



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

INPE-11483-NTC/365

**PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DAS CAMPANHAS DE CAMPO  
NA PLANÍCIE DE CURUAI PARA ESTUDO DA DINÂMICA DE  
CIRCULAÇÃO DA ÁGUA ENTRE SISTEMAS LÓTICOS,  
LÊNTICOS E A PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO AMAZÔNICA**

Cláudio Clemente Faria Barbosa  
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo  
Waterloo Pereira Filho  
João Carlos Carvalho

## **RESUMO**

Este trabalho descreve a metodologia usada para planejar e executar quatro campanhas de campo no lago Curuai (estado do Pará). O objetivo deste trabalho foi estabelecer um conjunto de estados que fosse representativo da dinâmica do sistema rio/planície de inundação e coletar informações que caracterizassem estes estados. Estas campanhas foram realizadas entre setembro de 2003 e junho de 2004, para coletar dados limnológicos, espectrais e batimétricos, a serem usados no estudo da circulação de água entre o rio Amazonas e os lagos da planície de Curuai. Estas campanhas foram financiadas pelo projeto FAPESP (2003/00785-3 (ESTUDO DA DINÂMICA DE CIRCULAÇÃO DA ÁGUA ENTRE SISTEMAS LÓTICOS, LÊNTICOS, E A PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO AMAZÔNICA), e pelo projeto LBA-LC-07. Uma síntese dos dados coletados, do processo de validação destes dados e resultados preliminares, são também apresentados.

**PLANNING AND EXECUTION OF FIELD CAMPAIGNS ON PLANÍCIE DE CURUAI TO STUDY OF WATER CIRCULATION DYNAMIC AMONG LENTIC SYSTEM, LOTIC SYSTEM AND AMAZON FLOODPLAINS**

**ABSTRACT**

This work describe the used methodology to plan and execute four field campaigns at the Curuai Lake (Pará State). The objective of the work was to settle a set of states that were representative of the floodplain/river dynamics and gather information of these states. These campaigns carried out between September 2003 and June 2004 for gathering limnologic, spectroscopic and bathymetric data acquisition to be used to study of water circulation between Amazon River and Amazon floodplains lakes and wetlands. These campaigns were supported by FAPESP project (2003/00785-3 (ESTUDO DA DINÂMICA DE CIRCULAÇÃO DA ÁGUA ENTRE SISTEMAS LÓTICOS, LÊNTICOS, E A PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO AMAZÔNICA), and LBA-LC-07 project. A syntheses of the gathered data, the validation process and preliminary results are also presented.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	4
LISTA DE TABELAS .....	5
1.1 Introdução .....	6
1.2 Planejamento das campanhas de Campo .....	6
1.2.1 Determinação dos períodos das campanhas de Campo .....	6
1.2.2 Determinação dos pontos de coletas .....	9
1.3 Execução das campanhas de Campo .....	14
1.3.1 Infra-estrutura utilizada durante as campanhas .....	20
1.4 Processamento dos dados de campo .....	22
1.4.1 Parâmetro limnológicos .....	22
1.4.2 Radiometria de campo .....	26
1.4.3 Dados batimétricos .....	29
1.4.4 Resultados dos processamentos de cada tipo de dado .....	32
1.5 Próximas etapas de processamento .....	34
1.5.1 Dados radiométricos .....	34
1.5.2 Imagens de satélite .....	35
1.5.3 Dados Batimétricos .....	37
1.6 Integração de resultados .....	37
1.6.1 Inferência sobre a Dinâmica de Circulação da Água .....	37
1.6.2 Inferência sobre a dinâmica de volume de água na planície .....	39
1.7 Conclusões .....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

## LISTA DE FIGURAS

1 – Hidrógrafa da área de estudo. (Fonte: ANA- Agência Nacional de Águas) .....	7
2 – Direção do fluxo durante cada estado considerado relevante para estudo de dinâmica de água no sistema Rio Amazonas/Planície de Curuai. ....	8
3 – Planejamento das missões de campo em função das variações de nível da água em Curuai.....	9
4 – Procedimentos Metodológicos para determinação das estações amostrais.....	13
5 – Classes homogêneas de água e localização dos pontos de coletas para os quatro estados considerado para o sistema rio/planície. ....	14
6 – Configuração da geometria de aquisição de dados espectro-radiométricos. ....	17
7 – Configuração do sistema de aquisição de dados espectro-radiométricos.....	17
8 – Fator de Reflectância-Birecional em função do comprimento de onda das estações amostrais.....	18
9 – Composição RGB-TM 543, referente ao Estado 2 (12 de Dezembro 2001) .....	19
10 – Conjunto de rotas planejadas para levantamento batimétrico. ....	19
11 – Hidrógrafa do período de realização das campanhas e taxa média de variação do nível d'água durante cada campanha. ....	20
13 – Filtração e preparação de amostras para análise.....	21
14 – Equipamentos utilizados para medidas in situ.....	22
15 – Exemplo de planilha com dados de campo. ....	23
16 – Representação através de uma imagem em níveis de cinza da espacialização por krigeagem do pH das águas da planície. Níveis de cinza mais claro representam maior pH.....	25
17 – Classes resultantes do agrupamento por Média K para dados do Estado 2.....	27
18 – Classes resultantes do agrupamento por Média K para dados do Estado 3.....	28
19 – Dado bruto gerado pelo sonar Lowrance modelo LMS-480.....	30
20 – Resultados do processamento preliminar dos dados batimétricos.....	32
21 – Delimitação de massas de água a partir de suas respostas espectrais utilizando segmentação de imagens seguido de uma classificação não supervisionada, .....	35
22 – Comportamento espectral dos tipos de água do Lago Curuai. ....	36
23 – Diferentes configurações espaciais de uma determinada massa de água ao longo do tempo. ....	39
24 – Método para determinação do volume de um lago. Adaptado de Kalff, 2001.....	40
25 – Método para determinação do volume de um lago através de uma grade regular de células. (a) – Modelo digital do Lago particionado em células. (b) – Representação 3D das células de profundidade.....	42

