

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM**  
**Programa Integrado de Pós-graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais**  
**Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais**

**MONITORAMENTO DA DINÂMICA DA GEOMORFOLOGIA  
FLUVIAL DA RESERVA DE DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL MAMIRAUÁ, POR MEIO DE TÉCNICAS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

**JULIANA MAERSCHNER AGUIAR PEIXOTO**

Manaus, Amazonas

Junho, 2007

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM**

Programa Integrado de Pós-graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais

Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais

**MONITORAMENTO DA DINÂMICA DA GEOMORFOLOGIA  
FLUVIAL DA RESERVA DE DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL MAMIRAUÁ, POR MEIO DE TÉCNICAS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO**

JULIANA MAERSCHNER AGUIAR PEIXOTO

ORIENTADOR: DR. BRUCE WALKER NELSON

Co-ORIENTADOR: DR. FLORIAN WITTMANN

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS, área de concentração em Manejo Florestal.

Manaus, Amazonas

Junho, 2007

P379 Peixoto, Juliana Maerschner Aguiar  
Monitoramento da dinâmica da geomorfologia fluvial da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, por meio de técnicas de sensoriamento remoto/ Juliana Maerschner Aguiar Peixoto. --- Manaus : [s.n.], 2007.

132 f. : il.

Dissertação (mestrado)-- INPA/UFAM, Manaus, 2007

Orientador : Nelson, Bruce Walker

Co-Orientador : Wittmann, Florian

Área de concentração : Manejo Florestal

1. Migração do canal fluvial. 2. Processos de sedimentação e erosão fluvial. 3. Evolução espectral da vegetação

I. Título.

CDD 19.ed. 551.483

#### SINOPSE

Neste trabalho foi avaliada a dinâmica da geomorfologia fluvial dos canais dos rios Solimões, Japurá e do paraná do Auati, limitantes da área focal da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM), no estado do Amazonas, Brasil. Utilizando uma série temporal de imagens do satélite Landsat 5/TM, e técnicas de sensoriamento remoto, foram mapeadas as áreas erodidas e sedimentadas entre os anos de 1984 a 2005 ao longo da calha dos rios. Também foi avaliada a evolução espectral da vegetação a partir de seu estabelecimento no substrato, até a imagem de 2005.

A minha família

Dedico

IV

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Vânia e José Carlos, e aos meus irmãos, Rodrigo e Felipe, pelo amor, carinho, apoio, incentivo em tudo o que faço na vida. Por me ensinarem a sempre batalhar pelos meus propósitos, com respeito, educação e esforço. Por serem uma família maravilhosa.

Ao meu orientador Bruce Nelson, pela orientação, oportunidade, amizade, ajuda e valiosos ensinamentos.

Ao meu co-orientador Florian Wittmann, pela orientação, oportunidade, amizade, por guiar todo o meu aprendizado sobre várzeas, pelas críticas e sugestões sempre construtivas e pela empolgação por esse trabalho.

Ao Dr. Paulo Maurício, pela vasta contribuição neste estudo. Sempre disposto a esclarecer minhas dúvidas com muita paciência e bom humor.

Ao Dr. Arnaldo Carneiro, pela idéia inicial de realizar essa pesquisa.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), pela oportunidade de estudo e por disponibilizar a infra-estrutura do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo.

Ao Instituto Max-Planck de Limnologia, por financiar a parte de campo.

Ao Raphael, por tudo o que representa na minha vida, pessoal, espiritual e profissional.

A Patty, pela ajuda estatística e momentos de descontração, risadas, amizade e tudo o mais.

A Morla e ao Simba (*in memoriam*).

A todos os meus amigos, que tornam minha vida mais feliz.

## RESUMO

A dinâmica de migração do canal fluvial e a renovação da floresta alagada através da sedimentação e erosão de suas margens constituem importantes controles da diversidade ecológica dos corredores de rio. As diferentes unidades geomorfológicas e sua resposta a graus variados de intensidade dos processos hidrológicos determinam a dinâmica do ecossistema. Neste estudo, foram utilizadas seis imagens do sensor TM do satélite Landsat 5 entre o período de 1984 e 2005 para determinar e avaliar a dinâmica de áreas vegetadas na várzea localizada na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, região do médio rio Solimões. Também foi avaliado o comportamento de algumas variáveis espectrais (AFRI<sub>2,1</sub>, NDVI e refletância nas bandas 3, 4, 5 e 7) em relação aos primeiros 21 anos de crescimento da vegetação de várzea. O primeiro passo foi realizar os procedimentos de pré-processamentos, como registro, correção atmosférica, transformação para valores de refletância, normalização radiométrica e máscara de nuvens. As áreas erodidas e sedimentadas foram mapeadas por meio da técnica de detecção de mudanças por subtração de imagens índice de vegetação AFRI<sub>2,1</sub>, em cinco intervalos de tempo entre 1984 e 2005. As áreas de água se confundiram com áreas vegetadas nas imagens do índice AFRI<sub>2,1</sub>, tornando inviável a detecção de mudanças por subtração de imagens AFRI<sub>2,1</sub> com valores contínuos. As áreas de vegetação foram distinguidas de solo e de água por limiares de AFRI e da banda TM 7, respectivamente. As trocas de estado – de solo ou água para vegetação (sedimentação) e de vegetação para solo ou água (erosão) – foram mapeados em imagens-mudança para cinco pares de datas sequenciais. Não houve uma tendência significativa de deposição positiva ou negativa ao longo do tempo. A sedimentação e a erosão foram balanceadas, representando 51,4% e 48,6%, respectivamente, do total de áreas que mudaram. Não foram encontradas relações significativas entre as taxas de erosão e sedimentação e as variáveis fluviométricas analisadas. A taxa final de mudança lateral (erosão  $\pm$  sedimentação) de um trecho do canal do rio Solimões foi 0,48% da área do espelho de água, por ano. Grande parte das mudanças e migração do canal foi atribuída a mudanças em ilhas fluviais do canal. A maior mudança foi observada nas áreas de confluência entre os rios. A área dos canais limitantes da RDSM que sofreu alguma mudança não apresentou alta dinâmica de troca de estado ao longo dos 21 anos: 95% dos pixels que mudaram de estado passaram por apenas uma mudança. A maior dinâmica de troca de estados foi observada no paraná do Aranapu. Ao longo da sucessão vegetal, diferenças significativas entre as medias de atributos espectrais foram observadas

para os valores de  $AFRI_{2,1}$  e na banda 4, que apresentaram um pico significativo entre 2 e 9 anos de idade. Os valores de NDVI atingiram um platô aos 9 anos, sem queda significativa posteriormente. O comportamento da banda 3 foi complementar ao comportamento do NDVI, com queda entre 2 e 9 anos e estável nas idades posteriores. Entre 16 e 21 anos, foi observada queda significativa nas bandas 4 e 5. Os valores na banda 7 oscilaram dentro de uma amplitude de 1% de refletância em todo o período, e as diferenças não foram consideradas confiáveis.

## ABSTRACT

The dynamics of channel migration and the renewal of the flooded forest by sedimentation and erosion constitute important controls over the ecological diversity of river corridors. Distinct geomorphological features and the hydrological processes determine the dynamic for the ecosystem. In this study, six images of the TM sensor on board the Landsat 5 satellite, acquired for dates between 1984 and 2005, were used to map and analyze the dynamics of vegetated areas on the white-water floodplain of the Mamirauá Sustainable Development Reserve, middle Solimões River. Temporal behaviors of some spectral variables were also appraised (AFRI<sub>2,1</sub>, NDVI and reflectance of TM bands 3, 4, 5 and 7) over the first 21 years of plant succession. The first step was to undertake procedures of pre-processing: geometric registration, atmospheric correction, transformation to reflectance, radiometric normalization between dates and preparation of a composite mask of clouds or cloud shadows for all dates. The areas that underwent erosion or sedimentation were first mapped through the technique of change detection by subtraction of images of the vegetation index AFRI<sub>2,1</sub>, for five intervals of time between 1984 and 2005. However, in the AFRI<sub>2,1</sub> images water and vegetation could not be distinguished, which made it impossible to undertake change detection by subtraction of images with continuous values. The vegetated areas were instead distinguished from soil and from water by thresholds of AFRI and TM band 7, respectively, both within and between images. Changes of state – from soil or water to vegetation (sedimentation) and from vegetation to soil or water (erosion) – were then mapped by observing changes between these thematic images for the five sequential time intervals. There was no significant tendency of positive or negative sediment deposition over time. The sedimentation and the erosion processes were balanced, representing 51.4% and 48.6%, respectively, of the total area that changed state in any moment of the period. There were no significant relationships between either erosion or sedimentation rates and each of the fluvimetric variables examined. The overall rate of lateral migration (erosion + sedimentation) for the Solimões was equivalent to 0.48% of the open-channel surface area per year. The most active migrations were associated with fluvial islands or the confluence of two channels. Those portions of the várzea along the channels that surround RDSM which did undergo some change generally did so only once over the 21 year. Only 5% of the pixels that changed state did so two or more times. Pixels undergoing multiple changes of states were more common along the paraná of Aranapu. Regarding spectral changes during vegetation

