

## 1º Passo: Criação das imagens índice de vegetação (*Aerosol Free Vegetation Index – AFRI<sub>2,1</sub>*)

A partir de cada imagem Landsat da série temporal utilizada nesse estudo, foi gerada a imagem AFRI<sub>2,1</sub> correspondente de acordo com a fórmula (15), estabelecida por Karnieli *et al.* (2001):

$$(15) \text{AFRI}_{2,1} = (\rho_{\text{NIR}} - 0.5\rho_{2,1}) / (\rho_{\text{NIR}} + 0.5\rho_{2,1})$$

Onde:

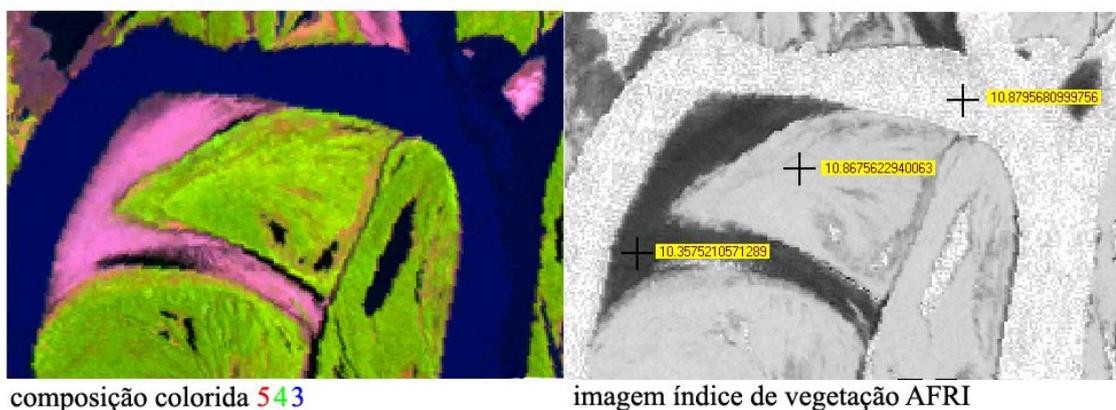
$\rho_{\text{NIR}}$  = refletância aparente do pixel na banda do infravermelho próximo (TM 4);

$\rho_{2,1}$  = refletância aparente do pixel na banda do infravermelho médio (TM 7).

## 2º Passo: Determinação do limiar da vegetação/não vegetação

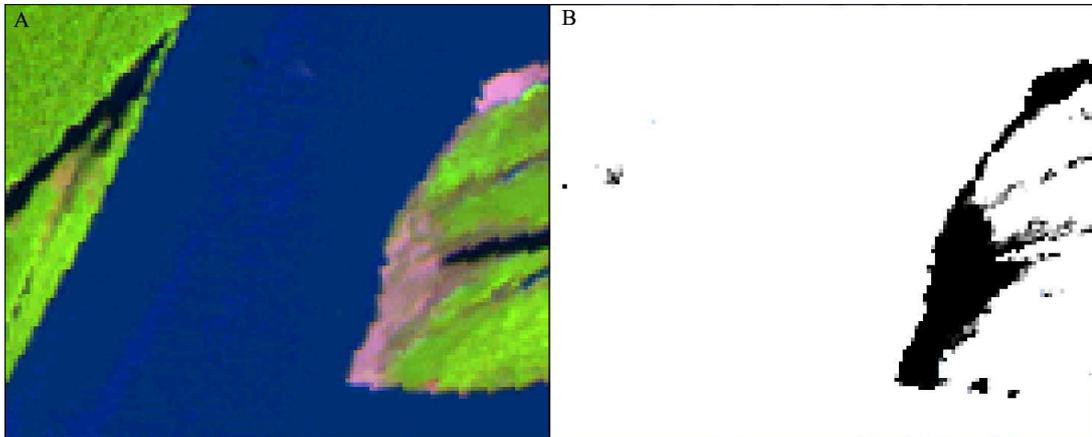
O passo seguinte foi escolher um valor na imagem índice vegetação que pudesse ser utilizado como limiar para identificar as áreas de vegetação. Esse limiar foi determinado através da análise visual da imagem índice de vegetação; comparando-a com uma composição falsa-cor (R5-G4-B3) de sua respectiva data, foi analisado o que cada valor nela representava (figura 11).

Como as imagens Landsat passaram pelo pré-processamento de normalização radiométrica, o limiar foi determinado somente na imagem AFRI<sub>2,1</sub> da data de 18/10/1986, que foi a imagem utilizada como referência na normalização. Teoricamente, as imagens depois de normalizadas apresentam as mesmas características de atmosfera e iluminação, então o mesmo limiar escolhido na imagem de 1986 foi utilizado nas demais datas.



**Figura 11:** Imagem Landsat 5TM RGB-543 de 1986 e respectiva imagem índice vegetação AFRI<sub>2,1</sub>, com *offset* de +10. Note que o valor da água é maior e próximo ao valor da vegetação.

A utilização da imagem  $AFRI_{2,1}$  foi satisfatória para separar a vegetação do solo exposto, mas confundiu a água com a vegetação (figura 12, ver também valores na figura 11).



**Figura 12:** Em A, imagem Landsat 5TM RGB-543 de 1986. Em B, respectiva imagem índice  $AFRI_{2,1} + 10$ , 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.

Para contornar esse problema, primeiramente foi gerada uma máscara separando o solo exposto (valor zero) da água e vegetação (valor um) na imagem  $AFRI_{2,1}$ . Depois, foi utilizada a refletância na banda TM7 para criar outra máscara, separando a vegetação e o solo (valor 1) da água (valor zero). Ambas as máscaras foram geradas pelo mesmo método de escolha de limiar (explicado acima) analisando visualmente as imagens da banda 7 e índice  $AFRI_{2,1}$  e comparando-as com sua respectiva composição colorida de bandas para determinar o valor do limiar, utilizando o mesmo limiar determinado na imagem de 1986 para todas as imagens da série temporal.

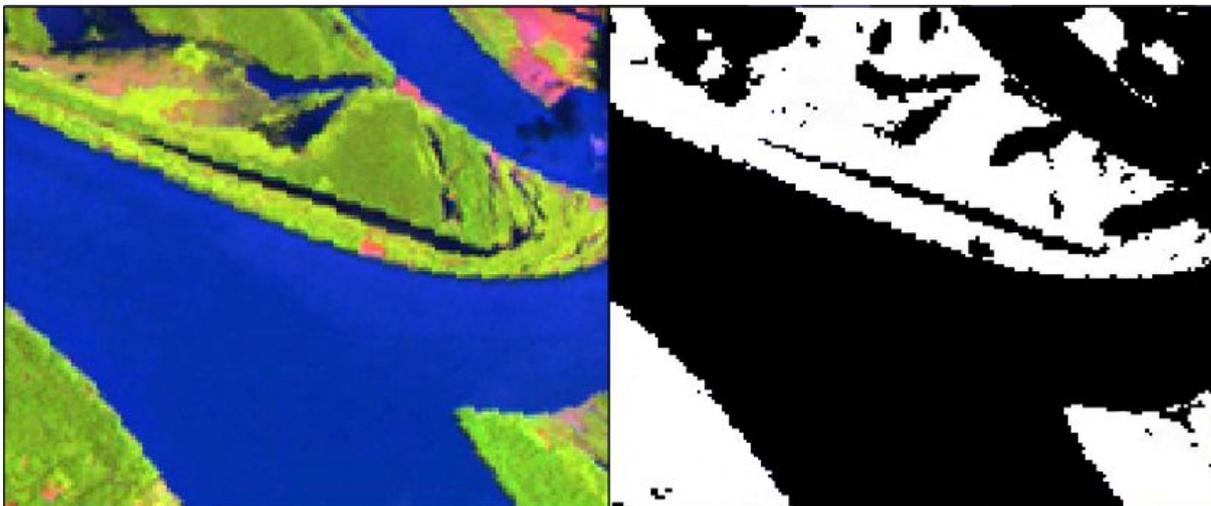
### 3º Passo: Criação da máscara vegetação/não vegetação

As duas máscaras foram então multiplicadas para gerar, para cada data, a máscara vegetação/não vegetação, através da seguinte equação:

$$(16) [AFRI_{vegx}] \times [LH2Ox] = [Imagem\ vegetação/não\ vegetação]$$

Onde  $[AFRI_{vegx}]$  representa a primeira máscara, separando a vegetação e água (valor 1) do solo exposto (valor zero), do ano x;  $[LH2Ox]$  é segunda máscara, utilizada para separar a vegetação e o solo exposto (valor 1) da água (valor zero), do mesmo ano x. A imagem resultante ( $[Imagem\ vegetação\_não-vegetação]$ ) é uma máscara binária que foi multiplicada pela imagem  $AFRI_{2,1}$  gerada anteriormente, para obtenção da imagem utilizada

na detecção de mudança. Então, como resultado final, se tem uma imagem  $AFRI_{2,1}$  da área de interesse do estudo, ou seja, somente das áreas cobertas por vegetação na área focal da RDSM (figura 13).



**Figura 13:** Na esquerda imagem Landsat 5TM RGB-547 de 1986. Na direita imagem  $AFRI_{2,1}$  vegetação\_não-vegetação correspondente. As áreas de vegetação não incluídas na imagem  $AFRI_{2,1}$  (na direita) estão coberta por nuvens em alguma outra data.