## LISTA DE TABELAS

1 - Valores mensais em cm da hidrógrafa no período de 1993 a 2002 .....	7
2 – Períodos identificados para cada. ....	9
3– Campanhas de campo. ....	15
4– Parâmetros medidos pelo sensor Horiba, modelo U10. ....	16
5 – Classe de curvas espectrais referentes ao estado 2 e síntese dos dados limnológicos. ....	28
6 – Classe de curvas espectrais referentes ao estado 3 e síntese dos dados limnológicos. ....	29
7 – Média do valor digital de cada classe em cada banda TM. ....	36

## **1.1 Introdução**

Em março de 2002 submeteu-se a FAPESP um projeto (FAPESP 2002/00785-3) de pesquisa cujo objetivo foi avaliar a viabilidade de uma proposta metodológica para estudo da dinâmica de circulação de água na bacia amazônica. Com os recursos deste projeto realizou-se no período compreendido entre 13 e 22 de julho de 2002 um campo exploratório na planície de Curuai, local escolhido para desenvolvimento e validação da metodologia proposta. A realização deste trabalho de campo e a análise conjunta dos dados coletados e das imagens de satélite disponíveis para a área, permitiram não só a equipe avaliar a intra-estrutura disponível para as coletas de campo, como também delinear as atividades a serem desenvolvidas para execução das campanhas previstas.

Apresenta-se a seguir uma descrição do planejamento e execução das quatro campanhas de campos, realizadas entre Setembro de 2003 e Junho de 2004, e dos processamentos iniciais realizados até o momento.

## **1.2 Planejamento das Campanhas de Campo**

### **1.2.1 Determinação dos Períodos das Campanhas de Campo**

Sabe-se que a bacia amazônica possui um ciclo anual com um período de cheia e um período de água baixa. Observa-se também, que devido à sua extensão, estes períodos não são simultâneos à montante, no centro e a jusante da bacia. Esta informação qualitativa, apesar de relevante, não é suficiente como parâmetro inicial para delinear uma estratégia de estudo e planejamento de atividade de coletas de campo para compreender a dinâmica de água na bacia. Dados quantitativos, como cotas diárias de nível d'água podem dar uma descrição mais acurada sobre a dinâmica de volume d'água na bacia.

A FIGURA 1, mostra a dinâmica do nível d'água na planície de Curuai, no período compreendido entre Janeiro de 1993 e Dezembro de 2002. Pela análise dessa figura pode-se observar que a hidrógrafa, em Curuai, tem um comportamento monomodal, caracterizado por níveis máximos entre Maio e Julho e mínimos entre Outubro e Dezembro.

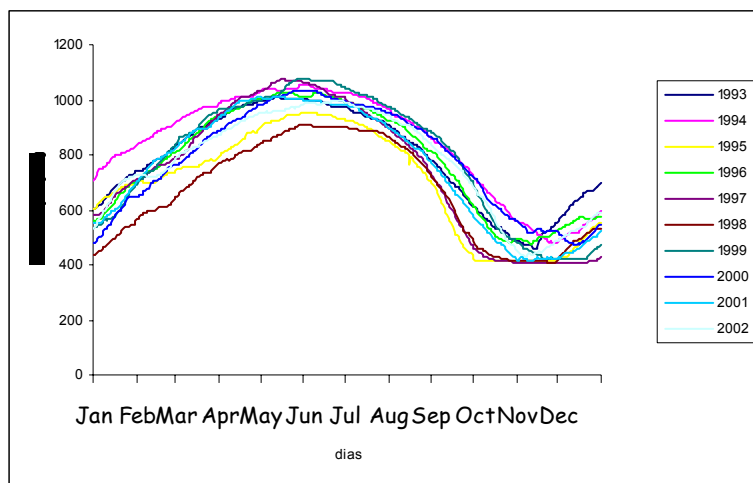


FIGURA 1 – Hidrógrafa da área de estudo. (Fonte: ANA- Agência Nacional de Águas). Uma análise sobre valores médios TABELA 1 - revela que o nível sazonal da água varia entre 5 e 7 metros (4,91 e 6,55) e que sua amplitude inter-anual atinge até 1,6 metros. Confirma também que o período de cheia ocorre entre maio e junho e o de baixa entre novembro e dezembro.