succession, the values of  $AFRI_{2.1}$  and of TM band 4, both showed a significant peak between 2 and 9 years of age. The values of NDVI reached a plateau between 2 and 9 years, without dropping significantly afterwards. The behavior of TM band 3 was complementary to the behavior of NDVI, dropping between 2 and 9 years and remaining stable in the subsequent ages. Between 16 and 21 years a significant drop was observed in bands 4 and 5. TM band 7 oscillated within a narrow range of 1% reflectance over the whole period of plant succession, and these differences were not considered reliable.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Dados das imagens do sensor TM utilizadas no estudo (foram empregadas as bandas 3, 4, 5 e 7 em todos os casos). Datas das imagens utilizadas, suas respectivas cotas de inundação e a porcentagem da área utilizada no estudo que está sob cobertura de nuvens. ....	26
<b>Tabela 2:</b> Valores de Lmin e Lmax utilizados na calibração radiométrica das imagens referentes às bandas do Landsat 5 TM. ....	33
<b>Tabela 3:</b> Valores de distância Terra-Sol, ângulo de elevação solar, ângulo zenital, irradiância solar exoatmosférica e o dia Juliano de cada data. ....	33
<b>Tabela 4:</b> Pares de imagens analisados na detecção de mudanças e as respectivas imagens geradas pelo processamento. ....	43
<b>Tabela 5:</b> Valores médios das cotas mínimas e máximas da área da RDSM, obtidos com os dados de inundação do rio Negro (Schöngart <i>et al.</i> , 2005), durante os respectivos períodos, utilizados para realizar a correlação com as taxas de erosão e sedimentação obtidas. ....	45
<b>Tabela 6:</b> Idade aproximada da vegetação, presente nos polígonos mapeados, em cada data da série de vinte e um anos. ....	50
<b>Tabela 7:</b> Erro médio quadrado (RMS) do registro das imagens da série multitemporal. ....	51
<b>Tabela 8:</b> Valores de AFRI encontrados na imagem gerada a partir da cena da data de 24/08/1984 do satélite Landsat 5TM. ....	58
<b>Tabela 9:</b> Valores aproximados de refletância de áreas de vegetação solo e água branca da região de Mamirauá, obtidos da imagem Landsat TM5 de 24/09/1984. ....	58
<b>Tabela 10:</b> Na primeira coluna o total de áreas que não sofreram mudanças, na coluna do meio, a sedimentação, a erosão e o total de áreas que sofreram mudança de estado (sedimentação + erosão); e na última coluna o total da área de estudo. Dados por período e em hectares. ....	63
<b>Tabela 11:</b> Diferentes intervalos de tempo, ampliados com base nas observações reais obtidas e respectivas áreas de sedimentação, erosão e taxa de deposição anual. Os intervalos dentro da caixa azul são os períodos reais medidos. Os valores dentro da caixa verde são os períodos reconstruídos com base nos valores dos períodos da caixa azul. Esses valores foram utilizados na relação entre a taxa de deposição e o intervalo de tempo. ....	69
<b>Tabela 12:</b> Algumas seqüências de mudanças (seqüências de processos) mapeadas, e o número de estados de mudança correspondente. ....	78

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Trechos de várzea entre a foz do rio Juruá e Santarém (polígonos brancos). Sorvedouros de sedimento ocupam progressivamente mais área à jusante. Mosaico Geocover de imagens Landsat de ~1990. Meridianos em intervalos de 5 graus (550 km). ....	8
<b>Figura 2:</b> Mosaico de imagens JERS-1, captadas entre maio e julho de 1996. A oeste de Manaus (círculo vermelho), os rios Solimões, seus tributários e os tributários da margem direita do rio Negro comportam igapós e várzeas extensas (tons claros), evidenciando subsidência tectônica e deposição de sedimentos. Fonte: NASDA/MITI, Global Rain Forest Mappin Project. ....	13
<b>Figura 3:</b> Localização da RDSM (polígono vermelho) no Estado do Amazonas, Brasil, representada por um mosaico de cenas Landsat TM em composição colorida RGB-543. Na imagem menor, à direita, a área focal da RDSM (contorno rosa) delimitada pelos rios Solimões Japurá e paraná do Aranapu.....	22
<b>Figura 4:</b> Mapa geomorfológico da RDSM, adaptado do Projeto RADAMBRASIL (1977). As áreas amarelas representam a planície fluvio-lacustre (Apf), a área marrom representa áreas de terraço fluvial, e áreas de cor laranja representam áreas de acumulação inundáveis.	24
<b>Figura 5:</b> Fluxograma dos pré-processamentos realizados neste trabalho. ....	27
<b>Figura 6:</b> Lago de água preta (sem sedimento) localizado na área subsidiária da reserva, próximo à divisa com a área focal, utilizado como alvo escuro em todas as bandas. Na primeira imagem vemos uma composição colorida de imagem Landsat TM5 de 24/11/2000, e nas demais vemos as bandas 3, 4, 5 e 7 realçadas para visualização da água preta do lago. ....	35
<b>Figura 7:</b> Porção de área da RDSM mostrando um banco de sedimentos e vegetação, entre outros. Na primeira imagem vemos uma composição colorida de imagem Landsat TM5 de 24/11/2000, e nas demais vemos as bandas 3, 4, 5 e 7 realçadas para visualização da refletância dos objetos. ....	35
<b>Figura 8:</b> Exemplo de normalização radiométrica de dados de sensoriamento remoto (a), e imagem normalizada em relação a uma imagem referência. ....	36
<b>Figura 9:</b> Delimitação da área de interesse do estudo em A ( <i>buffer</i> de 3 km dos canais limitantes da reserva), e com a máscara de nuvens e sombras em B. ....	37
<b>Figura 10:</b> Fluxograma dos processamentos realizadas nas imagens Landsat 5TM para as seis datas. ....	38
<b>Figura 11:</b> Imagem Landsat 5TM RGB-543 de 1986 e respectiva imagem índice vegetação AFRI <sub>2,1</sub> , com <i>offset</i> de +10. Note que o valor da água é maior e próximo ao valor da vegetação. ....	40
<b>Figura 12:</b> Em A, imagem Landsat 5TM RGB-543 de 1986. Em B, respectiva imagem índice AFRI <sub>2,1</sub> +10, fatiada no limiar 10,7, onde valores acima desse estão representados pela cor branca e valores abaixo pela cor preta, mostrando a impossibilidade de isolar a vegetação da água.....	41
<b>Figura 13:</b> Na esquerda imagem Landsat 5TM RGB-547 de 1986. Na direita imagem AFRI <sub>2,1</sub> vegetação_não-vegetação correspondente. As áreas de vegetação não incluídas na imagem AFRI <sub>2,1</sub> (na direita) estão coberta por nuvens em alguma outra data. ....	42
<b>Figura 14:</b> Histograma de imagem mudança com limiares hipotéticos, adaptado de Graça (2004). ....	43
<b>Figura 15:</b> Médias mensais das cotas mínimas e máximas de inundação medidas para a estação do rio Negro, próxima à cidade de Manaus (Engenharia dos Portos da Cidade de Manaus). ....	44

<b>Figura 16:</b> Máscara dos rios Solimões e Japurá (polígonos pretos) utilizada na comparação das taxas de erosão e sedimentação entre os dois rios. A área branca dentro dos polígonos refere-se a máscara de nuvens e sombras. ....	46
<b>Figura 17:</b> Esquema representativo da imagem dinâmica. As classes de mudança do pixel em cada período são unidas em um único mapa. Na imagem dinâmica é atribuída uma nova classe ao pixel, que representa a seqüência de classes de mudanças que o determinado pixel apresentou em cada imagem mudança dos períodos analisados. ....	48
<b>Figura 18:</b> Esquema representativo da ferramenta crosstab. Cada quadrado representa um pixel e cada cor representa uma categoria de mudança (classe), e como resultado o programa mostra qual a seqüência de categorias que ocorreu em cada pixel.....	48
<b>Figura 19:</b> Esquema representativo da seleção dos polígonos utilizados na análise da evolução espectral da vegetação nos primeiros anos de colonização e crescimento. ....	49
<b>Figura 20:</b> Curva espectral da água sem sedimento em suspensão em refletância aparente (sem correção atmosférica) e refletância de superfície (com correção), extraída da banda 3 da imagem de 18/10/1986 do satélite Landsat 5/TM. Os valores nas bandas 4, 5 e 7 estão em refletância aparente.....	52
<b>Figura 21:</b> Curva espectral do solo em refletância aparente (sem correção) e refletância de superfície (com correção), extraída da banda 3 da imagem de 18/10/1986 do satélite Landsat 5/TM. Os valores nas bandas 4, 5 e 7 estão em refletância aparente. ....	53
<b>Figura 22:</b> Curva espectral da vegetação em refletância aparente (sem correção) e refletância de superfície (com correção), extraída da banda 3 da imagem de 18/10/1986 do satélite Landsat 5/TM. Os valores nas bandas 4, 5 e 7 estão em refletância aparente.....	53
<b>Figura 23:</b> Gráficos de dispersão dos valores médios dos alvos escuros selecionados para verificação do resultado da normalização radiométrica das imagens. ....	55
<b>Figura 24:</b> Gráficos de dispersão dos valores médios dos alvos claros selecionados para verificação do resultado da normalização radiométrica das imagens. ....	56
<b>Figura 25:</b> Distribuição e freqüência dos pixels da imagem mudança.....	59
<b>Figura 26:</b> Composição RGB543 de imagens Landsat de 25/11/2000 (A) e 04/09/2005 (B) e imagem mudança entre 2000 e 2005 (C). Em A e B, o círculo azul ressalta as áreas que eram vegetação (A) e foram desmatadas para pasto (B) e classificadas como erosão, e o círculo rosa ressalta as áreas desmatadas (A) que viraram vegetação (B) classificadas como sedimentação. Em C as áreas pretas representam áreas classificadas como erosão, bege representa áreas classificadas como sedimentação e laranja representa áreas classificadas como não mudança. ....	60
<b>Figura 27:</b> Diferenças de inundação entre as imagens foram mapeadas como áreas erodidas ou sedimentadas. Em A, imagem Landsat 5/TM de 04/09/2005, composição RGB543. Em B, imagem mudança entre 2000 e 2005. Em B, a cor laranja representa a área de não mudança, preto as áreas classificadas como erosão e bege áreas classificadas como sedimentação. ....	60
<b>Figura 28:</b> Imagens Landsat TM5 composição RGB-543 do ano de 2000 (em A) e 2005 (em B), mostrando grande porção de área erodida (contorno amarelo). ....	61
<b>Figura 29:</b> Porcentagem que as áreas sedimentadas e erodidas representam do total de áreas contabilizadas como mudança. ....	64
<b>Figura 30:</b> Porcentagem anual de áreas de mudança sedimentadas e erodidas em cada período.....	64
<b>Figura 31:</b> Erosão na margem dos rios Solimões (A e B) e na margem do rio Japurá (C), na área de estudo. ....	Fotos: 66
<b>Figura 32:</b> Taxa de deposição em % por ano em cada período e no tempo total estudado.....	67

