada pela classe espelho d'água é super-estimada em todos os conjuntos de dados SAR, exceto na composição polarimétrica, em que ela é super-estimada. As razões para isto estão sob investigação.

Os dados na Tabela 5 indicam que a melhor banda para distinguir os bancos de *Eichhornia, sp.* é a SAR-CCRS com polarização HH, na qual o banco é caracterizado por um baixo retroespalhamento. Parece que o ângulo de incidência próximo à vertical, proporcionado



pelo modo Nadir, não favorece a ocorrência de espalhamento de canto nos bancos menos densos, criando condições para que o retroespalhamento seja dominado pela reflexão especular da água na direção oposta à da antena receptora. Isto explicaria o baixo sinal de retorno dos bancos de *Eichhornia, sp.* na polarização HH.

Os resultados da Tabela 5, entretanto, devem ser analisados com cuidado, pois se baseiam em dados de uma amostra coletada numa área bastante restrita. Além disso, parte da diferença encontrada entre as fotos aéreas e os demais produtos pode estar associada à metodologia utilizada, que envolveu a ampliação ótica e a digitalização, as quais impõem uma série de erros aos dados (Burrough, 1986).

Os resultados também sugerem que outros fatores, além da arquitetura da copa, estão afetando a detecção dos bancos de plantas aquáticas. A densidade do banco, a altura das plantas, a contigüidade das diferentes espécies, a homogeneidade e o estágio fenológico impõem diferenças ao retroespalhamento que podem ser superiores às diferenças em gênero e/ou espécie. Estes aspectos serão objeto de estudos posteriores durante o desenvolvimento deste projeto.

A Tabela 6 apresenta o cálculo de área ocupada pelas diferentes classes para toda a sub-cena estudada. O objetivo desta análise foi verificar como a chave de interpretação desenvolvida para a área de estudo restrita ao mapa de referência poderia ser estendida para

uma área mais ampla, e qual a concordância entre os diferentes sensores.

Tabela 6 - Comparação da área total ocupada pelas diferentes classes resultantes da interpretação visual dos diferentes produtos de sensoriamento remoto.

Classe Temática	Composição TM colorida	ERS-1 SAR	SAR C HH	SAR C HV	SAR C VV	SAR C VH	SPC HH HV VH
Espelho d'água.r	3.799 km <sup>2</sup>	3.856 km <sup>2</sup>	1.760 km <sup>2</sup>	3.300 km <sup>2</sup>	2.241 km <sup>2</sup>	2.85 km <sup>2</sup>	2.55km <sup>2</sup>
Floresta	6.469 km <sup>2</sup>	6.900 km <sup>2</sup>	7.525 km <sup>2</sup>	7.375 km <sup>2</sup>	7.938 km <sup>2</sup>	7.425km <sup>2</sup>	7.456km <sup>2</sup>
<i>Scirpus a</i>	1.144 km <sup>2</sup>		1.725 km <sup>2</sup>	1.360 km <sup>2</sup>	1.150 km <sup>2</sup>	1.550km <sup>2</sup>	1.275km <sup>2</sup>
<i>Scirpus b</i>	0.144 km <sup>2</sup>						
<i>Scirpus c</i>	0.144 km <sup>2</sup>						
<i>Pistia, sp.</i>	0.144 km <sup>2</sup>		0.025 km <sup>2</sup>	0.025 km <sup>2</sup>		0.025km <sup>2</sup>	0.050km <sup>2</sup>
<i>Eichhornia, sp.</i>	0.069 km <sup>2</sup>		0.100 km <sup>2</sup>	0.005 km <sup>2</sup>		0.100km <sup>2</sup>	0.075km <sup>2</sup>
<i>Salvinia, sp.</i>	0.039 km <sup>2</sup>		0.475 km <sup>2</sup>	0.450 km <sup>2</sup>	0.850 km <sup>2</sup>	0.525km <sup>2</sup>	0.800km <sup>2</sup>
Vegetação aquática mista			0.459 km <sup>2</sup>	0.055 km <sup>2</sup>	0.110 km <sup>2</sup>	0.350km <sup>2</sup>	0.200km <sup>2</sup>
Vegetação aquática		2.456 km <sup>2</sup>					
Paliteiro	0.019 km <sup>2</sup>	0.056 km <sup>2</sup>	1.325 km <sup>2</sup>	0.200 km <sup>2</sup>	0.825 km <sup>2</sup>	0.450km <sup>2</sup>	0.200km <sup>2</sup>
Nuvem	1.000 km <sup>2</sup>						
Total	12.971 km <sup>2</sup>	13.212 km <sup>2</sup>	13.394 km <sup>2</sup>	12.770 km <sup>2</sup>	13.114 km <sup>2</sup>	13.275km <sup>2</sup>	13.425km <sup>2</sup>

A questão investigada através dos dados da Tabela 6 não é a da precisão da classificação mas a da repetibilidade dos resultados quando diferentes tipos de sensores são utilizados.