TABELA 1 - Valores mensais em cm da hidrógrafa no período de 1993 a 2002.

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
<b>Média (cm)</b>										
<b>Janeiro</b>	674	783	661	629	642	497	594	572	608	650
<b>Fevereiro</b>	779	876	713	758	749	601	760	705	771	734
<b>Março</b>	886	957	764	881	861	707	902	827	881	832
<b>Abril</b>	969	1008	848	976	994	802	979	937	982	915
<b>Mai</b>	<b>1004</b>	<b>1040</b>	932	<b>1018</b>	<b>1062</b>	877	1036	1014	<b>1006</b>	963
<b>Junho</b>	986	1039	<b>945</b>	1011	1034	<b>904</b>	<b>1065</b>	<b>1015</b>	990	<b>989</b>
<b>Julho</b>	941	1002	895	963	950	888	1012	973	946	968
<b>Agosto</b>	848	917	785	873	825	805	929	909	842	896
<b>Setembro</b>	699	800	551	717	599	609	803	791	678	768
<b>Outubro</b>	544	640	416	522	425	436	565	621	495	568
<b>Novembro</b>	<b>498</b>	<b>517</b>	<b>415</b>	<b>497</b>	<b>407</b>	<b>412</b>	443	527	<b>421</b>	<b>451</b>
<b>Dezembro</b>	636	535	483	561	409	490	<b>432</b>	<b>500</b>	467	537
<b>mínimo</b>	498	517	415	497	<b>407</b>	412	432	500	421	451
<b>Maximo</b>	1004	1040	945	1018	1062	904	<b>1065</b>	1015	1006	989
<b>Amplitude</b>	506	523	530	521	<b>655</b>	<b>491</b>	633	515	585	538

A partir da análise da hidrógrafa mostrada na FIGURA 1 e TABELA 1, considerou-se como ponto de partida que quatro estados distintos seriam relevantes para o entendimento da dinâmica de água na planície de Curuai. Dois estados seriam caracterizados pela estabilidade do nível d'água na planície de Curuai, ou seja, a taxa de variação diária no nível d'água seria mínima, tendendo a zero. Um destes estados, aqui



denominado de estado 1, ocorreria quando a hidrógrafa atinge a sua altura máxima, situação esta em que a planície e o rio Amazonas alcançam um ponto de equilíbrio e a troca de água entre esses sistemas se torna mínima (entrada e saída de água tendendo a zero, quaisquer que sejam as fontes). O outro estado, denominado de estado 2, estaria localizado no ponto mais baixo da hidrógrafa, quando acontece uma segunda condição de equilíbrio, com o rio e a planície em seus níveis mais baixos. O sistema rio/planície entraria nos estados 1 e 2 no período de cheia e de baixa, respectivamente. Os dois outros estados seriam estados de transição entre os dois primeiros e caracterizados pela instabilidade do nível d'água na planície, ou seja, com taxa máxima de variação diária no nível d'água. O estado 3, estaria na transição do estado 2 para o estado 1 e seria representativo do período de subida do nível ou entrada da água na planície. Finalmente o estado 4, estaria na transição do estado 1 para o estado 2 e seria representativo do período de descida ou saída da água da planície para o rio. A FIGURA 2 ilustra a seqüência de estados e as direções de fluxo entre o sistema rio/planície durante cada um destes estados.

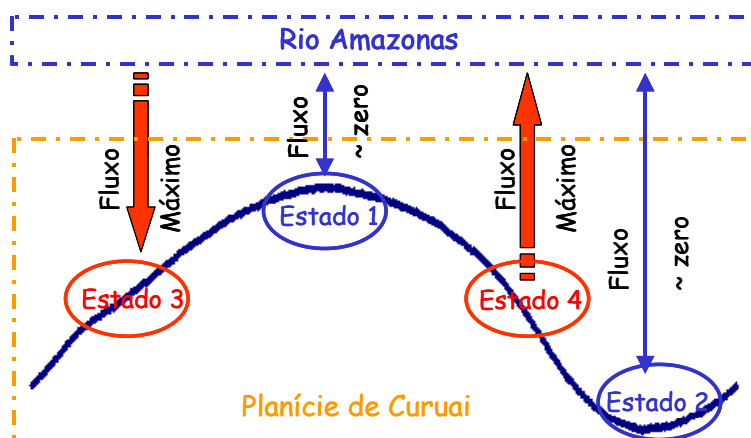


FIGURA 2 – Direção do fluxo durante cada estado considerado relevante para estudo de dinâmica de água no sistema Rio Amazonas/Planície de Curuai.

Definidos os quatro estados considerados relevantes do sistema rio/planície, a determinação das datas para coleta de dados em campo resumiu-se em identificar na série histórica de cotas, os períodos dentro do ciclo hidrológico representativos destes quatro estados.