<b>Figura 33:</b> Valores de taxa de deposição obtidos com os dados brutos (antes de realizada a aplicação do filtro de área e correção manual) de erosão e sedimentação mapeada com a técnica de detecção de mudança por subtração de imagens índice de vegetação. ....	68
<b>Figura 34:</b> Taxa de deposição de sedimentos em relação ao comprimento do intervalo de tempo de estudo. ....	70
<b>Figura 35:</b> Porcentagens de áreas de mudança para os rios Solimões e Japurá, em relação à área de interesse. ....	71
<b>Figura 36:</b> Porcentagens de áreas de sedimentação para os rios Solimões e Japurá, em relação à área de interesse. ....	71
<b>Figura 37:</b> Porcentagens de áreas de erosão para os rios Solimões e Japurá, em relação à área de interesse. ....	72
<b>Figura 38:</b> Aspecto morfológico da margem do rio Solimões, em trechos dominados por processos de erosão (A) e sedimentação (B). ....	73
<b>Figura 39:</b> Aspecto morfológico da margem do rio Japurá, em trechos dominados por processos de erosão (A) e sedimentação (B). ....	73
<b>Figura 40:</b> Taxas anuais de mudança do canal do rio Solimões no trecho da RDSM por período estudado. ....	74
<b>Figura 41:</b> Migração lateral de barras em pontal ocorrida devido a migração lateral do canal, originando ilhas fluviais no trecho do rio Solimões próximo à confluência com o paraná do Aranapu. Coordenadas do canto inferior direito 2° 39' 3.32''S e 65° 15' 9.29''W. ....	75
<b>Figura 42:</b> Formação de ilha fluvial por meio de desvio do canal. Em A imagem Landsat 5TM, composição RGB-543 de 1984. Em B, mesmo local em 2005 (coordenadas de canto inferior direito 2° 24' 51''S e 65° 13' 00''W). ....	76
<b>Figura 43:</b> Imagem dinâmica de mudança. Cada cor representa uma seqüência de mudança, a cor verde clara representa a área de estudo, livre de nuvens e sombras (referente ao <i>buffer</i> de 3 km). ....	77
<b>Figura 44:</b> Porcentagem de área relativa à área total de cada seqüência de mudança mapeada. O código da seqüência representa cada uma das 31 seqüências diferentes que foram mapeadas. ....	78
<b>Figura 45:</b> Frequência de pixels por quantidade de mudanças de estado. Cada ponto representa uma das 31 seqüências de mudança. ....	79
<b>Figura 46:</b> Landsat 5 RGB-543, mostrando a confluência entre o rio Solimões e o paraná do Aranapu. As linhas pretas indicam áreas de seqüências de mudanças que trocaram de estado mais de uma vez (menos freqüentes). Coordenadas do canto inferior direito 2° 27' 21.65''S e 65° 19' 43.79''W. ....	80
<b>Figura 47:</b> Imagem Landsat 5/TM, composição RGB-543 de 04/09/2005. Seqüências de mudanças mais freqüentes representadas por polígonos vermelhos (sedimentação) e amarelos (erosão). A área em branco representa a máscara de nuvens e sombras e área de não interesse. ....	81
<b>Figura 48:</b> Áreas erodidas em faixas alongadas (polígono amarelo) e áreas sedimentadas predominantemente em barras (polígonos vermelhos). Coordenadas do canto inferior direito 2° 48' 43,93''S e 65° 7' 2,38''W. ....	82
<b>Figura 49:</b> Formação de barras na confluência entre o rio Solimões e o paraná do Aranapu. Em imagem Landsat 5TM, composição RGB-543. Coordenadas canto inferior direito 2° 30' 51,27''S e 65° 19' 32,17''W. ....	82
<b>Figura 50:</b> Formação de barras na confluência entre o paraná do Aranapu e o rio Japurá. Em imagem Landsat 5TM, composição RGB-543. Coordenadas canto inferior direito 2° 28' 46,41''S e 65° 8' 28,97''W. ....	83
<b>Figura 51:</b> Fases da evolução da planície holocênica do rio Solimões. Adaptado de Projeto RADAMBRASIL (1977). ....	84

<b>Figura 52:</b> Trecho do rio Solimões em 1975 (Landsat MSS), 1984 (Landsat TM) e 2005 (Landsat TM). Note significativas mudanças, principalmente nas pontas noroeste e sudeste, em regiões de confluência de grandes canais. ....	86
<b>Figura 53:</b> Barra localizada na parte sudeste da área focal, em imagens de 1975 (Landsat MSS), 1984 e 2005 (Landsat TM). Em A, imagem Landsat TM de 2005 indicando a localização da barra (retângulo branco). Note a diminuição do espaço entre a margem da ilha e a margem da reserva, linha vermelha. Em B, C e D é possível visualizar o acréscimo lateral de sedimentos que ocorre na barra, isso irá culminar na colmatagem do paraná e junção da barra ao limite da área focal da RDSM. ....	88
<b>Figura 54:</b> Relação entre os valores dos índices de vegetação AFRI <sub>2.1</sub> e NDVI e a idade aproximada da vegetação. As barras indicam a amplitude de valores encontrados em cada idade. ....	90
<b>Figura 55:</b> Médias dos valores dos índices de vegetação AFRI <sub>2.1</sub> (esquerda) e NDVI (direita). As barras representam +/- 2 erros padrão. ....	91
<b>Figura 56:</b> Média dos valores de refletância nas bandas 3, 4, 5 e 7 em florestas de várzea jovem em diferentes idades. Na primeira coluna de gráficos, as barras indicam a amplitude de valores encontrada para cada idade. Na segunda coluna as barras indicam +/- 2 erros padrão (n = 24). ....	92

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	4
2.1 Objetivo geral .....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. Referencial teórico.....	5
3.1 Sistema fluvial amazônico.....	5
3.2 Ecossistemas de águas interiores e as várzeas amazônicas .....	7
3.3 A migração do canal influenciando a planície fluvial .....	10
3.4 As florestas de várzea amazônicas .....	14
3.5 Sensoriamento remoto .....	17
3.5.1 Imagens multitemporais .....	18
3.5.2 Sensoriamento remoto nas várzeas amazônicas .....	19
4. Materiais e Métodos .....	22
4.1 Área de Estudo .....	22
4.1.1 Aspectos ambientais .....	23
4.2 Materiais e equipamentos .....	25
4.3 Metodologia.....	25
4.3.1 Escolha das imagens de sensoriamento remoto.....	25
4.3.2 Pré-processamentos das imagens ópticas .....	26
4.3.2.1 Georreferenciamento e registro .....	28
4.3.2.2 Correção atmosférica.....	28
4.3.2.3 Transformação de valores em número digital (ND) para valores de refletância ( $\rho$ ) ....	31
4.3.2.4 Normalização radiométrica .....	33
4.3.2.5 Máscara de nuvens e área de interesse do estudo.....	36
4.3.3 Processamentos das imagens ópticas.....	37
4.3.3.1 Determinação e mapeamento das áreas erodidas e sedimentadas .....	38
4.3.3.1.1 Criação da máscara vegetação/não vegetação.....	39
4.3.3.1.2 Determinação das áreas erodidas e sedimentadas .....	42
4.3.3.1.3 Relação entre as taxas de erosão/sedimentação e as cotas de inundação da área de estudo nos períodos estudados.....	44
4.3.3.1.4 Comparação entre as taxas dos rios Solimões e Japurá.....	45
4.3.3.2 Determinação da taxa de mudança do canal.....	46
4.3.3.3 Criação da imagem de dinâmica das áreas de erosão e sedimentação .....	47
4.3.3.4 Análise da mudança da resposta espectral em vegetação jovem ao longo do seu crescimento.....	48
4.3.3.4.1 Determinação dos atributos espectrais da vegetação.....	50
5. Resultados e Discussão.....	51
5.1 Técnicas de pré-processamentos das imagens.....	51
5.1.1 Correção geométrica e registro.....	51
5.1.2 Correção Atmosférica.....	52
5.1.3 Normalização radiométrica .....	54
5.2 Técnicas de processamentos das imagens .....	57
5.2.1 Imagens índice de vegetação <i>Aerosol Free Vegetation Index</i> – AFRI.....	57
5.2.2 Detecção de mudanças por subtração de imagens índice de vegetação .....	59
5.3 Evolução e dinâmica da paisagem da RDSM de 1984 a 2005 .....	62
5.3.1 Mapeamento de áreas erodidas e sedimentadas e relação com os dados fluviométricos	62

5.3.2 Diferença entre as taxas de sedimentação e erosão entre os rios limitantes da área focal .....	71
5.3.3 Taxa de migração lateral e dinâmica de mudança do canal fluvial .....	73
5.3.4 Considerações finais .....	89
5.4 Comportamento do padrão espectral da vegetação nos primeiros vinte e um anos de sucessão .....	90
5.4.1 Resultado dos Índices de vegetação AFRI <sub>2,1</sub> e NDVI .....	90
5.4.2 Resultado dos valores de refletância nas bandas 3, 4, 5 e 7 .....	91
5.4.3 Discussão dos resultados obtidos .....	93
6. Conclusão .....	94
7. Referências Bibliográficas.....	97
8. Anexo .....	114
8.1 Anexo 1 .....	114
8.2 Anexo 2 .....	116

## 1. Introdução

As florestas alagadas são um dos vários tipos de ecossistemas do bioma amazônico e representam uma área de 6% da bacia amazônica, ou cerca de 300.000 km<sup>2</sup>, aproximadamente (Hess *et al.*, 2003; Junk & Piedade, 2005). Junk *et al.* (1989) definiram as florestas alagadas da seguinte maneira “...são áreas periodicamente inundadas por fluxo lateral de rios em lagos ou por precipitação direta em água subterrânea; o ambiente físico-químico resultante, produz uma resposta morfológica, anatômica, fisiológica, fenológica e etológica da biota a qual também responde com estruturas de comunidades muito características”.

As florestas alagadas podem ser divididas em dois tipos de acordo com suas características químicas e biológicas (Prance, 1979). Os igapós ( $\approx 100.000$  km<sup>2</sup>) são áreas alagadas periodicamente por ciclos anuais regulares de inundação de rios e lagos de águas pretas e claras, pobres em nutrientes (Ayres, 1993; Prance, 1979). As várzeas ( $\approx 200.000$  km<sup>2</sup>) são alagadas por rios e lagos de águas brancas, caracterizados por apresentarem alta concentração de sedimentos, substâncias inorgânicas dissolvidas e alta concentração de nutrientes minerais (Furch, 1984; Junk, 1984; Linna, 1993; Sioli, 1950; Tundisi *et al.*, 2002).