#### 4.3.3.1.2 Determinação das áreas erodidas e sedimentadas

A determinação das áreas de erosão e sedimentação entre os períodos estudados foi feita através da técnica de detecção de mudanças por subtração de imagens. A detecção de mudança por subtração de imagens é feita par a par, as duas imagens são comparadas pixel a pixel, os valores desses pixels são subtraídos um do outro e uma terceira imagem é gerada, que é a imagem de mudança, de acordo com a equação:

$$(17) \Delta_{ij} = (Veg\_t2_{ij} - Veg\_t1_{ij})$$

Onde:

$\Delta_{ij}$  = valor da diferença de índices no pixel de linha i e coluna j;

$Veg\_t2_{ij}$  = valor do índice de vegetação no pixel ij na data 2;

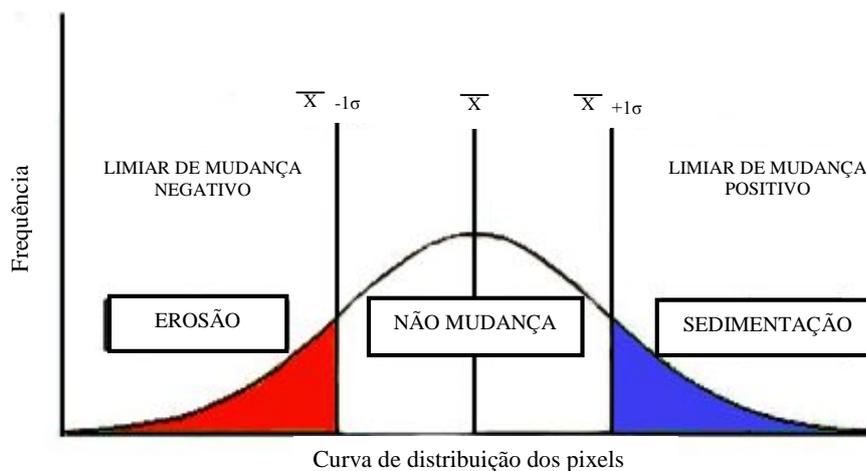
$Veg\_t1_{ij}$  = valor do índice de vegetação no pixel ij na data 1;

A detecção de mudanças foi realizada nas imagens vegetação/não-vegetação, geradas para cada data da série multitemporal, aos pares, de acordo com a tabela 4.

**Tabela 4:** Pares de imagens analisados na detecção de mudanças e as respectivas imagens geradas pelo processamento.

Imagem tempo 1	Imagem tempo 2	Imagem resultante da detecção de mudança
26/09/1984	18/10/1986	Mudança 84-86
18/10/1986	05/10/1993	Mudança 86-93
05/10/1993	14/09/1997	Mudança 93-97
14/09/1997	25/11/2000	Mudança 97-00
25/11/2000	04/09/2005	Mudança 00-05

A imagem mudança foi classificada através da técnica de fatiamento, que consiste na escolha de limiares de mudança baseados no desvio padrão dos valores da imagem diferença (figura 14). No cálculo do desvio padrão, foram desconsiderados os pixels fora da área de interesse. Como a grande maioria dos pixels na área de interesse é espelho de água estável ou floresta estável, um desvio padrão dos valores na imagem-mudança representa um incremento ou decréscimo muito pequeno no valor do  $AFRI_{2,1}$  entre as duas datas. Foram determinadas apenas três classes em cada imagem diferença: vegetação para não vegetação, caracterizando as áreas de erosão; não vegetação para vegetação, caracterizando as áreas de sedimentação; e vegetação para vegetação ou não vegetação para não vegetação, caracterizando as áreas de não mudança. Os limiares de mudança foram testados através da análise visual das imagens.

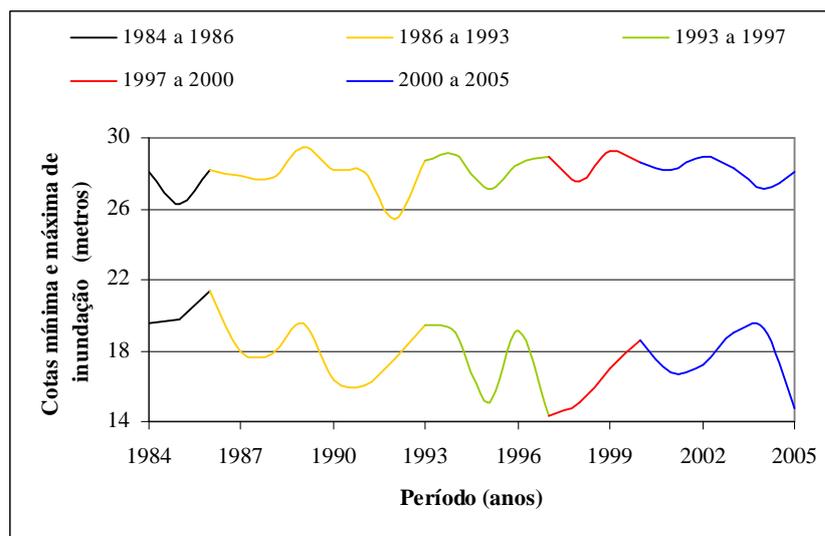


**Figura 14:** Histograma de imagem mudança com limiares hipotéticos, adaptado de Graça (2004).

As cinco imagens mudança geradas foram fatiadas nos limiares de 1 desvio padrão acima e abaixo da média, tendo como resultado uma imagem temática com três classes: erosão, não mudança e sedimentação.

#### 4.3.3.1.3 Relação entre as taxas de erosão/sedimentação e as cotas de inundação da área de estudo nos períodos estudados

As variáveis analisadas foram as médias das cotas mínimas e máximas de inundação em cada período (figura 15 e tabela 5) e o intervalo de tempo entre as datas. Os valores de cota mínima e máxima foram obtidos na Engenharia dos Portos de Manaus, que tem feito medições diárias desde 1903. Os dados de inundação do rio Negro, medidos próximo à cidade de Manaus, apresentam alta correlação com as cotas de inundação médias na estação do rio Japurá, próximo a RDSM (Schöngart *et al.*, 2005).



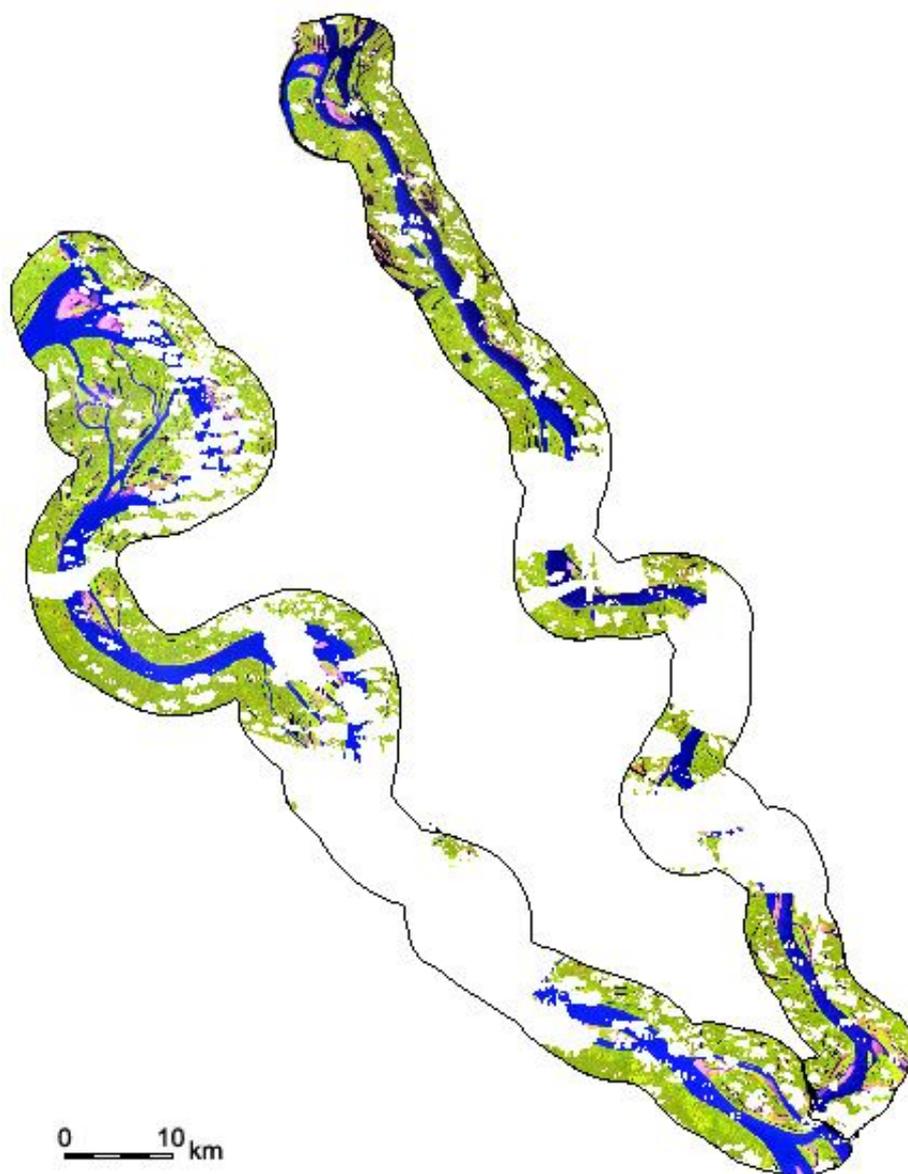
**Figura 15:** Médias mensais das cotas mínimas e máximas de inundação medidas para a estação do rio Negro, próxima à cidade de Manaus (Engenharia dos Portos da Cidade de Manaus).

**Tabela 5:** Valores médios das cotas mínimas e máximas da área da RDSM, obtidos com os dados de inundação do rio Negro (Schöngart *et al.*, 2005), durante os respectivos períodos, utilizados para realizar a correlação com as taxas de erosão e sedimentação obtidas.

<b>Período</b>	<b>Nível médio de inundação</b>	<b>Média das cotas mínimas</b>	<b>Média das cotas máximas</b>
1984 a 1986	39,50	20,24	27,48
1986 a 1993	38,90	18,27	27,97
1993 a 1997	38,81	17,41	28,49
1997 a 2000	37,36	16,22	28,62
2000 a 2005	38,78	17,59	28,21

#### **4.3.3.1.4 Comparação entre as taxas dos rios Solimões e Japurá**

Para verificar se há diferença nas taxas de erosão e sedimentação entre os rios Solimões e Japurá, foram criadas máscaras dos dois rios através de identificação visual de seus limites e digitalização manual (figura 16), com base na máscara da área de estudo já criada (figura 9). As máscaras foram utilizadas para extrair os dados de áreas sedimentadas e erodidas em cada canal, e esses foram comparados em gráficos.