Como a estabilidade do nível d'água foi a condição para diferenciar os estados 1 e 2 dos estados 3 e 4, determinou-se a taxa de variação média diária da cota para ciclos hidrológicos dentro do período 1 janeiro de 1993 a 31 de Dezembro de 2002. A

FIGURA 3 apresenta estas taxas e a localização dos estados na hidrógrafa. Adotou-se como condição de estabilidade taxas de variação menores do que 0.05 cm/hora<sup>1</sup> e condição de instabilidade taxas iguais ou maiores do que 0.15 cm/hora<sup>2</sup>. A TABELA 2 apresenta os períodos identificados, baseados nas condições adotadas, para cada um dos estados do sistema.

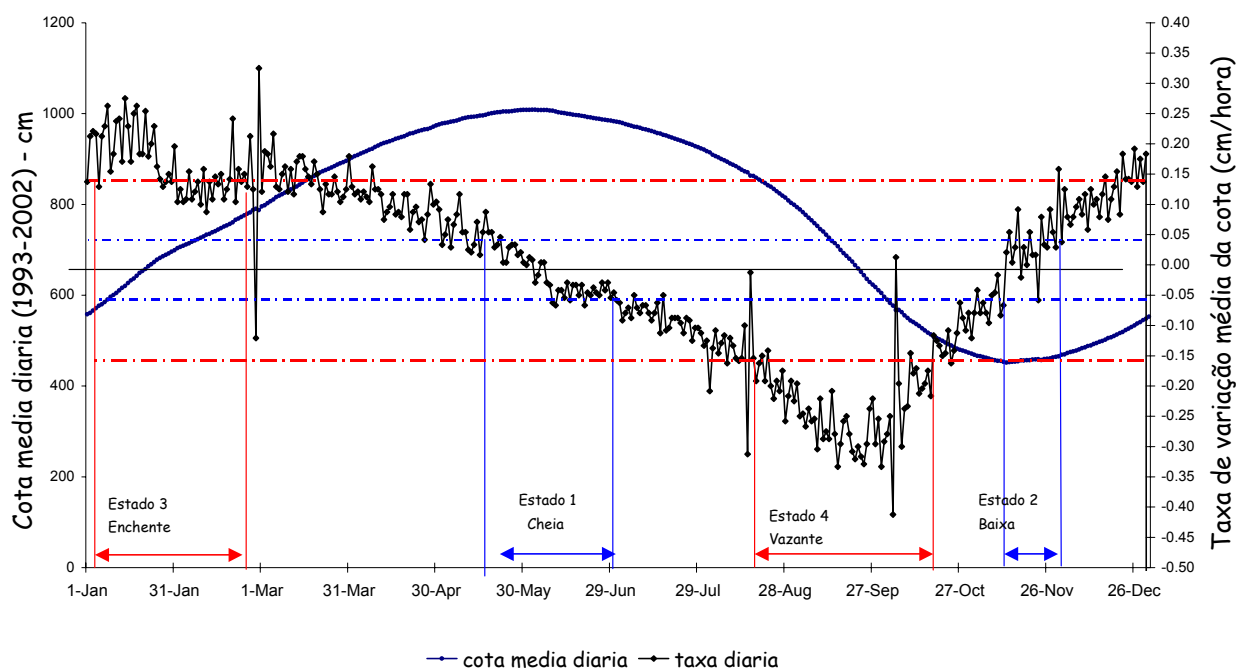


FIGURA 3 – Planejamento das missões de campo em função das variações de nível da água em Curuai.

TABELA 2 – Períodos identificados para cada.

<i>Estado do sistema rio/planície</i>	<i>Estado 1 (cheia)</i>	<i>Estado 2 (baixa)</i>	<i>Estado 3 (enchente)</i>	<i>Estado 4 (Vazante)</i>
Período identificado	18/05 a 30/06	12/11 a 01/12	01/01 a 22/02	18/08 a 17/10

### 1.2.2 Determinação dos Pontos de Coletas

Identificado os períodos adequados para realização das campanhas de campo, o passo seguinte foi determinar a localização dos pontos de coleta. O procedimento

<sup>1</sup> Linha horizontal azul e pontilhada.

<sup>2</sup> Linha horizontal vermelha e pontilhada.

metodológico utilizado para determinação da localização geográfica de um conjunto pontos de coleta que otimizasse o trabalho de campo e garantisse a representatividade espacial dos parâmetros de qualidade de água a serem utilizados no estudo da dinâmica da circulação dos tipos de água esta descrito em Barbosa et al. 2002 e no relatório final do projeto FAPESP 2002/00785-3. A FIGURA 4 apresenta as principais etapas deste procedimento que serão descritos de forma sucinta a seguir:

- A partir da série histórica de imagens multiespectrais (TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7) disponível, selecionaram-se quatro imagens, tal que cada uma das imagens fosse relativa a um dos quatro estado considerados relevantes para o sistema rio/planície. Estas imagens foram inicialmente convertidas para valores de "reflectância de superfície", isto é, feita a correção dos efeitos de espalhamento e absorção atmosférica e a normalização das variações sazonais na irradiância solar. Esta conversão para os valores de "reflectância de superfície" possibilita a comparação das imagens ao longo do tempo, garantindo que as modificações detectadas entre datas diferentes sejam relativas a variações no comportamento dos objetos da cena imageada, e não das condições de imageamento (Vermote et al.,1997). Além disso, essa conversão para dados de reflectância torna viável a comparação entre as informações radiométricas extraídas das imagens e aquelas derivadas de medidas espectralradiométricos de campo. O algoritmo 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) foi utilizado para a recuperação dos valores de reflectância de superfície. Detalhes do modelo de transferência radiativa do 6S podem ser encontrados em Vermote et al. (1997).
- A seguir as imagens foram submetidas à correção geométrica para garantir a correspondência entre os pontos imageados nas diferentes datas. Maiores detalhes sobre os procedimentos de correção geométrica podem ser encontrados em Richards (1995).
- A banda 5 das imagens TM Landsat foi utilizada para gerar máscaras com duas classes: superfície de água livre de vegetação e superfície de água vegetada ou terra firme. As máscaras permitiram restringir a análise às superfícies de água aberta reduzindo o tempo de processamento.

- As imagens de cada uma das datas, recortadas com a máscara do item anterior, foram submetidas a um algoritmo de segmentação (Bins et. Al., 1996) e a um classificador não supervisionado por regiões de modo a identificar massas de água opticamente distintas. A FIGURA 5 mostra o resultado deste processamento para imagens representativas dos quatro estados do sistema rio/planície. Para cada imagem, o resultado é um conjunto de classes, tal que cada classe representa uma massa de água opticamente homogênea naquela data (kirk, 1983). Vale ressaltar que as cores que aparecem nas classes de cada imagem da FIGURA 5 representam massas homogêneas de água naquela data. Uma mesma cor que aparece em mais de um estado, não significa que a massa de água é a mesma nos dois estado. Significa somente que representam regiões de águas homogêneas naquela dada data.
- A partir destes resultados pôde-se definir um esquema de amostragem de dados no campo que contemplasse as diferentes massas de água em cada estado do sistema, e evitar a sobre-amostragem em massas homogêneas.

Além da localização, também foi estimado a priori o número mínimo de pontos que seria necessário para o desenvolvimento do estudo, dado que as análises de laboratório e a permanência em campo possuem custo elevado. Além disso o aumento do tamanho da amostra mantendo-se a mesma infra-estrutura de coleta implica também num aumento do tempo de coleta, o que por sua vez aumenta a variabilidade das condições do ambiente amostrado. Para se determinar o número mínimo de pontos, considerou-se além da representatividade espacial das variáveis medidas o fato de que se previa a inferência, por krigeagem, de valores das variáveis para posições não visitadas (interpolação/espacialização). A técnica de krigeagem, através de análise variográfica, modela a estrutura ou correlação espacial entre os valores medidos de uma determinada variável em estudo (Isaaks e Srivastava, 1989). Para que a modelagem da correlação espacial seja possível, um número mínimo de amostras precisa existir.

Para determinar este número mínimo para as campanhas representativas dos quatro estados definidos anteriormente, foi feita uma análise com a redução progressiva do número de pontos amostrais, sobre o conjunto de pontos amostrais disponíveis da campanha exploratória de 2002 (Projeto FAPESP 2002/00785-3). Chegou-se que o número mínimo seria de 70 amostras. Vale ressaltar, entretanto, que o aumento do

número de pontos amostrais além de 70, tende a melhorar a qualidade das inferências. Por questão de custo, trabalhou-se com 70 amostras para análise de laboratório. Com o objetivo de refinar as inferências de variáveis que eram medidas *in situ*, e que não acarretavam em custos adicionais de análise de laboratório, aumentou-se o número de pontos amostrais para estas variáveis. A decisão de aumentar o número de pontos amostrais para variáveis medidas *in situ*, levou a dois tipos de pontos amostrais; aqueles que possuíam variáveis com análise de laboratório e medidas *in situ* foram denominados de pontos completos, e aqueles só com medidas *in situ* de pontos incompletos.