As várzeas constituem a maior porção de florestas inundáveis em regiões tropicais (Ayres, 1993) e são ecossistemas ricos em termos de produtividade biológica, biodiversidade e recursos naturais, devido à renovação de nutrientes que ocorre anualmente por meio de elevações no nível da água dos rios (Ayres, 1993; Furch, 1997; Irion *et al.*, 1997; Junk, 1993; Wittmann *et al.*, 2002). A elevação anual no nível da água dos rios amazônicos, caracterizada como pulso de inundação, é consequência de fatores que envolvem a sazonalidade da precipitação e as características do relevo da bacia de drenagem (Junk *et al.*, 1989). A amplitude média de inundação é cerca de 10 m na Amazônia Central, podendo atingir até 20 m, e durar até 270 dias por ano, dependendo da elevação do local (Irion *et al.*, 1997).

O rio principal e seus afluentes influenciam as florestas alagadas por meio do regime hidrológico, erosão e deposição de sedimentos, entrada e saída de substâncias dissolvidas, e troca de organismos (Junk, 1997). A atividade fluvial é fator determinante na construção da fisionomia da paisagem da várzea (Sternberg, 1998).

Os rios fluem sobre formações sedimentares por eles depositadas e, ao longo do tempo, conforme a intensidade do fluxo e altura da inundação pode erodir e depositar, criando

uma topografia e solo que favorecem o estabelecimento de formações vegetais, as quais atuam como agentes de preservação ou não de certas feições, caracterizando uma interação entre a vegetação e geomorfologia do terreno (Junk *et al.*, 1989; Sternberg, 1998; Wittmann *et al.*, 2002; Worbes *et al.*, 1992).

A deposição de sedimentos, formação e erosão de bancos e colonização pioneira são processos muito dinâmicos nas várzeas amazônicas (Kalliola *et al.*, 1991). As taxas de sedimentação podem alcançar 0,3-1 m todos os anos (Campbell *et al.*, 1992; Junk *et al.*, 1989). Ao mesmo tempo, a erosão pode levar vários hectares de florestas durante o período de cheia (Wittmann, 2001 *apud* Wittmann *et al.*, 2004). A geomorfologia do terreno e a intensidade com que esta é afetada por fatores como clima, hidrologia, tectônica e processos de erosão e sedimentação determinam a dinâmica do ambiente, podendo causar rápidas mudanças nas florestas alagadas. Isto implica na constante deposição de substratos novos para o desenvolvimento de atividades químicas e biológicas, ao mesmo tempo em que destroem substratos depositados anteriormente, resultando na formação de um mosaico de micro habitats, que propiciam diferenças importantes na estrutura e composição florística da várzea (Campbell *et al.*, 1992; Kalliola *et al.*, 1991; Mertes, 1985; Tuomisto, 1993).

A dinâmica fluvial e a renovação da floresta alagada por meio da sedimentação e erosão constituem importantes controles da diversidade ecológica dos corredores de rio (Kalliola *et al.*, 1991; Marston *et al.*, 1995; Richards *et al.*, 2002; Salo *et al.*, 1986).

A floresta alagada do rio Solimões/Amazonas compreende 28% das áreas alagáveis da Amazônia Central (Hess *et al.*, 2003). Devido à riqueza em recursos naturais, fertilidade do solo e facilidade de acesso, a várzea é um dos ecossistemas mais influenciados pela atividade humana na Amazônia (Junk, 2000; Ohly, 2000). Cerca de 50% da população rural dos estados do Amazonas e Pará vive na várzea e utilizam os recursos desse ecossistema para a sobrevivência (Pereira, 2004), onde as principais atividades econômicas são: a pesca e a caça, a agricultura e a exploração de recursos florestais madeireiros e não madeireiros (Junk, 1980; Wittmann *et al.*, 2004).

A determinação do potencial de utilização racional dos recursos naturais da várzea amazônica depende de sua caracterização e conhecimento de sua distribuição espacial (Palha *et al.*, 2003). Um método que vem sendo amplamente utilizado para a ampliação desse conhecimento é a análise de produtos de sensoriamento remoto. Atualmente, com a disponibilidade de dados provenientes de diversos instrumentos de observação terrestre, em diferentes níveis de aquisição (terrestre, aéreo e orbital) e de resolução (espacial, temporal, espectral e radiométrica), aumenta-se a capacidade de realizar inferências sobre o meio

ambiente com maior confiabilidade. Várias discussões apontam para a necessidade de desenvolver, na região amazônica, trabalhos envolvendo múltiplas fontes de dados de sensoriamento remoto e de trabalho de campo, para uma melhor compreensão das características e distribuição da vegetação e dos diferentes tipos de uso da terra (Espírito-Santo, 2003).

Estudos detalhados sobre a distribuição espacial e dinâmica estacional de fatores hidrológicos, físicos, químicos e biológicos, e os fatores ambientais que os afetam, são essenciais para o entendimento da dinâmica deste ecossistema (Junk *et al.*, 1989; Palha *et al.*, 2003; Tundisi *et al.*, 2002).

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a dinâmica de processos de erosão e sedimentação de áreas vegetadas ao longo dos canais que delimitam a área focal da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM) durante um período de vinte e um anos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Mapear e monitorar as áreas erodidas e sedimentadas ao longo dos rios Solimões, Japurá e Paraná do Aranapu, em cinco intervalos de tempo compreendidos entre os anos de 1984 a 2005;
- Verificar se há relação entre as taxas de erosão e sedimentação mapeadas e as cotas mínimas e máximas de inundação da área de estudo nos períodos estudados;
- Verificar se existe uma tendência líquida de sedimentação/erosão dentro do período estudado;
- Verificar se ocorre diferença entre as taxas de erosão e sedimentação dos rios Solimões e Japurá;
- Determinar a taxa de mudança do canal do rio Solimões no trecho estudado;
- Verificar o comportamento das variáveis espectrais  $AFRI_{2,1}$ , NDVI e refletância nas bandas TM 3, 4, 5 e 7 ao longo do crescimento da vegetação que coloniza os bancos de sedimento recém depositados.

### 3. Referencial teórico

#### 3.1 Sistema fluvial amazônico

A bacia amazônica abrange uma área de drenagem de 6.112.000 km<sup>2</sup> e recebe uma precipitação média da ordem de 2.460 mm/ano, considerada a maior bacia hidrográfica do mundo (Salati *et al.*, 2002). O sistema fluvial amazônico é dividido em três grandes grupos, de acordo com qualidades físicas e químicas, em rios de água preta, clara e branca (Sioli, 1976).

Segundo Sioli, as características dos três tipos de águas da bacia amazônica são determinadas pelas condições geomorfológicas e/ou litológicas e pedológicas existentes nas regiões de suas nascentes. Os rios de água clara, como o rio Tapajós, estão relacionados a áreas de relevo suave e nivelados, sendo caracterizados por baixo transporte de sedimentos argilosos e abundância em praias e bancos de areia. Os rios de águas pretas, como o rio Negro, são encontrados sobre terrenos planos, com solos podzólicos e arenosos (Soares, 1991 apud IBGE, 1991). São caracterizados pela cor escura da água, consequência da dissolução de substância húmicas, fornecida pela vegetação florestal de igapó que se desenvolve nas áreas inundáveis das suas nascentes e margens (IBGE, 1991; Sioli, 1976).

Com exceção dos rios Juruá, Purus e Branco, os rios de água branca (por exemplo, rio Solimões/Amazonas) possuem as cabeceiras situadas em regiões montanhosas dos Andes Central Tropical. Nessas áreas ocorre intensa erosão de sedimentos produzidos pela decomposição da crosta terrestre, os quais são transportados pela água até as partes mais baixas, tornando-se responsáveis, ao se depositarem, pela formação de vastos terrenos aluviais da várzea (Sioli, 1976; Tundisi *et al.*, 2002). Os rios de água branca são ricos em íons orgânicos dissolvidos e apresentam pH mais ou menos neutro, porém não dispõem de produção primária em forma de fitoplâncton autóctone ou de plantas submersas, devido à turbidez da água que impede a penetração da luz, sendo as macrófitas aquáticas flutuantes e emergentes de extrema importância para sua produção primária (Junk, 1980; Junk & Piedade, 1997; Salati *et al.*, 2002; Sioli, 1976).

A grande extensão da área de drenagem, juntamente com a elevada precipitação, explicam o imenso volume de água do rio Solimões/Amazonas, que apresenta uma descarga

estimada 175.000 m<sup>3</sup>/s, carga de sólidos totais dissolvidos e em suspensão estimadas em 1.190 x 10<sup>6</sup> ton./ano, e área de drenagem de cerca de 5.711.000 km<sup>2</sup> (Neiff *et al.*, 1994; Sioli, 1984; Tundisi, 1994). O rio Amazonas nasce na região dos Andes peruanos, assim que entra no Brasil, ele passa a ser chamado de rio Solimões, até a confluência com o rio Negro, próximo à cidade de Manaus, onde volta a se chamar rio Amazonas.

Sioli (1984) dividiu a bacia amazônica em três grandes áreas com base nas zonas de nascentes dos rios e na história geológica da bacia. A bacia alta (desde a base dos Andes até próximo a confluência com o rio Negro) é caracterizada por grandes vales formados por erosão, próximo da região andina, e rios meândricos na parte mais baixa, como o Juruá e o Purus. A bacia média é delimitada pelos escudos da Guiana e Brasil Central ao Norte e Sul, respectivamente. Neste trecho o rio Solimões desenvolve meandros apenas localmente, talvez devido a diferenças na proporção de descarga, gradiente e velocidade da corrente (Sioli, 1984). A maior parte do fundo do vale, preenchida com aluviões recentes de origem andina, forma vastas planícies alagadas, as várzeas. A paisagem fluvial é constantemente transformada por meio de processos de erosão e sedimentação. A bacia baixa, parte mais ao leste, abrange a região estuarina.