**Figura 16:** 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.

#### 4.3.3.2 Determinação da taxa de mudança do canal

A taxa líquida de mudança do canal em todo o período (1984 a 2005) foi contabilizada de acordo com Mertes *et al.* (1996), sendo:

$$(18) \text{ mudança do canal } (T1-T2) = (AM/AC/CI) \times 100$$

Onde:

T1 = Imagem da data inicial do período total de estudo (26/09/1984);

T2 = Imagem da data final do período total de estudo (04/09/2005);

AM = área de mudança líquida (erodida, sedimentada ou ambas);

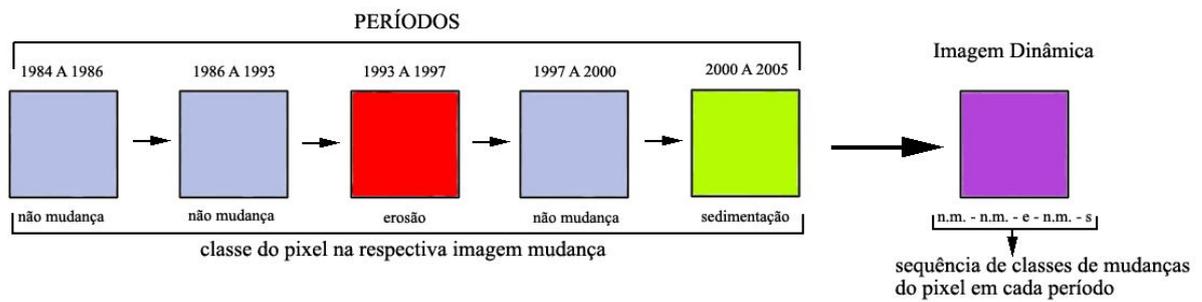
AC = área total do espelho d'água do rio Solimões no trecho estudado;

CI = comprimento do intervalo de tempo, ou seja, 21 anos.

Segundo Mertes *et al.* (1996), a mudança do canal corresponde à porção de área que mudou seu estado inicial (vegetada ou não-vegetada, no caso deste estudo) por ano, durante todo o período de estudo. Essas podem ser áreas que erodiram, sedimentaram ou a mudança total, que é a somatória das áreas erodidas e sedimentadas. O valor é expresso como a porcentagem relativa à área total ativa do canal no trecho estudado, representada pela área total do espelho de água entre as duas margens principais do rio. A delimitação do espelho de água foi feita visual e manualmente. As taxas foram calculadas somente para o rio Solimões, no trecho que delimita a RDSM, com um comprimento de 140 km, aproximadamente. A área total do espelho de água para neste trecho do rio Solimões é 760 km<sup>2</sup>.

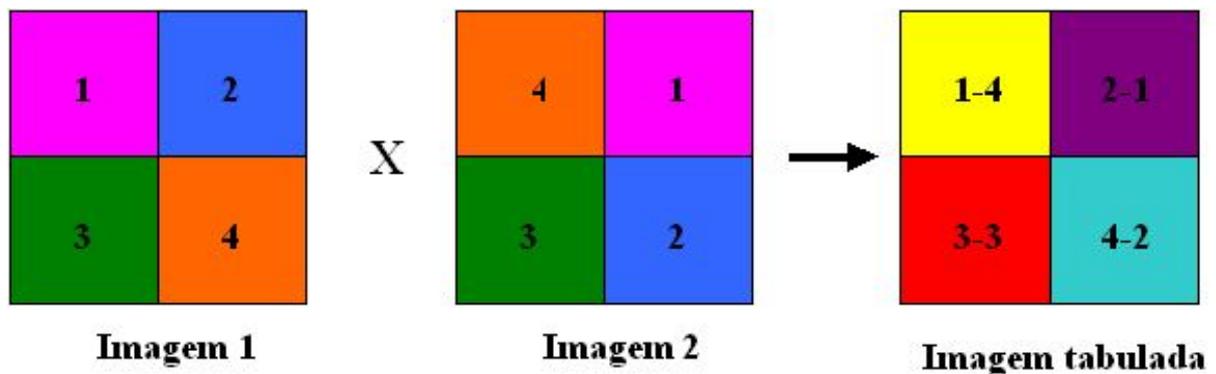
#### **4.3.3.3 Criação da imagem de dinâmica das áreas de erosão e sedimentação**

A partir das imagens mudança geradas para cada período especificado na tabela 4, foi gerado um mapa da dinâmica de processos de erosão e sedimentação na RDSM. Nesse mapa, cada pixel possui uma informação da seqüência de mudanças que ocorreram com ele durante todos os períodos estudados. Então, por exemplo, se na imagem mudança do primeiro período (1984 a 1986) determinado pixel foi classificado como não mudança, no período seguinte (1986 a 1993) permaneceu classificado como não mudança, no período de 1993 a 1997 foi classificado como erosão, no período de 1997 a 2000 voltou a ser não mudança e no último período (2000 a 2005) foi classificado como sedimentação, todas as classificações de mudança que esse determinado pixel teve em cada período ficam armazenadas em uma única imagem, e a informação do pixel passa a ser [não mudança – não mudança – erosão – não mudança – sedimentação], cada transformação correspondendo a um período avaliado (figura 17).



**Figura 17:** 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.

A imagem dinâmica foi gerada utilizando a ferramenta “crosstab” do software Idrisi 32 (Eastman, 1998). Através dessa ferramenta o programa compara as categorias (classes) da primeira imagem com as da segunda e uma tabulação é feita do número de pixels em cada combinação. O resultado dessa operação sai em forma de tabela e imagem, mostrando, por pixel, qual era sua categoria na imagem mudança do intervalo de tempo 1 e qual categoria adquiriu na imagem mudança do intervalo de tempo 2, os pixels com mudanças de categorias iguais são agrupados em classes (figura 18).



**Figura 18:** 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.

#### 4.3.3.4 Análise da mudança da resposta espectral em vegetação jovem ao longo do seu crescimento

Com o intuito de verificar se ocorrem mudanças nos atributos espectrais (ver item 4.3.3.4.1) da vegetação a partir de sua colonização e ao longo de seu crescimento e desenvolvimento, foi observado o comportamento espectral de polígonos de vegetação ao longo dos 21 anos avaliados neste trabalho. A partir da imagem dinâmica gerada (ver item 4.3.3.3), foi selecionada a seqüência de mudança que caracterizava áreas sedimentadas e



outubro de 1986. Considerando ainda a sazonalidade da bacia Amazônica, e mais especificamente da região da RDSM, o pico da seca é atingido por volta do mês de outubro (Sociedade Civil Mimirauá, 1996). Então a vegetação que aparece no pixel em 1986 pode ter, aproximadamente, no mínimo 01 mês e no máximo 02 anos. Então a idade aproximada da vegetação em cada data de estudo foi estimada de acordo com a tabela 6:

**Tabela 6:** Idade aproximada da vegetação, presente nos polígonos mapeados, em cada data da série de vinte e um anos.

<b>Períodos</b>	<b>Tempo entre as datas (anos)</b>	<b>Idade aproximada da vegetação (anos)</b>
1984 a 1986	2	0.08 a 2
1984 a 1993	7	7.08 a 9
1984 a 1997	4	11.08 a 13
1984 a 2000	3	14.08 a 16
1984 a 2005	5	19.08 a 21

Feito isso, foi possível extrair as informações dos atributos espectrais desses polígonos e avaliar se ocorre mudança significativa desses atributos nas datas avaliadas.

#### **4.3.3.4.1 Determinação dos atributos espectrais da vegetação**

Os atributos espectrais observados em diferentes idades de floresta jovem foram: o índice de vegetação  $AFRI_{2,1}$ , cuja metodologia para obtenção das imagens já foi explicada no item 4.3.3.1.1, 1º Passo; o índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), obtido por meio da fórmula (19), e os valores de refletância nas bandas 3, 4, 5 e 7. O processo de definição espectral das áreas de vegetação foi realizado parcialmente automatizado. Foram coletadas as assinaturas espectrais dos polígonos de vegetação mapeados, como já explicado no item 4.3.3.4, utilizando para isso as bandas 3, 4, 5 e 7.

$$(19) \text{NDVI} = \frac{\text{IVP} - \text{VV}}{\text{IVP} + \text{VV}}$$

Onde:

IVP = banda correspondente ao comprimento de onda do infravermelho próximo (banda 4);

VV = banda correspondente ao comprimento de onda do visível vermelho (banda 3).

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1 Técnicas de pré-processamentos das imagens

#### 5.1.1 Correção geométrica e registro

Correções geométricas e registros de imagens mal feitos estão entre os principais responsáveis por erros ocorridos em diversos tipos de análises. Um bom resultado nessa etapa do pré-processamento é fundamental para detectar mudanças em uma série temporal de imagens (Chen *et al.*, 2003; Daí e Khorram, 1998; Mather, 2004).

Os erros médios quadráticos (RMS) obtidos na correção geométrica das imagens, utilizando um polinômio de primeiro grau, foram considerados bons (tabela 7). No georeferenciamento da imagem de 1984 com o Geocover de 1986 foi obtido um RMS de 0,18 pixels. O maior erro médio no registro das demais imagens, utilizando como referência a data de 1984, foi o da imagem de 1997, obtendo um RMS de 0,19 pixels.