O primeiro aspecto a ser salientado é o de que a área total computada para a área teste variou em 5% de um produto para outro. Esta variação é explicada por erros relativos ao processo de geocodificação dos dados, envolvendo a calibração da mesa, a digitalização, o mapa fonte. Segundo Burroughs (1986), há duas fontes de erro potencial associadas ao processo de digitalização: erros associados ao mapa fonte (pequenas diferenças na escala do mapa, no processo de ampliação ótica das imagens, por exemplo) e erros associados à representação digital de informações vetoriais. Este erro aumenta com a complexidade dos polígonos.

A área classificada como Floresta varia cerca de 16% em função do produto de sensoriamento remoto utilizado. Se for admitido que há uma área de 1 km de nuvens e que metade desta área é coberta por floresta, esta diferença cai para 8%. As diferenças de área da floresta entre os produtos SAR é negligenciável (menos do que 5%) e pode ser relacionada mais à erros no procedimento para ampliação das imagens do que à diferenças reais de desempenho dos diferentes produtos.

O efeito da polarização afeta fortemente a discriminação entre água, bancos de plantas aquáticas e paliteiros. A diferença entre a área ocupada por espelho d'água varia em cerca de 120%, sendo o maior valor apresentado pelos dados TM e ERS-1, que diferem entre si em apenas 1.5%. Esta discrepância entre os produtos orbitais e os dados SAR aerotransportados pode ser associada à resolução espacial original dos produtos, respectivamente (30 m x 30m e 25m x 25m ) o que limita a

detecção de pequenos bancos esparsos de macrófitas. Outro fator a explicar a diferença, no caso de dados TM, é a data da aquisição da imagem (Junho) quando o nível da água atinge o seu máximo (72 m) e cobre muitas das áreas de paliteiro e muitas das ilhas que se apresentam emersas em Abril.

A compatibilidade entre os produtos SAR também é bastante baixa. A área de espelho d'água medida a partir do mapa derivado da imagem SAR-C HH é de 87%, menor do que a obtida com imagens SAR-C HV. Esta diferença não pode ser relacionada à mudanças ambientais ou à resolução espacial. As razões para esta diferença são os mecanismos de interação entre a radiação de microondas e a água, o paliteiro e as plantas aquáticas, quando diferentes polarizações são utilizadas. Os dados sugerem que a polarização HV tende a ser pouco sensível aos paliteiros e aos bancos de plantas aquáticas de baixa densidade. Se a área de paliteiros é adicionada à área do espelho d'água, a diferença entre HH e HV cai para apenas 13%.

Como pode ser observado na Tabela 6, os dados SAR C HH tendem a ser os mais sensíveis à presença de plantas aquáticas. A diferença entre as quatro polarizações foi somente de 15%. Isto significa que as diferenças na área ocupada pelo espelho d'água é mais relacionada à detecção de paliteiros que às macrófitas. A área de paliteiros mapeada com os dados SAR C-HH e ERS-1 variou entre 1.3 Km<sup>2</sup> e 0.1 Km<sup>2</sup>, ou seja, 1.200%. Estes resultados sugerem que duas variáveis do sensor estão afetando o mapeamento do paliteiro: - a elevada resolução

espacial dos dados originais do SAR data (6 x 6m) e a polarização.

A elevada resolução permite a detecção de paliteiros individuais. Estes paliteiros têm um retroespalhamento elevado devido à interação por reflexão de canto. Com isto, o seu nível digital elevado acaba contaminando os pixels vizinhos no processo de reamostragem para 25 m.

A polarização HH parece ser mais sensível aos paliteiros que a polarização VV. A polarização HH permitiu a detecção de uma área de paliteiro 44% maior que a detectada pela polarização VV. Portanto a pequena área de paliteiros detectada em dados ERS-1 pode ser explicada pela resolução espacial pobre e pela baixa sensibilidade da polarização VV aos paliteiros.