A sazonalidade da precipitação, o relevo predominantemente baixo, e o degelo dos Andes provocam uma elevação sazonal no nível da água, caracterizado como pulso de inundação, que é responsável pela complexidade dos ecossistemas aquáticos da região (Junk, *et al.*, 1989). Os afluentes do rio Solimões/Amazonas são provenientes parte do hemisfério sul e parte do hemisfério norte, fazendo com que o regime do rio apresente variações características. O canal principal formador do Amazonas, o Apurimac-Ucayale e seu principal afluente, o Marañon, são provenientes da região Andina, e os afluentes da margem direita localizam-se no hemisfério sul, recebendo precipitações maiores no período do verão (outubro-março). Por outro lado os afluentes da margem esquerda, com suas nascentes no hemisfério norte, recebem precipitações máximas no período de maio-julho. Esta situação faz com que sejam observados diferentes níveis de variação na inundação ao longo do curso do Solimões/Amazonas, dependendo das características e dimensões da bacia e das precipitações (Salati, 1985; Salati *et al.*, 2002).

O aumento de vazão do rio Solimões causa uma elevação no nível da água de até 20 m, na região do médio Solimões, próximo à boca do rio Juruá. Na Amazônia Central a inundação máxima ocorre nos meses de junho-julho e a elevação mínima nos meses de outubro-novembro. Com essas flutuações regulares entre as estações secas e chuvosas, os níveis do rio apresentam uma curva monomodal de flutuação (Irion *et al.*, 1997; Junk *et al.*

1989; Piedade *et al.*, 2000). As inundações promovem a interação entre os ambientes terrestres e aquáticos, criando uma zona de transição entre estes e influenciando as características limnológicas, ecológicas e biológicas desses corpos de água e das comunidades que vivem e se utilizam dele (Junk, *et al.*, 1989; Junk, 1997; Sternberg, 1998, Worbes, 1997). O pulso de inundação é caracterizado pela variação no nível de inundação e, junto com umidade, nutrientes e fonte de sedimentos, promove oportunidades de regeneração de habitats e plantas. Variações nas taxas de erosão e sedimentação resultam em um mosaico de habitats característicos das florestas alagadas (Richards *et al.*, 2002).

### **3.2 Ecossistemas de águas interiores e as várzeas amazônicas**

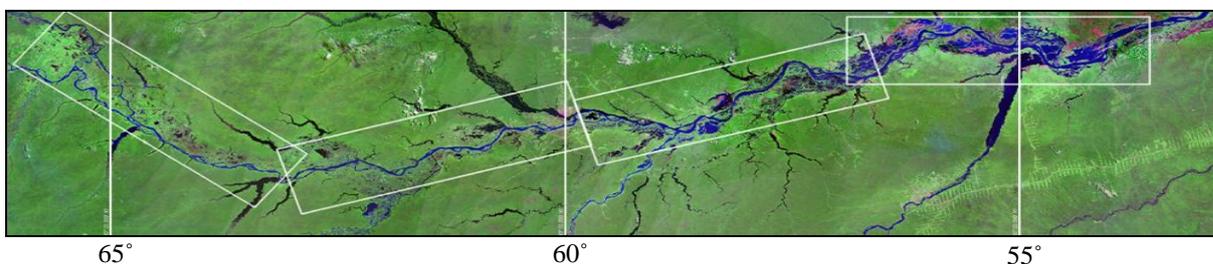
A maioria dos ecossistemas continentais da América do Sul e, particularmente, das regiões tropicais e subtropicais do Brasil, foram estabelecidos em função de eventos geológicos e geomorfológicos ocorridos no Quaternário (Tundisi *et al.*, 2002). A paisagem amazônica é formada por processos geológicos do Quaternário em uma extensão bem mais ampla do que era considerado como verdade até alguns anos atrás. Isto é particularmente perceptível na paisagem amazônica pela vasta cobertura de sedimentos principalmente da era pleistocênica em grande parte de suas áreas baixas (Irion *et al.*, 1997).

A gênese das florestas alagadas recentes dos rios Amazônicos foi fortemente influenciada por mudanças no nível do mar durante os períodos glaciais (Sioli, 1957; Irion, 1984). Segundo Fairbridge (1961 apud Junk, 1984), a flutuação do nível do mar nesse período alcançou 130 m diversas vezes. Durante os máximos glaciais, elevado volume de água esteve confinado nas calotas polares e em geleiras que cobriam grande parte dos hemisférios Norte e Sul. Durante esses períodos, os rios escavaram vales sobre depósitos terciários, na Amazônia Central, devido à diminuição do nível de base (Junk, 1984). Nos períodos interglaciais, o aumento do nível do mar criou barreiras, isolando rios em seus próprios vales, reduzindo a velocidade da correnteza e, assim, favorecendo a deposição fluvial nos rios. O nível do mar caiu e, quando voltou a se elevar, os processos de sedimentação se iniciaram novamente nos largos vales dos rios.

Rossetti *et al.* (2005) caracterizaram cinco sucessões sedimentares ao longo do rio Solimões/Amazonas, por meio da interpretação de imagens de radar, que incluem a Formação Içá (Plio-Pleistoceno) e depósitos do Quaternário. Os autores afirmam que a Amazônia, ao

longo do Neógeno-Quaternário, se caracterizou por freqüentes mudanças na paisagem induzidas, provavelmente, por fatores climáticos e também tectônicos.

De acordo com Klammer (1984), o rio Amazonas, apesar da grande quantidade de sedimentos em suspensão, ainda não preencheu completamente seus vales. Grandes sorvedouros de sedimento ainda estão presentes nos trechos mais a jusante da várzea (figura 1). São lagos que se tornam progressivamente maiores ao leste do meridiano 65° W. O lago grande contém deltas internos e, em longo prazo, se espera a deposição de sedimentos nestes trechos. Mais a montante o vale pleistocênico entalhado pelo Solimões foi preenchido com sedimento desde a última subida do nível de base. Ali se espera que haja atualmente um equilíbrio entre erosão e deposição.



**Figura 1:** Trechos de várzea entre a foz do rio Juruá e Santarém (polígonos brancos). Sorvedouros de sedimento ocupam progressivamente mais área à jusante. Mosaico Geocover de imagens Landsat de ~1990. Meridianos em intervalos de 5 graus (550 km).

Campbell e Frailey (1977, apud Rasanen *et al.*, 1987) sugeriram que toda a floresta do oeste da Amazônia é formada por terrenos aluviais holocênicos, promovendo “ilhas” de comunidades florestais em um estágio de desequilíbrio supersaturado. Colinvaux *et al.* (1984 apud Rasanen *et al.*, 1987) propuseram que a alta diversidade de espécies das florestas alagadas dos rios Napo e Aguarico é mantida por distúrbios hidráulicos, especificamente cheias catastróficas, as quais causam distúrbios intermediários nas planícies alagáveis. A longa história de perturbações fluviais e sedimentação nos ecossistemas da Amazônia ocidental sugerem que a distinção entre várzea e terra firme é na verdade uma série temporal, do presente até velhos leitos aluviais. A dinâmica de rios tem um enorme valor na manutenção dos processos das planícies alagáveis amazônicas (Rasanen *et al.*, 1987).

De acordo com Irion (1976) e Irion *et al.* (1997) a várzea pode ser dividida em dois tipos, de acordo com a época em que os sedimentos foram depositados. A várzea pleistocênica, mais antiga e formada durante períodos interglaciais primários, ocorre em áreas que não foram erodidas completamente. Os depósitos mais recentes são chamados de

planícies inundáveis do Holoceno, e se encontram em uma elevação topográfica mais baixa que os depósitos do Pleistoceno.

Segundo Mertes (1985), Kalliola *et al.*, (1991), Richards *et al.* (2002), Salo *et al.* (1986), Sternberg (1998), Wittmann *et al.* (2002 e 2004), entre outros, a migração e a deposição de sedimentos em canais fluviais são grandes responsáveis pela modificação das florestas alagadas. Estudos realizados sobre acumulação de sedimentos nas florestas alagadas descrevem os diversos padrões de deposição, profundidade e extensão das áreas sedimentadas utilizando métodos como modelos numéricos, análise do tamanho dos grãos, mapeamento por imagens de satélite (Dunne *et al.*, 1998; Mertes, 1994; Nicholas & Walling, 1997), e outros que comprovam a influência do El Niño nas taxas de erosão e sedimentação dos rios amazônicos nas várzeas bolivianas (Aalto *et al.*, 2003).

Salo *et al.* (1986), por meio de imagens Landsat, observaram que 26,6% das florestas de várzea peruanas apresentavam características de processos recentes de erosão e sedimentação. Durante um período de 13 anos a taxa de erosão foi de 12 m/ano e o total de área depositada sujeita à colonização primária foi de 12 km<sup>2</sup> (3,7% da área total de um estudo focal).

Rozo *et al.* (2005), analisando imagens de satélite, verificaram certa estabilidade na migração lateral do canal do rio Amazonas entre a ilha do Careiro e a foz do rio Madeira no período de 08/1986 a 08/2001. No entanto, os autores notaram intensos processos de erosão e/ou sedimentação em determinadas áreas, assim como Mertes *et al.* (1996) que apontaram uma taxa de migração de 140 m/ano do rio Amazonas próximo à cidade de Fonte Boa/AM.

De acordo com Kalliola *et al.* (1991), a dinâmica das florestas alagadas se mostra mais complexa na região do alto Amazonas, onde há predominância de largos mosaicos de planícies de inundação e regiões de interflúvio, as quais sustentam extremas variações dentro do sistema fluvial, promovendo alterações na paisagem induzidas por mudanças do canal. Conforme ocorre a migração do canal, velhos meandros vão se afastando do canal principal e transformam-se em lagos; novos meandros se formam, e toda a área adjacente ao canal permanece em um constante e rápido processo de destruição e construção, processo esse que pode ser observado em uma escala de tempo de poucas décadas (Sioli, 1984).

Ainda faltam estudos que decifrem a distribuição espacial e temporal de eventos de acumulação individuais ao longo de sistemas fluviais largos, dinâmicos e dispersos (Aalto *et al.*, 2003).

### 3.3 A migração do canal influenciando a planície fluvial

Os rios, ao escoarem pelo seu percurso, transportam o excedente de água da bacia hidrográfica e os materiais resultantes da meteorização da mesma, organizando os processos de erosão, deposição e transporte dos detritos (sólidos e dissolvidos). Essa organização gera segmentos nos rios com predomínio de processos agradacionais alternados por segmentos com predomínio de processos denudacionais ou apenas de transporte de matéria. A ordenação desses segmentos obedece às determinações do sistema fluvial, cada qual com uma função específica, modelando a paisagem e criando diversas formas de relevo, entre elas a planície fluvial (Christofolletti, 1981).