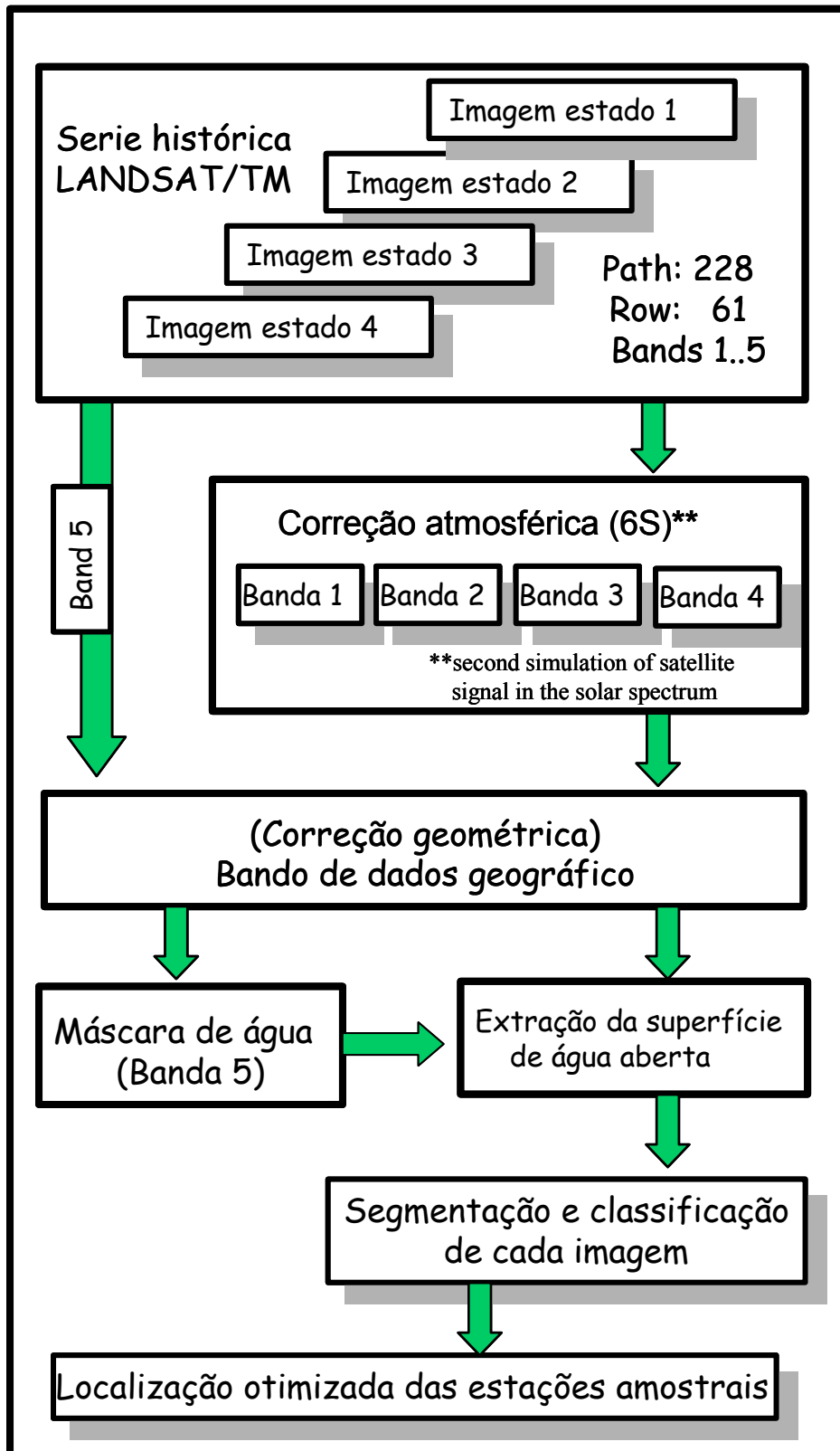


FIGURA 4 – Procedimentos Metodológicos para determinação das estações amostrais.