As Figuras 21 e 22 representam os mapas resultantes da interpretação visual da imagem ERS-1 e da imagem SAR C-HH.

# TUCURUI RESERVOIR

Pucurui Inlet

Data: 04-1992

-  FLORESTA
-  ÁGUA LIMPA
-  PALITEIRO
-  HOMOGÊNEO

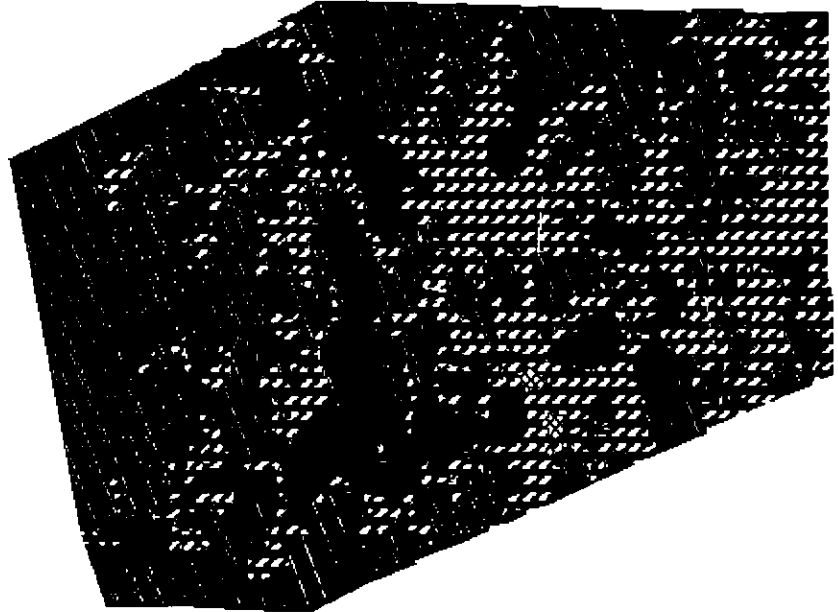










Figura 21 - Mapa resultante da interpretação visual da imagem ERS-1

# TUCURUI RESERVOIR

Pucurui Inlet

Data: 04-1992

-  FLORESTA
-  ÁGUA LIMPA
-  PALITEIRO
-  HETEROGÊNICO
-  SCIRPUS, SP
-  EICHHORNIA, SP
-  PISTIA, SP
-  SALVINIA, SP

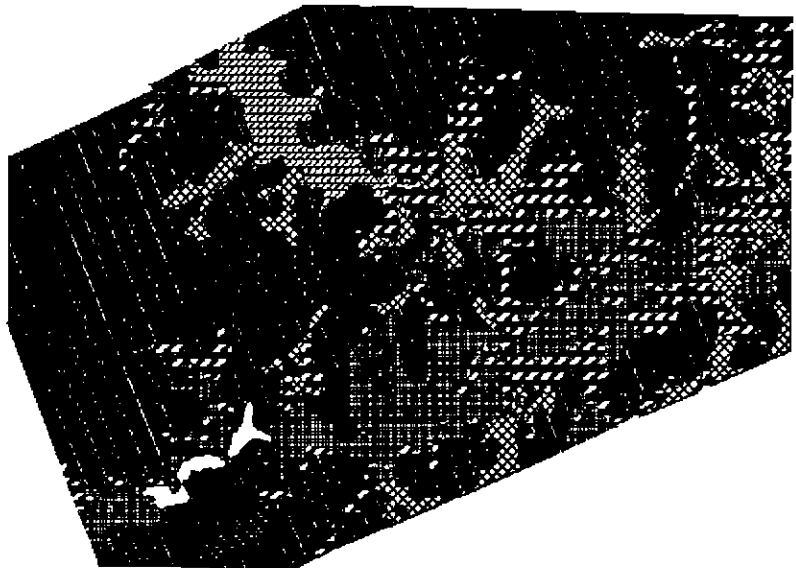


Figura 22 - Mapa resultante da interpretação visual da imagem SAR C-HH.

A análise das Figuras 21 e 22 deixa evidente que amplas áreas ocupadas por *Salvinia*, sp. e paliteiros, no mapa resultante da imagem HH, foram incluídas na classe espelho d'água, no mapa resultante da imagem ERS-1. A razão para isto é a de que os bancos de *Salvinia*, sp. não são suficientemente densos e extensos quando comparados aos bancos de *Scirpus*, sp.