Segundo Ab'Saber (2000), a planície fluvial é uma área de sedimentação ativa, oriunda do transbordamento das águas carregadas de sedimentos nas margens dos rios. O entrelaçamento dos processos de erosão e sedimentação, no tempo e no espaço, produz complexos de formas topográficas que surgem como resposta a ambientes de sedimentação, caracterizando as planícies de inundação, os deltas, os cones aluviais e as formações sedimentares (Christofolletti, 1981).

As planícies fluviais podem ser consideradas como áreas de transporte e armazenamento temporário de sedimentos. Os contínuos processos de sedimentação e erosão determinam o balanço sedimentar da planície. A quantidade de carga detrítica fornecida a montante deve ser igual a carga lançada a jusante. Se não, a planície fluvial ficaria totalmente ocupada por sedimentos, ficando em posição topográfica mais elevada que o canal. Nessa condição hipotética, os transbordamentos não mais alcançariam a planície, fazendo com que o leito fosse paulatinamente assoreado.

A troca de sedimentos entre o canal fluvial e a floresta alagada, em cada trecho do canal, pode ocorrer por transporte de sedimentos suspensos no leito, tributários que carregam sedimentos em suas águas, erosão e sedimentação nas margens do canal e também sobre a floresta alagada (Mertes *et al.*, 1996; Dunne *et al.*, 1998).

Segundo Christofolletti (1981), os processos de sedimentação e erosão que ocorrem na planície fluvial estão ligados a migração lateral do canal por meio da remoção e mobilização dos materiais depositados. Na época de transbordamento do rio, os sedimentos são depositados sobre barreiras de sedimentos já existentes, localizadas nas margens dos rios (diques marginais), e no interior da floresta alagada, quando a altura da água ultrapassa o dique, caracterizando os processos de deposição vertical. Dispostos transversalmente aos diques marginais ficam estruturas denominadas sulcos (ou bacias de rompimento) que

possuem estrutura sedimentar mais grosseira que os diques. Esses sulcos podem ser erodidos com o escoamento de parte da vazante do canal, dando origem a ilhas, ramificando ou até mesmo mudando o curso do canal.

Outro padrão de terras erodidas são os deslizamentos bruscos e de conjunto, de extensas faixas ribeirinhas, que ocorrem devido a variações, durante as vazantes, da pressão hidrostática e ocorrem quando o limite de retenção da água pelas argilas é atingido, promovendo o fenômeno de “terras caídas” (IBGE, 1991). Conforme descrito por Sternberg (1998), nos locais onde a corrente entra em contato com o banco, redemoinhos deslocam o sedimento da base dos terrenos aluviais até destruírem-na, provocando a erosão de determinada porção de terra, dependendo da magnitude da cheia, este processo é conhecido como solapamento das margens por erosão lateral do talvegue. Parte do material lançado ao rio pelas terras caídas freqüentemente acumula-se em grandes massas no seu leito. Quando essas áreas afloram na vazante, germinam as sementes depositadas sobre ela pelas águas na cheia, surgindo uma vegetação pioneira e novas ilhas desenvolvem-se no canal (Figueiredo, 1941 apud IBGE, 1991).

Com a erosão no lado côncavo da curva meândrica, o material é transportado e depositado logo a jusante no lado convexo da mesma margem (Christofoletti, 1981). A deposição dos sedimentos ocorre nas margens dos rios pela atividade do fluxo, os sedimentos são dispostos em barras inclinadas, formando cordões marginais convexos em forma de cristas (conhecidos também como barras de pontal, “*point bars*” em inglês). No período de águas baixas, essa barreira fica exposta e é colonizada pela vegetação pioneira, estabelecendo um novo arco de crescimento (Sternberg, 1998).

De acordo com a curva de distribuição de Hjulstrøm (1934), existe uma linha crítica de velocidade da correnteza, abaixo da qual as partículas de sedimento são depositadas ou transportadas pela correnteza, dependendo da velocidade e do tamanho da partícula. As partículas de argila, por exemplo, necessitam de maior energia para serem erodidas, devido a capacidade de se agruparem. Uma vez erodidas, são facilmente transportadas pela corrente, devido ao seu pequeno tamanho. Necessitando também de baixa velocidade da corrente para serem depositadas.

Gilvear *et al.* (1999) verificou que as taxas de erosão são dependentes do ângulo de curvatura do meandro, menores graus (curvas mais fechadas) apresentam maiores taxas de erosão. Nas margens laterais externas dos meandros do canal principal esses efeitos tendem a ser mais acentuados, pois a velocidade da corrente é maior por ser um local aberto, sem muitos impedimentos para o fluxo da água, como ilhas.

Os fatores físicos que determinam a organização dos processos de transporte, erosão e sedimentação presentes na água, combinam-se diferentemente ao longo da bacia de drenagem, produzindo distintos padrões de canal fluvial (Christofolletti, 1981). De uma maneira geral, existem três tipos básicos de padrão de canal fluvial, segundo Leopold e Wolman (1960), determinados pelo índice de sinuosidade do canal, dado pelo coeficiente entre o comprimento do canal e do vale em determinado trecho. O canal retilíneo possui baixa sinuosidade, em relação à sua largura, e geralmente está associado a planícies fluviais estreitas. Apesar de o canal ser retilíneo, a presença de carga detrítica na água provoca uma tendência à formação de soleira e depressões.

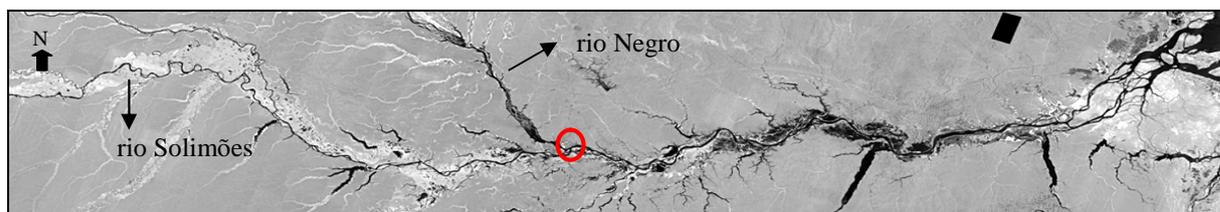
Os rios meândricos possuem elevada sinuosidade, e descrevem curvas harmônicas e semelhantes. Pelas características do fluxo, ocorre degradação nas margens côncavas e deposição nas margens convexas, que determinam o processo de divagação meândrica. O canal desloca horizontalmente suas curvas tanto a jusante como lateralmente. Essas formas meandantes representam um estado de estabilidade do canal. A parte da planície ocupada pelos meandros atuais e paleoformas é denominada faixa de meandros. O padrão anastomosado é o canal ramificado em diversos canais menores. O grande volume de carga detrítica de fundo, aliado a condições de fluxo, promove o surgimento dos bancos de sedimentos ou ilhotas, que causam a ramificação do canal principal. Devido à baixa resistência de suas margens, entre os períodos de cheia e vazante as dimensões e posições dos canais se alteram, provocando indefinição de suas margens.

O mesmo rio pode apresentar diferentes padrões de canal em cada trecho. Dependendo de algumas condições, como velocidade do fluxo, gradiente e tamanho e quantidade de sedimentos, um canal retilíneo pode se transformar em um canal meândrico, ou mesmo anastomosado (Silva, 1997).

O desenvolvimento das bacias de inundação e de seus depósitos está relacionado ao padrão do canal. Os canais meândricos, devido ao processo de divagação meândrica, apresentam mais deposições por acréscimo lateral do que vertical, promovendo rápida migração lateral do canal (Christofolletti, 1981). Os canais anastomosados com rápida migração lateral demonstram padrão semelhante de deposição sedimentar. Os canais de migração lateral mais lenta, como os retilíneos, apresentam mais processos de deposição vertical.

Normalmente, os rios que se originam nos Andes formam cursos trançados e anastomosados próximos ao sopé da cordilheira devido a abrupta diminuição da competência fluvial, dando origem a um padrão meandriforme a jusante (Puhakka *et al.*, 1993). A estrutura

do ciclo de sedimentação fluvial depende do tipo do rio. Os cursos meandriformes depositam suas frações mais grossas nas áreas mais próximas ao canal, normalmente nos diques marginais, e os sedimentos mais finos são depositados no interior da planície fluvial, criando uma heterogeneidade na superfície do solo. No entanto, em alguns lugares caracterizados pela subsidência, a sedimentação durante as enchentes pode atuar como um agente de homogeneização da superfície, porque os sedimentos finos cobrem a distribuição anterior da deposição de sedimentos (Linna, 1993). Trechos da Amazônia que sofreram mais subsidência são identificados pela maior extensão de florestas inundadas (Forsberg *et al.*, 2000). Nas zonas de soerguimento, os canais de rios amazônicos são mais entrincheirados entre margens de terra firme. Estas feições são observadas no mosaico de imagens do radar orbital JERS-1, captadas no período de cheia (figura 2).



**Figura 2:** Mosaico de imagens JERS-1, captadas entre maio e julho de 1996. A oeste de Manaus (círculo vermelho), os rios Solimões, seus tributários e os tributários da margem direita do rio Negro comportam igapós e várzeas extensas (tons claros), evidenciando subsidência tectônica e deposição de sedimentos. Fonte: NASDA/MITI, Global Rain Forest Mappin Project.

As planícies fluviais estão intrinsecamente relacionadas com os mecanismos do canal. A planície de inundação surge como resposta alometricamente ajustada à magnitude e frequência das cheias, que se torna a principal responsável pelo controle da largura e das características geométricas da planície (Perez Filho e Christofolletti, 1977). A ocorrência de uma inundação de certa magnitude promove diferentes efeitos na dinâmica do canal, dependendo da condição inicial do padrão do canal antes do evento. A dinâmica do canal está diretamente ligada ao surgimento de novas superfícies para colonização e regeneração, sendo necessários estudos focados em modelos que melhorem a compreensão sobre as conseqüências ecológicas da migração e dinâmica do canal (Richards *et al.*, 2002).