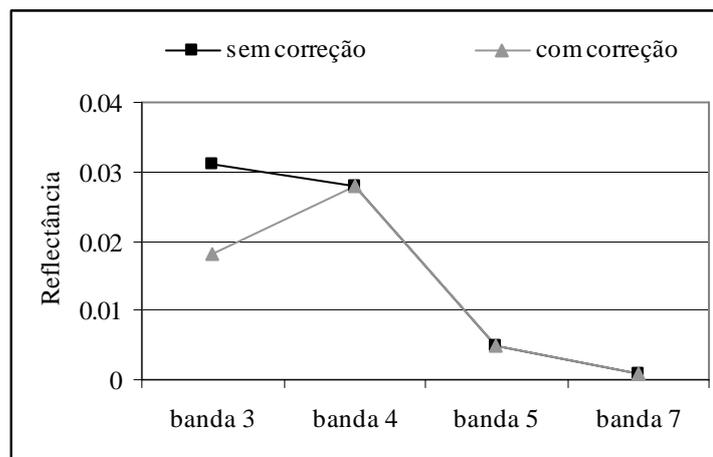
**Tabela 7:** Erro médio quadrado (RMS) do registro das imagens da série multitemporal

<b>Imagem base</b>	<b>Ano</b>	<b>Pontos de Controle</b>	<b>RMS (pixel)</b>
Geocover 1986	1984	18	0,18
1984	1986	15	0,19
1984	1993	15	0,18
1984	1997	15	0,19
1984	2000	15	0,18
1984	2005	15	0,15

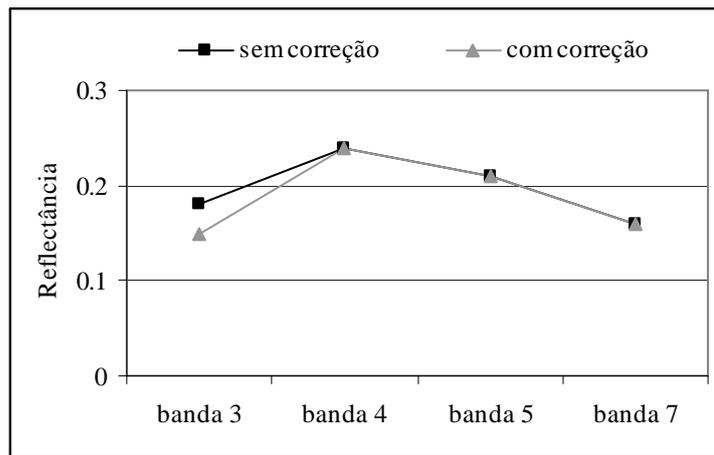
Landgrebe *et al.* (1975, apud Mather, 2004) sugerem que a magnitude de um erro deve ser entre 1 e 2%, considerando que as imagens estejam sobrepostas e ambas alinhadas a um ponto de referência bem definido. Considerando a resolução de 30 m das imagens Landsat 5/TM, o modelo polinomial representou um erro médio interno menor do que 6 m em todas as datas.

### 5.1.2 Correção Atmosférica

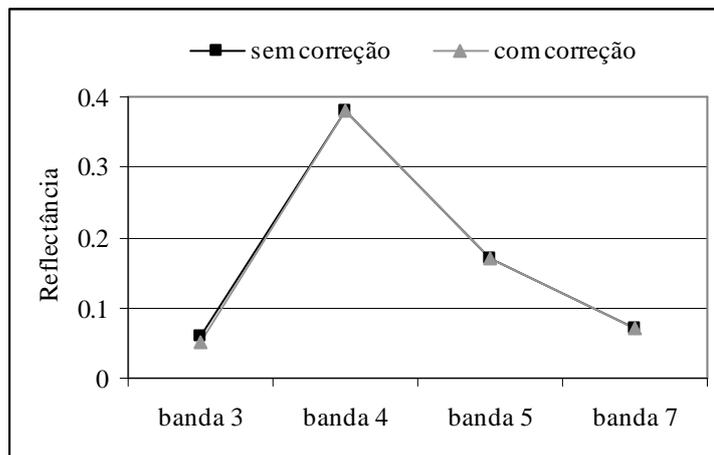
Os resultados da correção atmosférica, realizada pelo método COST (Chavez, 1996), na banda 3 da imagem de 1986, podem ser observadas nas figuras 20, 21 e 22 para a água de lago com sedimento decantado, o solo exposto e a vegetação, respectivamente. Os valores de refletância na banda 3 diminuíram bastante com a correção atmosférica, apresentando uma curva similar a encontrada na bibliografia. O fato de não terem sido utilizadas informações das bandas 1 e 2 do sensor TM pode ter ocasionado na escolha de um “falso” alvo escuro. É provável que a água sem sedimento na composição R5G4B3 do lago selecionado como alvo escuro seja, na verdade, uma água turbida. O aumento na concentração de partículas inorgânicas causa um aumento na refletância nos comprimentos de onda maiores. Mesmo para altas concentrações de sólidos totais, a refletância no vermelho é maior do que no infravermelho (Novo, 2001). Observando a figura 20, pode-se afirmar que provavelmente ocorreu uma super-correção da atmosfera para a água na banda 3.



**Figura 20:** 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.



**Figura 21:** 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.



**Figura 22:** 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.

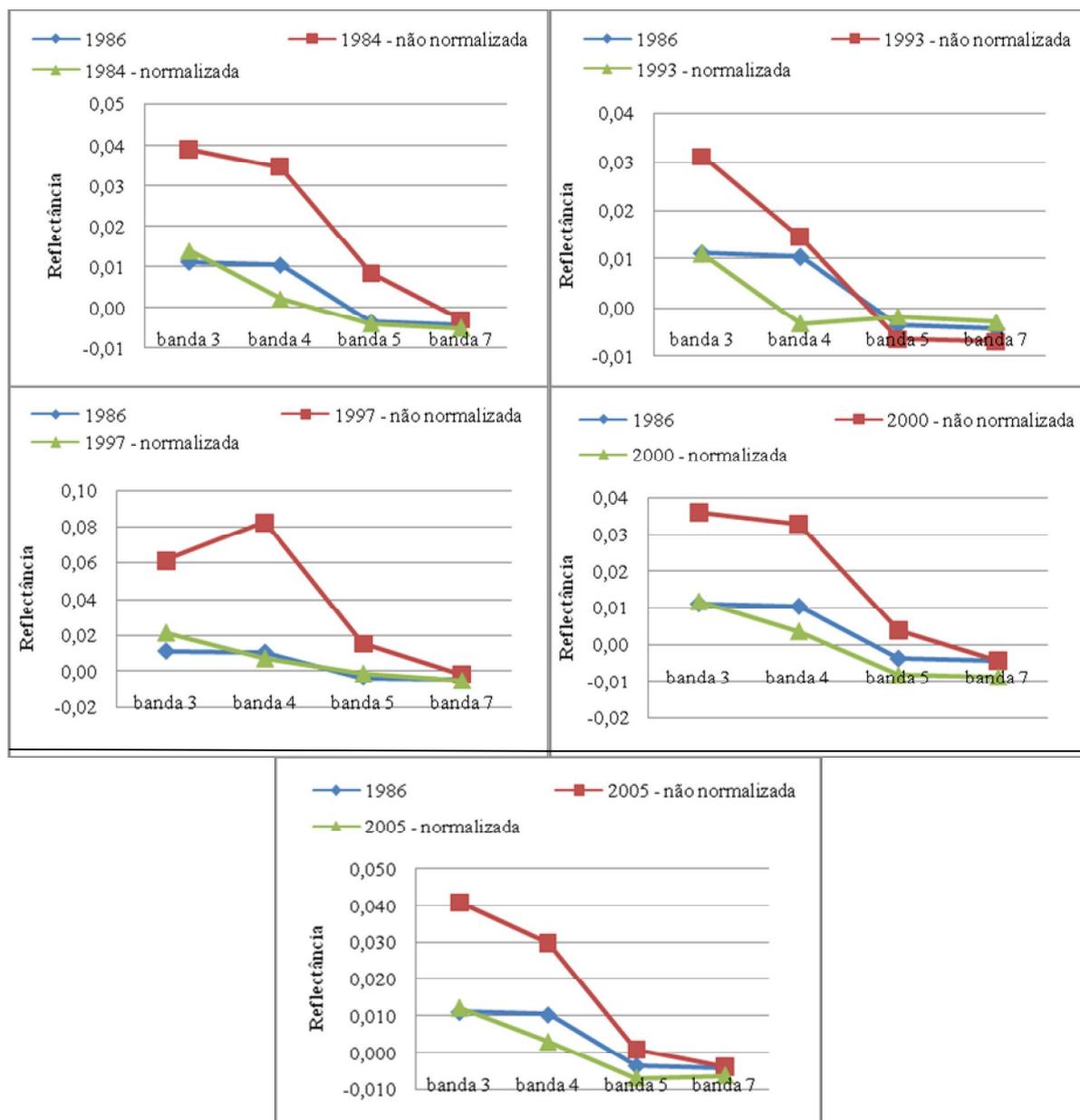
De acordo com Mather (2004) a atmosfera é um sistema dinâmico e complexo, e métodos baseados em dados da própria imagem, como o método de subtração do pixel escuro desenvolvido por Chavez (1996), simplesmente estimam a contribuição que o espalhamento da atmosfera tem na radiância de um pixel. No entanto, Song *et al.* (2001) compararam diferentes métodos de correção atmosférica e avaliaram seus efeitos na acurácia da classificação e da detecção de mudanças. Os autores concluíram que o método de subtração do pixel escuro apresentou um ótimo resultado na correção da influência atmosférica, sem afetar posteriormente a acurácia da detecção de mudança. Pax-Lenney *et al.* (2001) também acharam bons resultados na aplicação dos modelos do Chavez (1988, 1996), na correção atmosférica de imagens Landsat TM.

Song *et al.* (2001) afirmam ainda que para uma boa detecção de mudança o mais importante é assegurar que a radiometria das imagens esteja numa mesma escala relativa, não importando se os dados estão em refletância aparente ou de superfície.

A metodologia adotada para a escolha do alvo escuro ocasionou em uma super-correção dos efeitos atmosféricos da banda 3 da imagem de 1986. Os maiores erros foram registrados em alvos de água sem sedimento. No entanto, para a vegetação e o solo exposto o erro registrado foi muito pequeno em relação à escala do sinal desses alvos. Visto que o alvo principal de estudo é a vegetação, e as análises foram feitas baseadas em uma máscara das áreas vegetadas, esses erros na correção atmosférica não afetaram o resultado final do estudo.