Os dados da Tabela 6 sugerem, portanto, que a legenda utilizada neste mapeamento esteja acima da capacidade de discriminação dos produtos de sensoriamento remoto utilizados.

A Tabela 7 apresenta o resultado de uma simplificação da legenda com a redução das classes mapeáveis: floresta, espelho d'água e vegetação aquática.

Tabela 7 - Comparação dos dados para uma legenda simplificada.

Classe Temática	Composição TM colorida	ERS-1 SAR	SAR C HH	SAR C HV	SAR C VV	SAR C VH	SPC HH HV VH
Água Limpa	3.8 km <sup>2</sup>	3.9 km <sup>2</sup>	3.1 km <sup>2</sup>	3.3 km <sup>2</sup>	2.9 km <sup>2</sup>	2.5 km <sup>2</sup>	2.8 km <sup>2</sup>
Floresta	6.5 km <sup>2</sup>	6.9 km <sup>2</sup>	7.5 km <sup>2</sup>	7.4 km <sup>2</sup>	7.4 km <sup>2</sup>	7.4 km <sup>2</sup>	7.5 km <sup>2</sup>
Vegetação Aquática	1.7 km <sup>2</sup>	2.5 km <sup>2</sup>	2.8 km <sup>2</sup>	1.9 km <sup>2</sup>	2.1 km <sup>2</sup>	2.6 km <sup>2</sup>	2.4 km <sup>2</sup>
Total	12.0 km <sup>2</sup>	13.3 km <sup>2</sup>	13.4 km <sup>2</sup>	12.6 km <sup>2</sup>	12.4 km <sup>2</sup>	12.5 km <sup>2</sup>	12.7 km <sup>2</sup>

A análise da Tabela 7 mostra que mesmo simplificando as classes, ainda há uma grande diferença entre os produtos. Quando os sete produtos são comparados, as diferenças de área ocupada pelo espelho d'água chegam a até 45%. Quando apenas os produtos SAR-CCRS são comparados, esta diferença cai para 39%. A diferença em área ocupada por plantas aquáticas é de

cerca de 60% (quando os dados TM são comparados) mas caem para 50% (quando apenas os dados SAR-CCRS são utilizados).

Embora parte destas diferenças possam ser atribuídas a erros acumulados durante o processo de geração dos mapas, deve-se aceitar que, talvez, o seu maior peso nas diferenças se deva à natureza dos produtos utilizados e às interações entre energia e matéria distintas na região ótica e na região de microondas.

## 7 - CONCLUSÕES PRELIMINARES

Os resultados preliminares descritos na seção anterior permitem concluir:

1 - Os diferentes produtos de sensoriamento remoto analisados apresentam diferentes desempenhos no tocante à identificação de gêneros de plantas aquáticas, paliteiros e da superfície livre d'água. Os dados SAR-CCRS devido, talvez, a maior resolução espacial permitem o mapeamento de áreas mais extensas de paliteiro. As imagens TM/Landsat permitem apenas a identificação dos bancos mais extensos.

2 - As imagens TM/Landsat permitem identificar diferentes gêneros de plantas aquáticas a partir das variações de cor que apresentam. Entretanto, a estimativa da área ocupada por elas fica comprometida pela baixa resolução do sensor (30 X 30 m), principalmente quando se tratam de gêneros que se organizam em bancos de pequena dimensão (menos de 1 ha) como é o caso da Pistia, sp.

3 - A polarização da radiação de microondas afeta a identificação de certos gêneros. A polarização VV foi a que apresentou o pior desempenho no tocante à