### 3.4 As florestas de várzea amazônicas

Comunidades estabelecidas em locais com alto grau de perturbações nunca atingem uma condição de equilíbrio estável, pois a frequência de distúrbios naturais e as taxas de mudança do ambiente são mais rápidas que as taxas de recuperação (Connell, 1978). Estudos sobre as conseqüências que a migração do canal causa na diversidade de habitats e comunidades de vegetação nas florestas alagadas são ferramentas importantes para propostas de restauração desses ecossistemas bem como indicam a sustentabilidade da diversidade local (Richards *et al.*, 2002).

A distribuição da vegetação nas florestas alagadas é determinada por diversos fatores, entre eles a duração das fases terrestre e aquática e a estabilidade do habitat, influenciado pelos processos de erosão e sedimentação, promovendo uma zonação característica de grupos de espécies ao longo do gradiente de inundação (Junk & Piedade, 1997; Wittmann & Junk, 2003; Wittmann *et al.*, 2004). A diversidade de espécies aumenta com a diminuição da altura da inundação e da dinâmica fluvial, visto que a deposição e erosão periódicas de sedimentos afetam o banco de sedimentos e o recrutamento de sementes e plântulas (Ayres, 1993; Campbell *et al.*, 1992; Cattanio *et al.*, 2002; Junk *et al.*, 1989; Lamotte, 1990; Metzger *et al.*, 1997; Parolin *et al.*, 2002; Puhakka e Kalliola, 1993; Wittmann *et al.*, 2002, 2004). A inundação das várzeas por águas brancas ricas em nutrientes resultam em uma alta fertilidade do solo e, correspondentemente, um alto conteúdo de bioelementos em todos os compartimentos das árvores desses ambientes (Furch *et al.*, 1983; Klinge *et al.*, 1995).

A área geográfica da várzea é caracterizada por uma alta diversidade de habitats, podendo ser dividida em três tipos, dois deles localizados nas terras mais altas, considerados áreas de floresta (várzea alta e várzea baixa) e o outro nas terras mais baixas (chavascais) (Ayres, 1993; Wittmann *et al.*, 2002).

Wittmann *et al.* (2002) observaram importantes diferenças florísticas e estruturais entre as áreas de várzea baixa e alta, . Tanto as áreas de várzea baixa como as de várzea alta são caracterizadas pela dominância de espécies arbóreas típicas, provavelmente definidas por sua adaptação à duração das inundações anuais.

Nas áreas de várzea baixa a sucessão natural resulta em diferentes tipos de formações florestais, onde a diversidade de espécies e a complexidade estrutural aumentam conforme o aumento da idade média da floresta. A altura da inundação pode variar entre 7,5 a 8 metros, e a área pode ficar submersa por até 228 dias por ano (Wittmann *et al.*, 2002). O estágio sucessional inicial da várzea baixa é caracterizado por se estabelecer em locais instáveis,

como consequência, a diversidade de espécies é menor e a densidade de indivíduos é maior, comparado com estágios sucessionais mais avançados (Wittmann *et al.*, 2002; Worbes *et al.*, 1992). Nos estágios sucessionais mais jovens da várzea baixa encontram-se espécies como *Cecropia latiloba*, *Pseudobombax munguba*, *Luehea cymulosa* e *Crataeva benthamii* (Wittmann *et al.*, 2002). Nos estágios sucessionais mais avançados (sucessão tardia e clímax), são comuns as espécies *Vitex cymosa*, *Piranhea trifoliata*, *Hevea spruceana* e *Pouteria elegans* (Wittmann *et al.*, 2002; Wittmann *et al.*, 2004).

Nas áreas de várzea alta a inundação pode alcançar um nível máximo de 3 m, permanecendo inundadas até 50 dias por ano. São áreas de maior diversidade de espécies do que as áreas de várzea baixa. Wittmann *et al.* (2004) encontraram 172 espécies/ha nos estágios avançados das áreas de várzea alta contra cerca de 90 espécies/ha nos estágios sucessionais avançados de várzea baixa, na floresta da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, estado do Amazonas. Algumas espécies características da várzea alta são *Astrocaryum jauari*, *Hura crepitans*, *Ocotea floribunda*, *Pouteria procera*, *Acácia lorentensis* e *Ceiba samauma* (Wittmann *et al.*, 2002, 2004 e 2006).

O chavascal representa áreas de depressão distantes do canal do rio principal, estabelecidas em locais de solo de granulometria fina e mal drenado. A riqueza de espécies é baixa, pois as espécies pioneiras têm que suportar condições anóxicas extremas ao nível da raiz, as quais persistem por quase todo o ano, mas apresentam alta densidade de indivíduos (Wittmann *et al.*, 2004; Wittmann e Parolin, 2005). Algumas espécies características do chavascal são as tabocas (*Guadua spp.*, Gramineae), munguba (*Pseudobombax munguba*, Bombacaceae) embaúbas (*Cecropia sp.*, Cecropiaceae) (Ayres, 1993).

A distribuição de espécies é mais heterogênea na várzea alta, pois esta área sofre menor influência da inundação e da dinâmica geomorfológica. Assim, há significativa diferença florística e estrutural entre áreas de várzea alta e várzea baixa (Wittmann *et al.*, 2002; Wittmann e Junk, 2003). Em estudo realizado por Wittmann *et al.* (2002), foram encontradas 93 espécies restritas a várzea baixa, 103 espécies restritas a várzea alta e apenas 27 espécies eram comuns a ambos os habitats.

Os estágios iniciais da sucessão primária nas florestas alagadas são encontrados em áreas com altas taxas de sedimentação ao longo das margens dos rios. Os bancos de sedimento recém depositados são colonizados por gramíneas e herbáceas de rápido crescimento, como *Echinochloa polystachia* (canarana) (Piedade *et al.*, 2000; Wittmann *et al.*, 2002). Nas áreas vegetadas inundadas da várzea, a densidade de plantas funciona como uma

barreira à correnteza diminuindo a velocidade da água e facilitando a deposição de sedimentos mais finos (Kalliola *et al.*, 1991; Wittmann *et al.*, 2002; Wittmann *et al.*, 2004).

As gramíneas pioneiras diminuem a correnteza da água, permitindo o estabelecimento de arbóreas pioneiras como *Salix martiniana* e *Alchornea castaneifolia*, que toleram taxas de sedimentação de até 20 cm/ano, aproximadamente (Wittmann *et al.*, 2002; Wittmann *et al.*, 2004; Wittmann e Parolin 2005; Worbes *et al.*, 1992; Worbes, 1997).

À medida que os bancos de sedimentos tornam-se mais altos, diminui o nível da inundação, permitindo o estabelecimento de espécies arbóreas menos tolerantes a elevada inundação e altas taxas de sedimentação, que as espécies do estágio anterior. Estágios monoespecíficos (por exemplo, *Cecropia latiloba*) se desenvolvem, tolerando taxas de sedimentação de cerca de 1 cm/ano (Wittmann *et al.*, 2002; Wittmann e Junk, 2003; Wittmann *et al.*, 2004). O estágio secundário inicial é caracterizado por ser pobre em espécies e dominado por espécies heliofitas de crescimento rápido, como *Cecropia* sp., *Crataeva benthamii*, *Pseudobombax munguba*, *Luehea cymulosa*, *Ficus* sp. e *Nectandra amazonum* apresentando idades entre 25-80 anos (Worbes *et al.*, 1992; Worbes, 1997; Schöngart *et al.*, 2003; Wittmann *et al.*, 2004).

A alta densidade de indivíduos, característica das formações de estágio secundário, diminui ainda mais a velocidade da correnteza, levando a taxas de sedimentação maiores. Isso acarreta em um aumento do nível topográfico daquele local, e conseqüentemente diminuindo o tempo máximo de inundação. Esses fatores permitem o estabelecimento de outras espécies, que toleram baixos níveis de inundação e sedimentação, conseqüentemente aumentando a diversidade. Finalmente, os estágios de sucessão mais avançados da várzea baixa se desenvolvem em áreas de várzea alta (Wittmann *et al.*, 2002). Os estágios mais avançados da várzea baixa, como secundário tardio e clímax, e as áreas de várzea alta, que apresentam apenas um tipo de estágio sucessional semelhante ao estágio avançado/clímax, são caracterizados por espécies com alta densidade de madeira, de crescimento lento, tolerantes a sombra como *Piranhea trifoliata*, *Tabebuia barbata*, *Aspidosperma riedelii*, *Gustavia augusta* e *Pseudoxandra polyphleba* (Worbes *et al.*, 1992; Worbes, 1997; Schöngart *et al.*, 2003; Wittmann *et al.*, 2004).

Wittmann *et al.* (2006) concluíram que as florestas de várzea amazônicas são as mais ricas em biodiversidade em relação as demais florestas alagadas do mundo. A alta riqueza de espécies nas florestas de várzea resulta da coexistência de espécies bem adaptadas a inundação juntamente com espécies generalistas, que também ocorrem na terra firme.

### 3.5 Sensoriamento remoto

Sensoriamento remoto é um conjunto de instrumentos, técnicas e métodos para a observação da superfície da Terra à distância e a interpretação dessas imagens ou valores numéricos de forma a adquirir informações significativas sobre determinados objetos e locais na Terra (Buiten & Clevers, 1993 *apud* ITC, 2004). Os dados sobre a superfície da Terra são adquiridos através de um dispositivo (sensor) que não se encontra em contato com o objeto de interesse, e os dados são, normalmente, apresentados na forma de imagens (ITC, 2004).

A radiação solar se propaga no espaço através de ondas eletromagnéticas que podem ser classificadas de acordo com a frequência e o comprimento das ondas constituindo o espectro eletromagnético (Moreira, 2003). Sensores são equipamentos capazes de coletar energia proveniente do objeto para a extração de informações (INPE, 2006). A característica medida pelo sensor é a energia eletromagnética que é refletida ou emitida pela superfície da Terra e pelos objetos que se encontram nela (ITC, 2004).