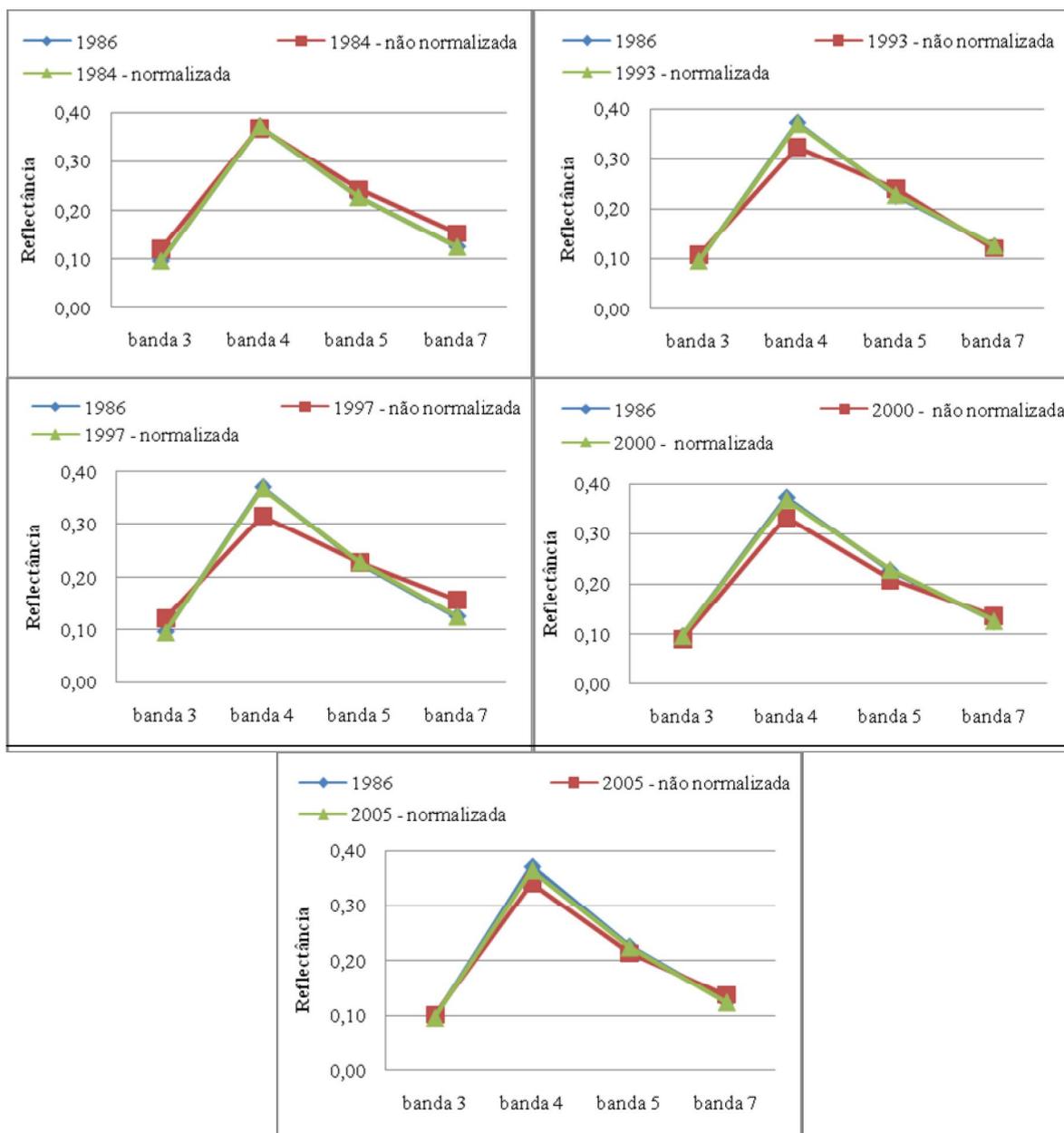
### **5.1.3 Normalização radiométrica**

O método de normalização radiométrica aplicado nas imagens multitemporais foi avaliado por meio de novos polígonos de alvos claros e escuros, diferentes dos selecionados para o pré-processamento, utilizados para a validação da técnica. Foi seguida a mesma metodologia e critérios aplicados na seleção dos alvos utilizados no pré-processamento. As novas médias coletadas nas imagens normalizadas foram comparadas com as novas médias coletadas na imagem utilizada como referência, e nas imagens antes de serem normalizadas (figuras 23 e 24).



**Figura 23:** Gráficos de dispersão dos valores médios dos alvos escuros selecionados para verificação do resultado da normalização radiométrica das imagens.

A figura 23 mostra que, após a normalização radiométrica, a curva espectral dos alvos escuros foi alterada, principalmente para a banda 4. A utilização de um alvo claro diferente para a banda 4 (na banda 4 foi utilizado vegetação jovem, para as demais bandas foi utilizado solo exposto argiloso e seco) pode ter ocasionado essa alteração na curva espectral. O desempenho da normalização também não se mostrou uniforme para todas as bandas.



**Figura 24:** Gráficos de dispersão dos valores médios dos alvos claros selecionados para verificação do resultado da normalização radiométrica das imagens.

Os alvos claros apresentaram um bom ajuste em relação à imagem base. No entanto, analisando o conjunto dos resultados, a normalização radiométrica aplicada entre as imagens não apresentou um bom desempenho.

Elvidge *et al.* (1995) afirmam que métodos de normalização radiométrica que utilizam regressões simples apresentam uma aplicação bem sucedida quando são utilizados pares de imagens que não contenham *outliers* estatísticos, ou seja, alvos presentes em apenas uma das cenas, como por exemplo, nuvens. Afirmam ainda que essa metodologia deva ser aplicada em imagens onde a vegetação se encontra em um estágio de crescimento e fenologia comparáveis.

Yuan e Elvidge (1996) compararam vários métodos de normalização radiométrica relativa em imagens do sensor MSS do satélite Landsat. Os autores afirmam que nuvens e sombras de nuvens, que nunca estão no mesmo lugar entre uma data e outra, tendem a confundir métodos que utilizam a cena inteira para a escolha dos alvos como o diagrama de Kauth-Thomas (Hall *et al.*, 1991), ou a escolha de alvos pseudo-invariantes (Schott *et al.*, 1988; Salvaggio, 1993).

A normalização radiométrica aplicada na seqüência multitemporal utilizada nesse estudo pode ser melhorada, tanto por meio de uma nova escolha de alvos claros e escuros invariantes como também testando outras metodologias, a fim de se obter um resultado mais acurado.

A escassez de objetos escuros na cena estudada e a não utilização das bandas 1 e 2, que poderiam ter auxiliado na visualização de corpos de água sem sedimento, ocasionou na escolha de “falsos” alvos escuros. Esses diferentes padrões espectrais obtidos após a normalização radiométrica, principalmente para a banda 4, podem interferir na qualidade do resultado das imagens índice de vegetação (AFRI<sub>2,1</sub> e NDVI).

Apesar de Song *et al.* (2001) afirmarem que a utilização da técnica de detecção de mudanças requer uma boa normalização radiométrica entre as imagens, os erros ocasionados pela técnica não alteraram o mapa da dinâmica geomorfológica fluvial, nem a contabilização das áreas de erosão e sedimentação, já que esses dados foram conferidos visualmente. No entanto, os erros apresentados pela técnica utilizada inviabilizam a automatização da metodologia.

## **5.2 Técnicas de processamentos das imagens**

### **5.2.1 Imagens índice de vegetação *Aerosol Free Vegetation Index* – AFRI**

Neste trabalho, as imagens AFRI<sub>2,1</sub> geradas a partir de dados do sensor TM do Landsat apresentaram valores positivos e negativos de uma amplitude muito grande, mas isso ocorreu devido a presença de alguns poucos pixels de ruído na imagem. A grande maioria dos pixels se concentrou entre os valores de -3 a +3. Foram coletados polígonos de quatro alvos característicos na cena e seus valores na imagem AFRI foram extraídos. Áreas de vegetação e água apresentaram valores muito parecidos, diferenciando dos valores de solo encontrados na imagem AFRI<sub>2,1</sub> da mesma data (tabela 8).

**Tabela 8:** Valores de AFRI encontrados na imagem gerada a partir da cena da data de 24/08/1984 do satélite Landsat 5TM

<b>Identificador</b>	<b>Objeto</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Média</b>
0	toda a cena	-126,1431	71,5243	0,8706
1	água branca	0,8059	1,0475	0,9174
2	vegetação	0,8588	0,9297	0,8906
3	solo	0,4154	0,4611	0,4399
4	água com sedimento decantado	0,6492	1,2739	0,9042

O  $AFRI_{2,1}$  utiliza os dados das bandas 4 e 7, do Landsat 5/TM. A vegetação verde sadia apresenta valores muito altos na banda 4 e valores muito baixos na banda 7. A água com sedimentos apresenta valores baixos nas duas bandas, só que como o  $AFRI_{2,1}$  é um índice de razão entre bandas essa diferença de valores se anula na equação, e os dois objetos (vegetação e água com sedimentos), que apresentam valores tão diferentes nas duas bandas, acabam ficando com valores de índice  $AFRI_{2,1}$  parecidos. Foram obtidos valores aproximados para a refletância de áreas de vegetação e água com sedimentos, obtidas da imagem Landsat 5 TM de 24/09/1984, para ilustrar o que ocorre com o índice  $AFRI_{2,1}$ . Por exemplo, na tabela 9 estão os valores de refletância e os valores de AFRI baseado na refletância média em áreas de vegetação, solo e água branca:

**Tabela 9:** 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.

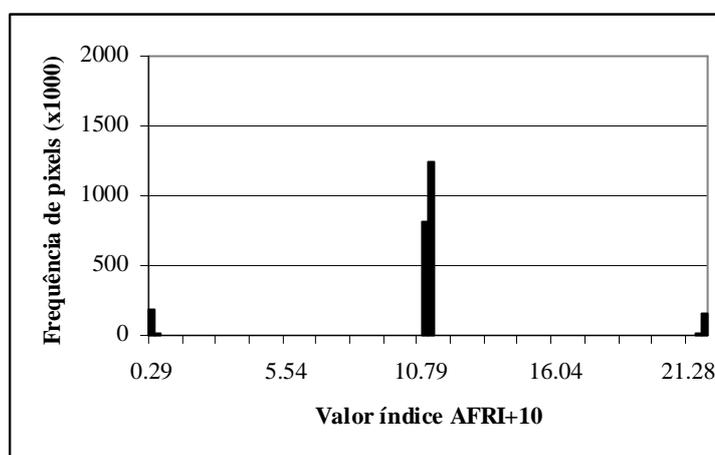
<b>Objeto</b>	<b>Refletância na banda 4</b>	<b>Refletância na banda 7</b>	<b>AFRI</b>
vegetação	0,4	0,05	0,88
solo	0,25	0,2	0,43
água	0,05	0,005	0,90

Temos os valores de  $AFRI_{2,1}$  para a vegetação de 0,88, para a água branca de 0,90 e para o solo exposto de 0,43. Então, somente a utilização das imagens  $AFRI_{2,1}$  não é suficiente para a criação de máscaras vegetação e não-vegetação, como já explicado no item 4.3.3.1.1. É preciso levar em consideração também que os erros detectados na normalização radiométrica

podem ter interferido nos valores da imagem AFRI<sub>2,1</sub>, visto que a banda 4 apresentou grandes alterações da curva espectral para alvos escuros.