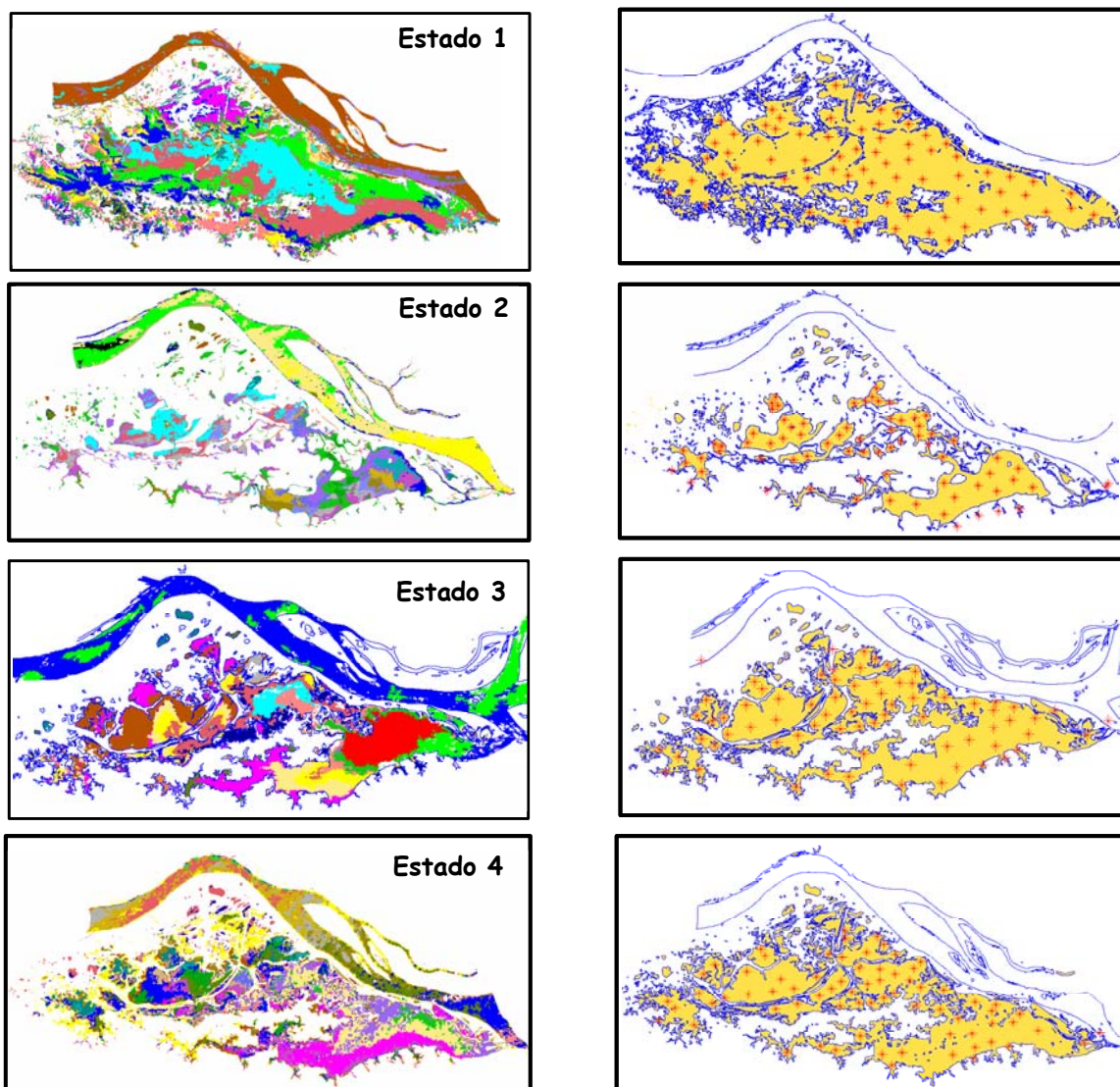


FIGURA 5 – Classes homogêneas de água e localização dos pontos de coletas para os quatro estados considerado para o sistema rio/planície.

### 1.3 Execução das Campanhas de Campo

Após a definição dos períodos adequados para coletas e do número de pontos amostrais, programaram-se as campanhas de campo. A TABELA 3 mostra os períodos estimados como adequados, os períodos de execução das campanhas de campo, as variáveis medidas e o número de pontos amostrais de cada variável em cada campanha.

TABELA 3– Campanhas de campo.

	CAMPANHAS DE CAMPO			
	Campanha I (Estado 4)	Campanha II (Estado 2)	Campanha III (Estado 3)	Campanha IV (Estado 1)
<b>Período adequado</b>	18/08 a 17/10	12/11 a 01/12	01/01 a 22/02	18/05 a 30/06
<b>Período de execução</b>	23/09 a 09/10/03	19/11 a 01/12/03	01/02 a 14/02/04	31/05 a 21/06/04
<b>Medidas</b>	<b>In Situ</b>			
Condutividade	208 pontos	202 pontos	221 pontos	256 pontos
Oxigênio Dissolvido				
Turbidez				
pH				
Profundidade Secchi				
Profundidade Total				
Temperatura da água				
Curva espectral				
<b>Análises</b>	<b>Laboratório</b>			
Clorofila	72 pontos	73 pontos	74 pontos	76 pontos
DOC				
DIC				
M. Total suspensão				
M. Inorg. Suspensão				
M. Org. suspensão				
Nitrogênio Total			29 pontos	32 pontos
Fósforo Total				
<b>Análise de íons</b>	<b>Ânions</b>			
Fluoreto (F <sup>-</sup> )				31 pontos
Cloreto (Cl <sup>-</sup> )				
Nitrato (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )				
Brometo (Br <sup>-</sup> )				
Nitrito (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )				
Fosfato (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )				
Sulfato (S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )				
<b>Batimetria da planície</b>	Toda área inundada			
Equipe e Equipamento	1 Barco grande, 2 lanchas, 2 pilotos Lancha e 1 de barco, 3 pesquisadores, 1 tecnico lab., cozinha	1 Barco grande, 2 lanchas, 2 pilotos Lancha e 1 de barco, 3 pesquisadores, 1 tecnico lab., cozinha	1 Barco grande, 2 lanchas, 2 pilotos Lancha e 1 de barco, 3 pesquisadores, 1 tecnico lab., cozinha	1 Barco grande, 2 lanchas, 2 pilotos Lancha e 1 de barco, 3 pesquisadores, 1 tecnico lab., cozinha

1. As medidas limnológicas in situ foram realizadas com o medidor de qualidade de água (*Water Checker Quality*) marca Horiba, modelo U10, em todos os pontos completos e incompletos. A TABELA 4 mostra os parâmetros medidos com o sensor Horiba, seu intervalo de sensibilidade, unidades de medida e resolução.



TABELA 4– Parâmetros medidos pelo sensor Horiba, modelo U10.