A energia eletromagnética emitida ou refletida por um alvo está associada às características físicas e químicas de seus componentes constituintes, do campo de radiação incidente, das características do satélite e do sensor utilizado para obter as medidas, entre outros. A interação da radiação eletromagnética com a atmosfera e os alvos terrestres da superfície da Terra pode-se dar em um nível microscópico, porque toda a matéria existente no universo é constituída de molécula, e macroscópico, determinado pela geometria alvo-sensor. São esses diferentes parâmetros que determinam como o alvo irá interagir com a radiação (Moreira, 2003).

As folhas são o elemento da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado por sensores ópticos, e a absorção, reflexão ou transmissão do comprimento de onda que chega até a folha é determinada por suas características fisiológicas e morfológicas (Jackson e Huete, 1991 *apud* Ponzoni, 2001). Na região do comprimento de onda do visível (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ), a resposta espectral da vegetação é determinada pela presença de pigmentos fotossintetizantes, como as clorofilas *a* e *b*, xantofila e carotenos. Os pigmentos absorvem a radiação e a convertem em energia por meio do processo de fotossíntese, o que resulta em baixa refletância da vegetação nos comprimentos de onda de absorção daqueles pigmentos (Ponzoni, 2001).

No comprimento de onda do infravermelho próximo (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ), a resposta espectral da vegetação é determinada pela estrutura interna da folha (mesófilo), a qual provoca o espalhamento interno da radiação, e se caracteriza por baixa absorção e alta

refletância (Gates *et al.*, 1965 apud Ponzoni, 2001). No comprimento de onda do infravermelho médio (1,3 a 2,6  $\mu\text{m}$ ) o conteúdo de água no interior da folha é que determina sua resposta espectral, quanto mais água a folha tiver em seus tecidos, mais radiação será absorvida, com picos de refletância entre regiões de absorção, registrando oscilações de média e baixa refletância (Ponzoni, 2001).

Os padrões de resposta espectral citados acima foram descritos para folhas isoladas. Os níveis de refletância esperados para uma cobertura vegetal, não se devem exclusivamente a propriedades fisiológicas e estruturais das folhas individuais, mas também a outros parâmetros de natureza geométrica (iluminação e visada), das propriedades das folhas (pigmentação, composição celular, espessura, quantidade de água), das propriedades espectrais dos elementos do dossel (forma geométrica, tamanho e densidade das copas, posicionamento das árvores, presença de folhas, galhos, frutos, flores, etc.), biofísica (índice de área foliar - IAF e densidade de área foliar - DAF), do solo e da atmosfera (Ponzoni, 2001; ITC, 2004). No entanto, as propriedades espectrais de uma folha isolada e do dossel da qual fazem parte, apresentam formas das curvas de refletância bastante semelhantes, considerando uma mesma faixa espectral (Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

Asner (1998) afirma que o aumento do índice de área foliar (IAF) de um dossel implica em um maior espalhamento do fluxo de infravermelho próximo, diminuindo a refletância no visível e no infravermelho médio, e aumentando no infravermelho próximo. Dosséis com diversas camadas apresentam maior quantidade de sombras, e menor refletância em todos os comprimentos de onda (Ponzoni, 2001).

As diferenças na estrutura do dossel e as características fisiológicas e morfológicas das folhas provocam uma resposta espectral diferenciada para cada tipo de vegetação, sendo possível distinguir ecossistemas, composição florística, estágios de sucessão e até o estado de conservação da vegetação.

### **3.5.1 Imagens multitemporais**

As informações multitemporais de sensoriamento remoto têm sido consideradas pelos cientistas como a melhor estratégia para a discriminação dos alvos da superfície terrestre, reduzindo as incertezas nas identificações temáticas. No entanto, os estudos que utilizam séries históricas de imagens de satélites, apresentam dificuldades operacionais causadas principalmente pela variação da atmosfera, ângulos de iluminação e de visada do alvo e perda da sensibilidade espectral dos sensores ao longo do tempo (Espírito-Santo, 2003).

Os dados brutos contidos em imagens geralmente apresentam falhas e distorções. Estas distorções podem ser de origem radiométrica, resultante de uma resposta não linear dos detectores e aos efeitos de interferência atmosférica (espalhamento e absorção), e/ou geométrica, relacionadas às distorções espaciais causadas pela variação das condições de aquisição dos dados orbitais (Mather, 2004). A correção de distorções e remoção de falhas (ruídos) presentes nos dados é chamada de pré-processamento, isto porque, as operações são realizadas antes que os dados sejam utilizados para algum propósito. Alguns dos pré-processamentos incluem correções geométricas, atmosféricas e radiométricas.

Essas correções fazem-se necessárias, principalmente em estudos multitemporais e quando há a necessidade de detectar mudanças na paisagem, de modo a garantir que as diferenças radiométricas entre cenas de datas distintas correspondam a mudanças no ecossistema, e não a fatores relativos ao processo de imageamento (Crosta, 1992; Mather, 2004; Pax-Lenney *et al.*, 2001; Song *et al.*, 2001).

### **3.5.2 Sensoriamento remoto nas várzeas amazônicas**

O uso de imagens de satélite também tem se tornado uma boa alternativa para estudos em áreas de florestas alagadas, devido à dificuldade de acesso a esses locais. Salo *et al.* (1986) utilizaram imagens do satélite Landsat sensor MSS para avaliar o grau de distúrbios florestais causados por processos de migração do canal do rio, em uma região da Amazônia Peruana. Rasänen *et al.* (1987) avaliaram imagens de radar e dados estratigráficos para avaliar blocos geológicos da região tectônica sub-andina, verificando que causam perturbações fluviais na região oeste da bacia Amazônica. Hess *et al.* (1995) através de processamento de imagens de radar (SAR) e utilizando técnicas de classificação por árvore de decisão conseguiram classificar as paisagens alagadas em cinco categorias (água, pasto, macrófitas aquáticas, floresta não alagada e floresta alagada) e um decréscimo da porção de área alagada de 23% em abril/94 para 12% em outubro/94.

Mertes *et al.* (1995) utilizaram imagens do Landsat TM para determinar padrões de variação na heterogeneidade espacial da paisagem em locais geomorfologicamente e hidrologicamente distintos, ao longo da calha do Solimões/Amazonas, utilizando classificação de imagens Landsat. Os autores puderam determinar que 70% das áreas de várzea analisadas a montante e no meio do canal estavam cobertas por floresta, e 37% na área a jusante do rio.

Oliveira (1996) estudou os processos de agradiação e erosão fluvial em um segmento da planície de inundação do rio Solimões utilizando dados multitemporais e multisensores. O

autor afirma que a utilização de composição de bandas multisensores/temporais permitiu a visualização de dois momentos, separados por um intervalo de vinte anos, em uma só imagem. Concluindo que as mais expressivas alterações ocorreram na ilha da Marchantaria, próxima a cidade de Manaus.

Mertes *et al.* (1996), estudaram diversos padrões de formação, taxas de transporte, deposição e erosão de sedimentos e mudanças no canal do rio Solimões/Amazonas, desde a cidade de São Paulo de Olivença até Óbidos, utilizando para isso imagens de satélite e radar. Hess *et al.* (1998) identificaram diferentes tipos de formações vegetais nas áreas de florestas alagadas amazônicas, utilizando um mosaico gerado com imagens do radar JERS, captadas nos períodos de seca e cheia.

Alsdorf *et al.* (2000) através de processamentos interferométricos de imagens de radar (SAR), conseguiram verificar que a flutuação do nível da água no interior das florestas alagadas é semelhante à do canal principal, registrando um decréscimo de até 11cm de um dia para o outro em outubro/94. Wittmann *et al.* (2002), utilizando imagens Landsat/TM, determinaram o padrão de distribuição de espécies na RDSM de acordo com a altura de inundação e um modelo de elevação digital (DEM), e utilizando uma técnica de classificação supervisionada por máxima verossimilhança conseguiu diferenciar seis classes de cobertura do solo: água, nuvens, macrófitas aquáticas, várzea baixa – estágio sucessional jovem, várzea baixa – estágios secundário tardio e clímax e várzea alta – estágios secundário tardio e clímax, no entanto não conseguiu determinar os limites das diferentes formações de várzea baixa.

Hess *et al.* (2003), utilizando dados do radar SAR, delimitaram uma máscara para as florestas de várzea ao longo do rio Solimões/Amazonas e quantificou uma área de floresta de 70% do total da várzea. Richey *et al.* (2002), utilizando esse mosaico, estimaram as taxas de troca de carbono entre a atmosfera e os ambientes alagados.

Palha *et al.* (2003), combinando imagens Landsat/TM-5, SAR/JERS-1 e dados de vídeo digital mapearam os habitats de várzea e classificaram a cobertura da terra em seis classes: terra-firme, água branca, água preta, floresta de várzea alta, floresta de várzea baixa, banco de macrófitas e área desmatada. Costa (2005) usou imagens dos radares Radarsat e JERS para fazer uma estimativa da produção primária líquida de plantas aquáticas, mais especificamente *Hymenachne amplexicaulis*, em um lago da região de Santarém/PA. Freitas & Novo (2005) utilizando imagens do sensor MODIS/TERRA conseguiram discriminar ambientes de água e vegetação e detectar variações entre o período de cheia e vazante, demonstrado o potencial do sensor para análises ambientais. Jardim-Lima *et al.* (2005),

utilizando técnicas de restauração de imagens Landsat/TM e dados de NDVI, quantificaram a área de inundação dos lagos da RDSM.

Legleiter e Roberts (2004) avaliaram a morfologia e profundidade do canal por meio de modelos de transferência radiativa utilizando vários cenários morfológicos. Os autores concluíram que a acurácia e precisão das estimativas de profundidade são influenciadas pela morfologia do canal e sua variabilidade espacial.

Novo *et al.* (2006) utilizaram dados do sensor MODIS para mapear mudanças na distribuição de clorofila fitoplanctônica em lagos de florestas alagadas, por meio de imagens fração geradas com modelo linear de mistura espectral. Foram avaliados quatro períodos de inundação – subida das águas, cheia, vazante e seca – entre as cidades de Parintins/AM e Almeirim/PA. Hamilton *et al.* (2006) utilizaram dados de imagens do sensor ETM+ do Landsat, do radar japonês JERS e dados de elevação do radar SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), juntamente com dados de campo para gerar um mapa de tipos de vegetação da floresta alagada ao redor do rio Madre de Dios, um tributário do rio Amazonas na floresta peruana.