### 5.2.2 Detecção de mudanças por subtração de imagens índice de vegetação

A detecção de mudança permitiu separar as duas áreas de interesse do trabalho, erosões e sedimentações (figura 25). Os pixels concentraram-se em três amplitudes de valores bem distintos uns dos outros, os valores das áreas de não mudança foram próximos de zero. O limiar escolhido (1 desvio padrão) foi suficiente para isolar as áreas de erosão (abaixo da média) das áreas de sedimentação (acima da média).



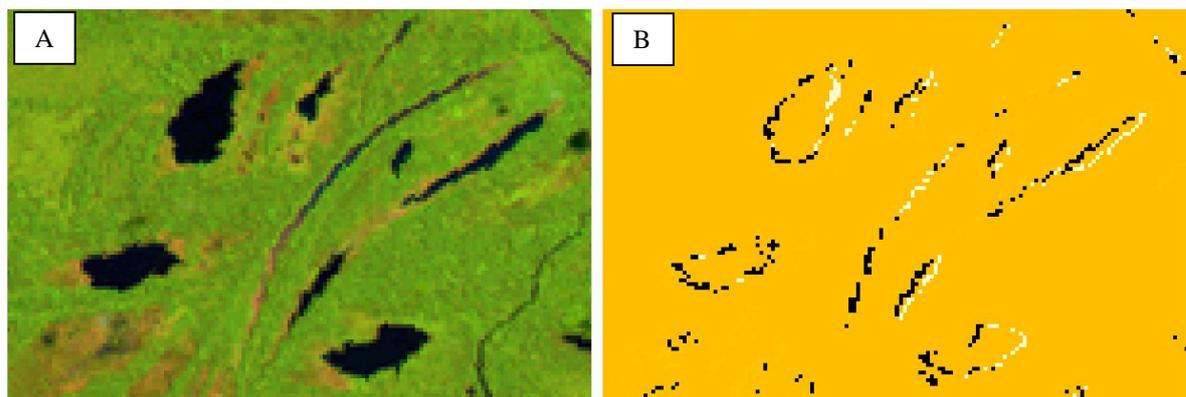
**Figura 25:** Distribuição e frequência dos pixels da imagem mudança.

Alguns erros foram observados na técnica de detecção de mudanças por subtração de imagens. Por exemplo, a margem direita do rio Solimões é ocupada por comunidades ribeirinhas dos municípios de Tefé e Alvarães, que utilizam, entre outras, práticas agrosilvipastoris. Pequenas áreas desmatadas de uma data para a outra foram detectadas e classificadas como erosão. Assim como pequenas regiões com características de solo exposto em uma cena e vegetação na cena seguinte, foram classificadas como sedimentação (figura 26). Essas são áreas pequenas (a maior mancha não passa de 6 ha), em relação à escala de trabalho do estudo. No entanto, esta pode ser uma importante fonte de erro em outras áreas de várzea mais densamente povoadas, ou na realização de um estudo mais minucioso de áreas erodidas e sedimentadas.



**Figura 26:** 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.

Outras pequenas áreas de mudança nas margens de lagos, canais e paranás também foram captadas pela técnica de detecção e mapeadas como áreas de erosão e sedimentação (figura 27).

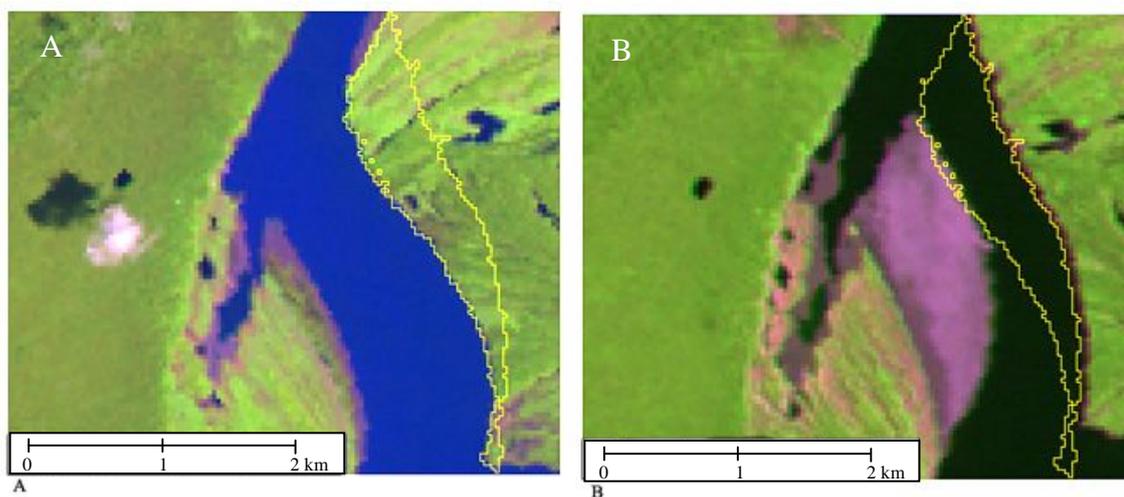


**Figura 27:** Diferenças de inundação entre as imagens foram mapeadas como áreas erodidas ou sedimentadas. Em A, imagem Landsat 5/TM de 04/09/2005, composição RGB543. Em B, imagem mudança entre 2000 e 2005. Em B, a cor laranja representa a área de não mudança, preto as áreas classificadas como erosão e bege áreas classificadas como sedimentação.

Essas diferenças nas margens dos corpos de água podem ser atribuídas a três fatores principais. O primeiro deles é a diferença na cota de inundação das imagens, que chega a ser quase 5 m entre as cenas de 2000 e 2005 (ver tabela 1). Essa diferença influencia tanto a determinação de limites das margens dos corpos de água, como da vegetação ao redor dos mesmos. O segundo fator são porções de vegetação seca ao redor dos lagos que apresentam cores avermelhadas, semelhantes ao solo exposto, em uma data e que na data subsequente recuperam o vigor, indicando vegetação sadia. Essas áreas são captadas na detecção de mudança como áreas erodidas/sedimentadas.

O terceiro fator a ser considerado são erros no georreferenciamento das imagens. Apesar de apresentarem RMS menores que 6 m entre as datas, este erro é uma média para toda a cena, e partes da imagem podem conter erros maiores. A sobreposição de pixels que representam objetos diferentes entre uma cena e outra pode ser captada como uma mudança. Por exemplo, o limite das margens dos corpos de água, com pixels de vegetação ao lado de pixels de água.

As diferenças apontadas nos parágrafos anteriores causaram a inclusão de algumas áreas na imagem diferença que não eram de interesse do estudo. Essas áreas são pequenas em tamanho, mas em grande quantidade. As áreas de grandes mudanças, aqui consideradas como áreas superiores a 10 ha, foram captadas adequadamente (figura 28).



**Figura 28:** Imagens Landsat TM5 composição RGB-543 do ano de 2000 (em A) e 2005 (em B), mostrando grande porção de área erodida (contorno amarelo).

Como o objetivo do trabalho foi mapear grandes áreas de mudança do canal, as pequenas áreas mapeadas erroneamente foram excluídas das imagens diferença por meio da aplicação de um filtro de área. Todos os grupos de pixels contíguos classificados como sedimentação ou erosão, mas com áreas menores do que 10 ha foram reclassificados como não-mudança.

Outros trabalhos realizados com técnicas de detecção de mudanças também registraram erros semelhantes nas imagens diferenças resultantes dos procedimentos. Nelson (1983) e Graça (2004) não obtiveram bons resultados utilizando a técnica de detecção de mudanças por subtração de imagens índice de vegetação, para monitoramento de áreas de floresta na Amazônia. Eles também realizaram correções manuais nas classificações finais. No entanto, Carvalho *et al.* (2005) compararam duas técnicas de detecção de mudanças por

subtração de imagens e obtiveram bons resultados. Oliveira *et al.* (2003) testaram diversas técnicas de detecção de mudanças por subtração de imagens, entre elas subtração por limiar da banda 5, e obtiveram bom resultado, ressaltando ainda a facilidade e simplicidade do método. Alves *et al.* (1998) aplicaram a mesma técnica, utilizando subtração por limiar na banda 5, em estudo realizado na região amazônica para detectar evoluções no desmatamento entre duas datas, também obtendo resultados satisfatórios.

A técnica de detecção de mudanças por subtração de imagens AFRI mostrou-se extremamente sensível a pequenas diferenças entre as imagens, como descrito por Crosta (1992), sendo necessário realizar algumas correções nas imagens das áreas erodidas e sedimentadas. Devido a esses fatores é possível chegar a duas conclusões: (1) levando em consideração que foi possível realizar o objetivo principal do trabalho, mapeamento de áreas de erosão e sedimentação, neste ponto a técnica foi considerada satisfatória. No entanto, (2) levando em consideração a alta quantidade de polígonos mapeados erroneamente e a necessidade de correção na imagem final, a técnica pode ser considerada insatisfatória. A necessidade de correções também não permite confiar no resultado gerado somente pela técnica, sem a verificação do que foi mapeado como mudança, inviabilizando a automatização da metodologia no caso de um estudo em maior escala.

É possível que, utilizando outras metodologias, mesmo outros tipos de técnicas de detecção de mudanças, seja possível identificar essas áreas sem a necessidade de tantos ajustes, utilizando outras técnicas que não sejam tão influenciadas por pequenas mudanças.