4 - Há necessidade de estudos de maior detalhe e com um tratamento estatístico mais rigoroso para que se possa chegar a uma estimativa mais satisfatória da exatidão de classificação dos diferentes produtos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdon, M. M.; Meyer, M. Variação temporal de áreas ocupadas por macrófitas aquáticas no reservatório de Tucuruí através de dados do satélite Landsat/TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, 24-29 jun.1990. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1990, v.2, p. 545-548. (INPE-5174-PRE/1643)
- Abdon, M. M.; Meyer, M. Differentiation of genus of aquatic macrophytes through remote sensing in the Tucuruí reservoir - Pará State - Brazil. In: Simpósio Latinoamericano de Percepcion Remota, 5., Cuzco, PE, 28 out.-01 nov.1991, T1, p.43-44. Também nos Proceedings do International Symposium on Remote Sensing of Environment, 24., Rio de Janeiro, 27-31 maio 1991. **Proceedings**. Ann Arbor, Mi, USA, ERIM, v.1, p.311-322.
- Almeida, M.N. A importância dos índices biofísicos derivados de dados polarimétricos na banda C para a discriminação de gêneros de plantas aquáticas. Dissertação de Mestrado em andamento, 1995.
- American Society of Photogrammetry (ASP) **Manual of Remote Sensing**. Falls Church, 1983, V.1.
- Braga, C.Z.F. Avaliação preliminar da produtividade primária na represa de Tucuruí, Pará, com a utilização de imagens TM. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6, Manaus, 24-29 jun.1990. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1990, v.4, p.826-832. (INPE-5190-PRE/1638)
- Bartlett, K.B.; Crill, P.M.; Sebacher, D.I.; Harriss, R.C.; Wilson, J.O.; Mellack, J.M. Methane Flux from the Central Amazon Floodplain. **Journal of Geophysical Research**, 93(D2):1571-1582, 1988.

- Burrough, P.A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Claredon Press, Oxford, 1986, p.193.
- Costa, M.P.F. Comunicação pessoal, 1995.
- Elachi, C. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**. John Willey & Sons, New York, 1987, p.413.
- Forattini, G.D.; Barbosa, J.A.; Moreira, J.C.; Tucci, C.E.M. Aplicação de modelos matemáticos de qualidade de água do reservatório de Tucuruí. ABRH/IWRA/UNEP/UNESCO Symposium, Manaus, 1990.
- Hatanaka, T. Comunicação pessoal.
- Hawkins, R.K.; Teany, L.D. SAREX 92, data calibration. In: SAREX-92 Workshop - South American Radar Experiment. Paris, France, Dec 6-8, 1993. **Proceedings**. Paris, France, ESA. 1994, p.41-54. (ESA WPP-76).
- Novo, E.M.L.M.; Tundisi, J.G. Contribution of remote sensing techniques to the assessment of methane emission from large Tropical reservoirs. **Remote Sensing Reviews**, 10:143-153, 1994.
- Novo, E.M.L.M.; Costa, M.P.; Noernberg, M.A. Airborne SAR data to map Tucuruí reservoir (Amazon). In: SAREX-92 Workshop - South American Radar Experiment. Paris, France, Dec 6-8, 1993. **Proceedings**. Paris, France, ESA. p.71-94. (ESA WPP-76).
- Novo, E.M.L.M.; Costa, M.P.; Noernberg, M.A., Ahern, F. Use of SAR-C airborne data to monitor the infestation of aquatic plants in tropical reservoirs. Submitted to the Remote Sensing of Environment. 1995.

- Pereira Filho, W. **Métodos de integração de dados de campo de sensoriamento remoto no estudo da influência de características de bacia de captação sobre a concentração de sedimentos em suspensão em reservatório.** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) INPE, São José dos Campos, 1990. p.160.
- Pires, J.S.R.; Novo, E.M.L.M. Use of TM/Landsat data to identify silting areas in the Tucuruí reservoir. **Ciência e Cultura**, 43(5):385-388, 1991. (INPE-8154-PRE/154)
- Silva, O. F. da **Caracterização dos gradientes longitudinais e laterais do reservatório Tucuruí/PA, através da análise dos bancos de dados limnológico e de imagens TM-Landsat.** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) - INPE, São José dos Campos, 1995, p.123.
- Steffen, A.A.; Costa, M.P.F.; Gama, F.F. Spectral reflectance of Tucuruí reservoir waters. IN: Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment, Orlando, 12-16 Apr.1993, p.103-111 (Proceedings SPIE 1937).(INPE-9091-PRE/1091)
- Tissi, P.; Hiroshi, A. A correção das imagens SAREX por um algoritmo de média móvel. São José dos Campos, INPE, 1994, In press.
- Ulaby, F.T.; Sarabandi, K.; McDonald, K.; Whitt, M.; Dobson, C. Michigan microwave canopy scattering model. **International Journal of Remote Sensing** 11(7):1223-1253, 1990.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave Remote Sensing active and passive**, MEA, 1986.
- Wooding, M.G.; Zmuda, D; Attema, E. An overview of SAREX-92 data acquisition and analysis of the tropical forest environment. In: SAREX-92 Workshop - South American

Radar Experiment. Paris, France, Dec 6-8, 1993.  
**Proceedings.** Paris, France, ESA. p.3-14. (ESA WPP-76).