### **5.3 Evolução e dinâmica da paisagem da RDSM de 1984 a 2005**

#### **5.3.1 Mapeamento de áreas erodidas e sedimentadas e relação com os dados fluviométricos**

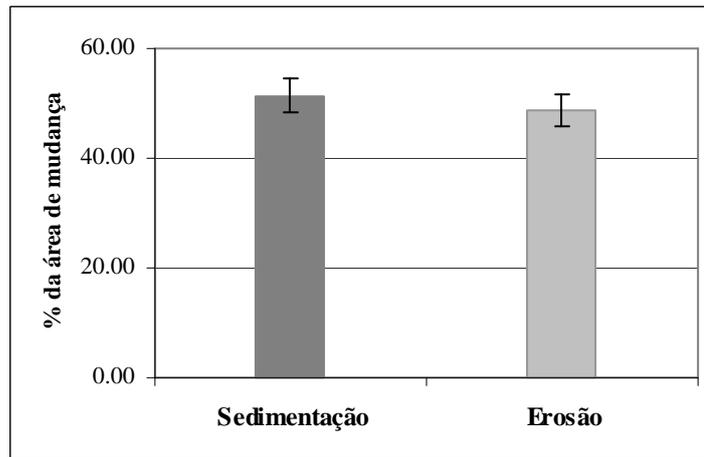
As áreas onde ocorreram processos de erosão e sedimentação na RDSM nos cinco períodos estudados estão apresentadas na tabela 10. Áreas de não mudança foram consideradas aquelas que permaneceram sob a mesma classe determinada na primeira imagem de 1984 (que foram somente duas: vegetação ou não vegetação – item 4.3.3.1.1) durante todo o período estudado. As áreas de mudança foram consideradas aquelas que alteraram sua classe inicial pelo menos uma vez em algum momento do período total avaliado.

**Tabela 10:** 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.

	não mudança	sedimentação	erosão	total (área de estudo)
		<b>mudança</b>		
<b>1984 a 1986</b> total	151.526	782	724	153.032
		1.506		
<b>1986 a 1993</b> total	148.349	2.509	2.174	153.032
		4.683		
<b>1993 a 1997</b> total	151.124	866	1.042	153.032
		1.908		
<b>1997 a 2000</b> total	150.982	1.249	801	153.032
		2.050		
<b>2000 a 2005</b> total	150.498	1.109	1.425	153.032
		2.534		

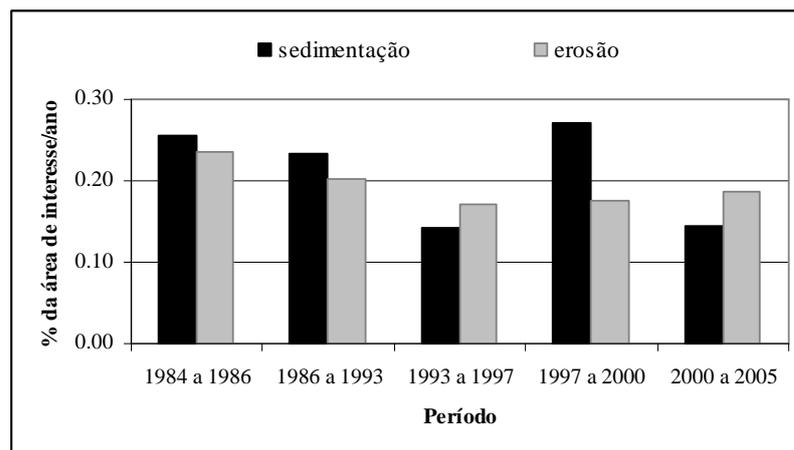
Em vinte e um anos, pelo menos 12.025 ha da região de estudo mudaram seu estado inicial de classificação (vegetação ou não vegetação) pelo menos uma vez, o que corresponde a 7,9% da área de interesse (veja figura 9 para a extensão da área de interesse). Na verdade, esse valor pode ser um pouco maior, pois áreas contíguas de mudança menores de 10 ha foram desconsideradas. Nos intervalos de tempo maiores entre duas datas consecutivas, um pixel pode trocar de estado duas vezes e ser contabilizado como não-mudança. No entanto, essas áreas representam menos de 1% da área de interesse do estudo (como discutido no item 5.3.4). As mudanças ocorrem por meio da erosão e sedimentação de áreas ao longo do canal (Kaliolla *et al.*, 1991; Mertes *et al.* 1996; Sioli, 1984; Sternberg, 1998). Os grandes rios que apresentam suas cabeceiras nas montanhas Andinas, ricos em sedimentos em suspensão (Irion, 1984; Sioli, 1976) promovem rápidas mudanças temporais e espaciais, à medida que os processos de erosão e deposição de sedimentos destroem e recriam as formas fluviais (Christofolletti, 1981; Kaliolla *et al.*, 1991; Sioli, 1984).

Em relação ao total da área de mudança, as taxas de sedimentação e erosão durante os vinte e um anos de estudo foram bem balanceadas (figura 29). Áreas de sedimentação representaram 51,4% da área de mudança. As áreas de erosão representaram 48,6% do total das áreas que mudaram no período entre 1984 e 2005, indicando uma clara compensação no saldo final do período.



**Figura 29:** Porcentagem que as áreas sedimentadas e erodidas representam do total de áreas contabilizadas como mudança.

As taxas anualizadas de erosão e sedimentação por período avaliado também mostraram valores aproximados, exceto pelo período de 1997 a 2000, onde a taxa de sedimentação foi consideravelmente maior que a taxa de erosão (figura 30). No entanto, a diferença entre as taxas não implica que os volumes de sedimentação excederam os de erosão, ou o contrário, pois o mapeamento não incorporou diferenças na elevação entre áreas novas sedimentadas e os bancos erodidos, ou a deposição de sedimentos em antigas superfícies da floresta alagada, sendo mapeadas apenas as deposições por acréscimo lateral nas margens do canal.

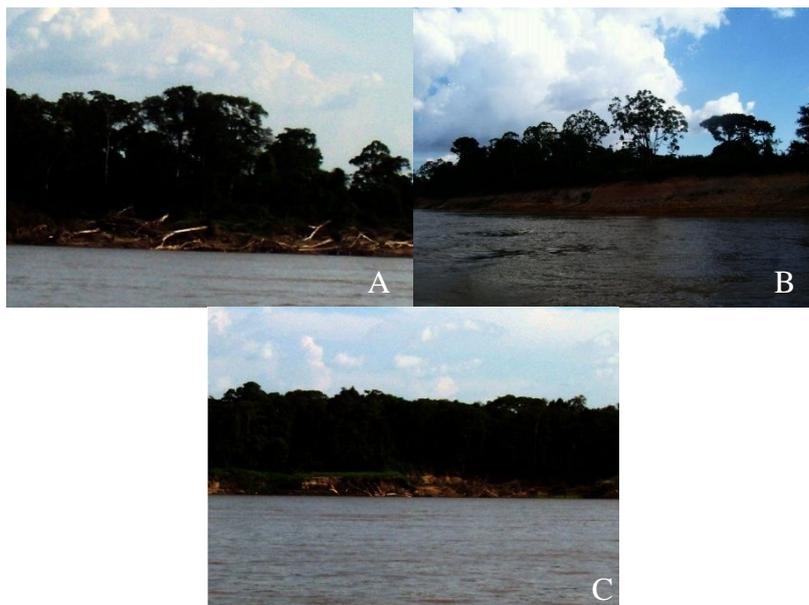


**Figura 30:** Porcentagem anual de áreas de mudança sedimentadas e erodidas em cada período.

A média anual de erosão foi de 294 ha, e a média anual de sedimentação foi de 310 ha. Somente para o trecho do rio Solimões, com cerca de 140 km e uma área total de aproximadamente 75.973 ha (ver figura 16 na metodologia), uma média de 168 ha/ano foram erodidos e 194 ha/ano foram depositados, tanto em forma de cordões marginais convexos

(barras de pontal) como em forma de ilhas fluviais. De acordo com a metodologia de mapeamento de áreas erodidas e sedimentadas utilizada (ver item 4.3.3.1.1 na metodologia), e com base em estudos sobre a sucessão da vegetação e a interação dessas com os sedimentos fluviais (Wittmann *et al.*, 2002; Wittmann *et al.*, 2004; Worbes *et al.*, 1992) pode-se afirmar que uma média 194 ha/ano de áreas depositadas no rio Solimões, e 310 ha/ano de áreas depositadas na área total do estudo, foram colonizadas pela vegetação primária, e possivelmente evoluirão para estágios florestais mais maduros. Kalliola *et al.* (1991) reportaram uma erosão anual de 260 ha para um trecho de 90 km do rio Ucayali (na Amazônia Peruana) em um período de quatro anos de avaliação, e 270 ha/ano de barreiras fluviais depositadas que se estabilizarão e serão colonizadas pela vegetação primária. As médias reportadas pelos autores mostram-se muito superiores as médias obtidas por esse estudo, principalmente levando em consideração a diferença no comprimento do trecho do canal e o período de tempo do estudo, o que já era esperado. Os rios entrelaçados originados nas montanhas andinas, desenvolvendo meandros a jusante, mostram-se extremamente dinâmicos, promovendo rápidas mudanças por meio da erosão e sedimentação. A dinâmica das florestas alagadas é mais complexa na alta bacia amazônica, caracterizada por uma série de processos de mudança na paisagem tectonicamente e fluvialmente induzidos (Sioli, 1984; Rasanen *et al.*, 1987; Salo e Rasanen, 1988; Kalliola *et al.*, 1991; Mertes *et al.*, 1996; Rossetti *et al.*, 2005).

As taxas de erosão e sedimentação medidas não apresentaram correlação significativa com nenhuma das variáveis fluviométricas analisadas (ver item 4.3.3.1.3 na metodologia). A taxa de erosão apresentou correlação com a cota máxima de inundação ao nível de 0,058 de significância. Conforme descrito por Sternberg (1998), na época da cheia, 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 do banco (figura 31). Nas margens laterais do canal principal esse efeito tende a ser mais acentuado, pois a velocidade da corrente é maior por ser um local aberto, sem muitos impedimentos para o fluxo de água, como ilhas. Áreas de bacias de rompimento, localizadas transversalmente aos diques marginais, também podem ser erodidas com o escoamento de parte da vazante do canal (Christofoletti, 1981).



**Figura 31:** Erosão na margem dos rios Solimões (A e B) e na margem do rio Japurá (C), na área de estudo. Fotos: Peixoto, J.M.A.

É preciso levar em consideração que as condições de sedimentação, erosão e transporte de sedimentos são conseqüências de uma série de fatores físicos e químicos, como tamanho e forma das partículas, forma de escoamento, padrão do canal fluvial, velocidade da corrente, obstáculos presentes no leito, temperatura e viscosidade da água, declividade do leito, tipo e velocidade do fluxo de água entre outros, que se combinam diferentemente ao longo do perfil longitudinal do canal fluvial (Christofoletti, 1981; Dunne e Dietrich, 1982; Silva *et al.*, 2004). Esses fatores e suas diferentes combinações interferem no padrão de troca de sedimentos entre o canal fluvial e a floresta alagada.

As áreas que são erodidas e sedimentadas em cada trecho do canal envolvem diversos fatores atuantes não só no trecho avaliado, mas também a montante do canal. A maioria das conseqüências desses fatores não é observada imediatamente nas partes a jusante do canal. É necessário realizar um estudo mais complexo para poder detectar qual tipo de relação ocorre entre as taxas de sedimentação/erosão por trecho de canal e as diversas variáveis ambientais que influenciam esses eventos.

As taxas de deposição líquida anualizada foram calculadas dividindo-se a diferença entre as áreas de sedimentação e erosão pela área total de interesse, e dividindo pelo respectivo intervalo de tempo (anos) (equação 20):

$$(20) \text{ Taxa de deposição} = ((AS - AE / AI) / CI) * 100$$

Onde:

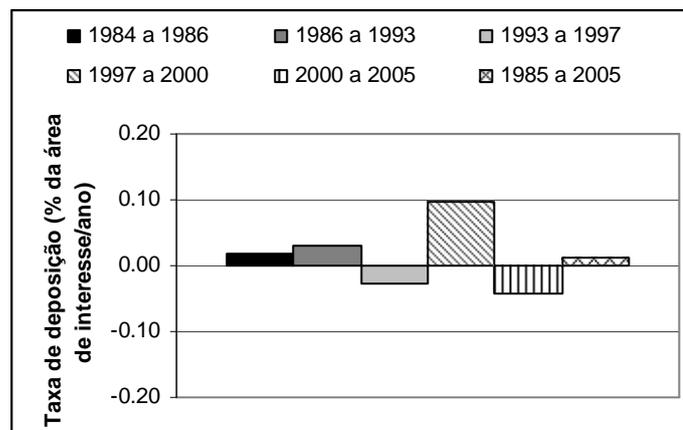
AS = área do período x contabilizada como sedimentação (hectares);

AE = área do período x contabilizada como erosão (hectares);

AI = área de interesse do estudo, ou seja, 153.032 ha;

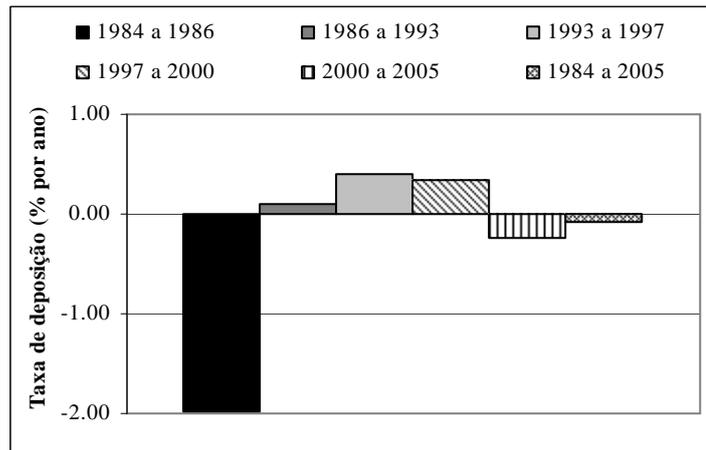
CI = comprimento do intervalo de tempo em anos no período x.

Os valores negativos significam que a imagem seguinte apresentava menos áreas vegetadas do que a anterior (figura 32). O período de 1997 a 2000 foi o que mostrou maior diferença, representando um ganho de áreas vegetadas de um ano para o outro, como já observado na figura 30. Apenas dois períodos apresentaram valores negativos, 1986 a 1993 e 2000 a 2005. O período total estudado, de 1984 a 2005, apresentou um valor de 0,01%, indicando que ocorre ganho de 0,01% de áreas vegetadas por ano no contorno da RDSM.



**Figura 32:** Taxa de deposição em % por ano em cada período e no tempo total estudado.

A figura 33 demonstra a mesma relação observada na figura 32, no entanto os valores foram gerados com os dados brutos de erosão e sedimentação, obtidos antes de realizada a aplicação do filtro de área e a correção manual nas imagens. Nota-se a grande diferença da amplitude de valores, principalmente no período de 1984 a 1986. Além de o valor ser negativo, ao contrário do observado para os valores reais na figura 32, mais de 99% dos pixels detectados como mudança nesse período estava classificado erroneamente. Essa diferença ratifica a conclusão de que a detecção de mudanças por imagem índice de vegetação AFRI<sub>2,1</sub> realizada neste estudo não apresentou bom resultado.



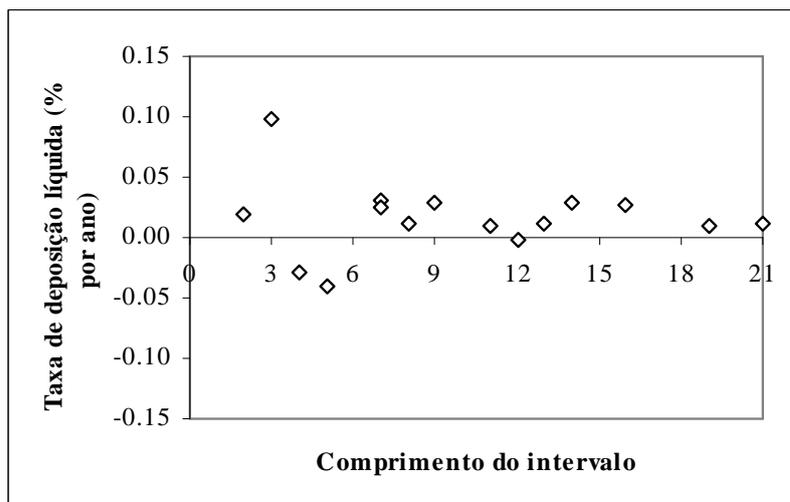
**Figura 33:** Valores de taxa de deposição obtidos com os dados brutos (antes de realizada a aplicação do filtro de área e correção manual) de erosão e sedimentação mapeada com a técnica de detecção de mudança por subtração de imagens índice de vegetação.

Os valores reais registrados para as taxas de deposição foram bem baixos (figura 32). Levando em consideração os erros no registro entre as imagens e a diferença entre as cotas de inundação em cada data, o valor de 0,01% obtido para o período total (1984 a 2005) pode estar incluído no erro do mapeamento das áreas. Para verificar a tendência de deposição ao longo do tempo, a relação entre o comprimento do intervalo de tempo e a taxa anual de deposição foi avaliada usando todos os pares de datas. Como o número de observações reais é baixo ( $n = 5$ ), esse valor foi ampliado combinando-se diferentes datas dentro do período total (de 1984 a 2005), no intuito de obter um maior número de observações em diferentes intervalos de tempo (tabela 11). Os valores de sedimentação e erosão desses novos períodos foram recalculados com base nos valores reais já medidos. Embora existam trechos do canal que sofrem mais de uma mudança (erosão e sedimentação) em uma mesma porção de área, essas áreas contabilizaram menos de 1% da área de interesse do estudo (ver item 5.3.4 mais à frente). Como representam um valor muito pequeno, essas áreas de grande dinâmica de troca de estados não influenciam a contabilização dos processos de erosão e sedimentação entre dois ou mais períodos. Então, por exemplo, para o intervalo de tempo entre 1986 a 1997 foi feita a somatória das áreas erodidas e sedimentadas contabilizadas no período de 1986 a 1993 com as contabilizadas no período entre 1993 a 1997.

**Tabela 11:** 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.

Tempo 1	Tempo 2	Comprimento do intervalo (anos)	Sedimentação o (hectares)	Erosão (hectares)	Taxa de deposição (% da área de interesse por ano)
1984	1986	2	782	724	0.02
1986	1993	7	2509	2174	0.03
1993	1997	4	866	1042	-0.03
1997	2000	3	1249	801	0.10
2000	2005	5	1109	1425	-0.04
1984	2005	21	6515	6166	0.01
1984	2000	16	5406	4741	0.03
1984	1997	13	4157	3940	0.01
1984	1993	9	3291	2898	0.03
1986	1997	11	3375	3216	0.01
1986	2000	14	4624	4017	0.03
1986	2005	19	5733	5442	0.01
1993	2000	7	2115	1843	0.03
1993	2005	12	3224	3268	0.00
1997	2005	8	2358	2226	0.01

A relação entre as taxas de deposição e o intervalo de tempo pode ser visualizada na figura 34. Isolando os dados em dois grupos de intervalos de tempo em intervalos menores (de 2 a 9 anos) e maiores (de 11 a 21 anos), avaliou-se a variância dos dados nos dois grupos. O grupo dos intervalos menores mostrou uma variância vinte vezes maior que o grupo dos intervalos maiores, respectivamente 0,002 e 0,0001. A variância da taxa líquida é muito baixa nos dois grupos, e tende para zero nos maiores intervalos. Isto sugere uma tendência de estabilização em torno de zero mudança líquida.



**Figura 34:** Taxa de deposição de sedimentos em relação ao comprimento do intervalo de tempo de estudo.

Para o cálculo do intervalo de confiança das médias das taxas de deposição nos dois grupos de intervalos de tempo (maiores e menores) foi aplicado um valor crítico de t de Student = 2,78. Esse valor corresponde a um intervalo de confiança de 95%, considerando quatro graus de liberdade, ou seja,  $n = 5$ , pois as quinze observações no gráfico da figura 32 são derivadas de apenas cinco observações independentes. A taxa média de deposição nos intervalos menores (de 2 a 9 anos) foi de 27 ha/ano, com um intervalo de confiança de -53 a 107 ha/ano. Para os intervalos de tempo maiores (de 11 a 21 anos) a taxa média de deposição foi de 21 ha/ano, com um intervalo de confiança de 0 a 41 ha/ano.

Embora os pontos do gráfico na figura 34 indiquem uma predominância à deposição líquida positiva em todos os comprimentos de intervalo de tempo, e a variância sugira uma estabilização ao longo de intervalos de tempo maiores, os intervalos de confiança foram muito amplos e incluem o valor zero em ambos os grupos. Portanto, por meio da metodologia utilizada neste estudo não foi possível inferir a ocorrência de perda ou ganho líquido de área ao longo dos anos. Em relação à escala de tempo geológico, vinte e um anos representam um período curto de tempo. É necessário um estudo com um intervalo de tempo mais amplo e um maior número de observações independentes para poder determinar alguma tendência.