Parâmetros	Intervalo de sensibilidade	Resolução
pH	0-14	0.1pH
Condutividade	0-100mS	0,001/0,01
Turbidez	0-800 NTU	1NTU
Oxig. Dissol.	0-19,9 mg/L	0,01mg/l
Temperatura	0-50°C	0,1°C
Salinidade	0-4%	0,01%

2. As análises das variáveis: Clorofila a ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ), Sólidos Totais em Suspensão ( $\text{mg.l}^{-1}$ ), Material inorgânico em suspensão, Material orgânico em suspensão, nitrogênio e fósforo totais, e os ânions: fluoreto( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ), cloreto ( $\text{mg.l}^{-1}$ ), nitrato( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ), brometo( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ), nitrito( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ), fosfato( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ), sulfato( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) foram realizadas pelo Instituto Internacional de Ecologia em São Carlos.
3. As análises de Carbono Orgânico Dissolvido (DOC) e Carbono Inorgânico Dissolvido (DIC), em partes por milhão(ppm), foram realizadas pelo Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), em Piracicaba.
4. As medidas espectrais foram feitas inicialmente com o auxílio de espectro-radiômetro, modelo *FieldSpec® UV/VNIR*, da *Analytical Spectral Devices, Inc.* Este equipamento opera na faixa de 325 e 1075 nm (visível e infravermelho próximo), baseado numa matriz de 512 detectores, com uma resolução nominal de 1,6 nm na faixa espectral de 325 a 700 nm e 3 nm entre 700 e 1075 nm (ASD, 2000) e tempo de integração de 17  $\mu\text{s}$ . Após algumas análises dos primeiros dados, constatou-se que as medidas do espectro-radiômetro, modelo *FieldSpec® UV/VNIR*, não estavam coerentes com espectros medidos com outros instrumentos. Em função disto, este equipamento foi substituído pelo espectro-radiômetro modelo Spectron, equipamento similar ao primeiro. O Fator de Reflectância foi calculado medindo-se a radiância espectral de uma placa de referência Spectralon ® com reflectância constante de 99 % em todos os comprimentos de onda alternadamente às medidas de radiância da água. A radiância espectral da coluna de água em cada estação amostral foi obtida a partir da média de 4 integrações. A geometria de aquisição de dados adotada está ilustrada na FIGURA 6.

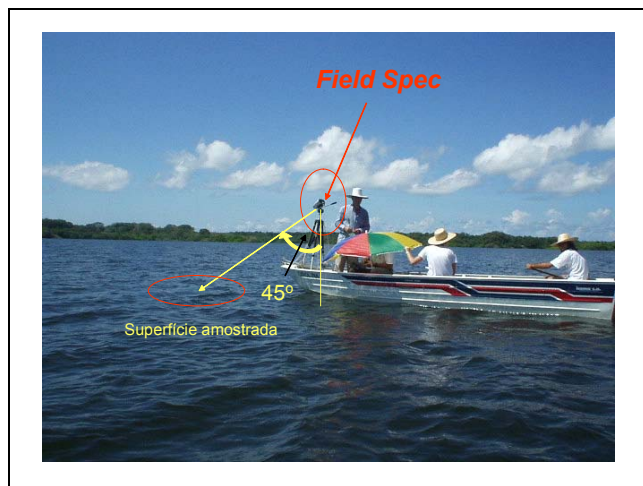


FIGURA 6 – Configuração da geometria de aquisição de dados espectro-radiométricos.

A FIGURA 7 mostra a configuração do sistema aquisição dos espectros, que foi montado em uma lancha (voadeira), que se deslocava até a estação amostral, orientada por um GPS de navegação. O espectro-radiômetro é conectado a um notebook, que controla o processo de aquisição e armazena os espectros adquiridos.

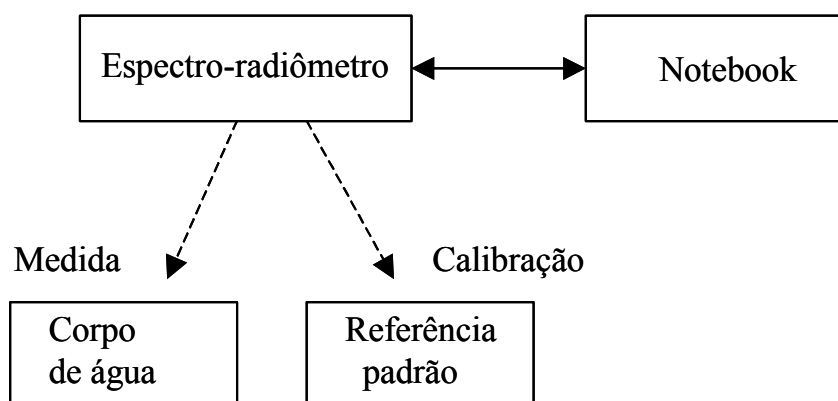


FIGURA 7 – Configuração do sistema de aquisição de dados espectro-radiométricos.

Exemplos de curvas de refletância na superfície da água (%) em função do comprimento de onda (nm) como as que foram registradas nos diferentes pontos de coleta são mostradas na FIGURA 8.

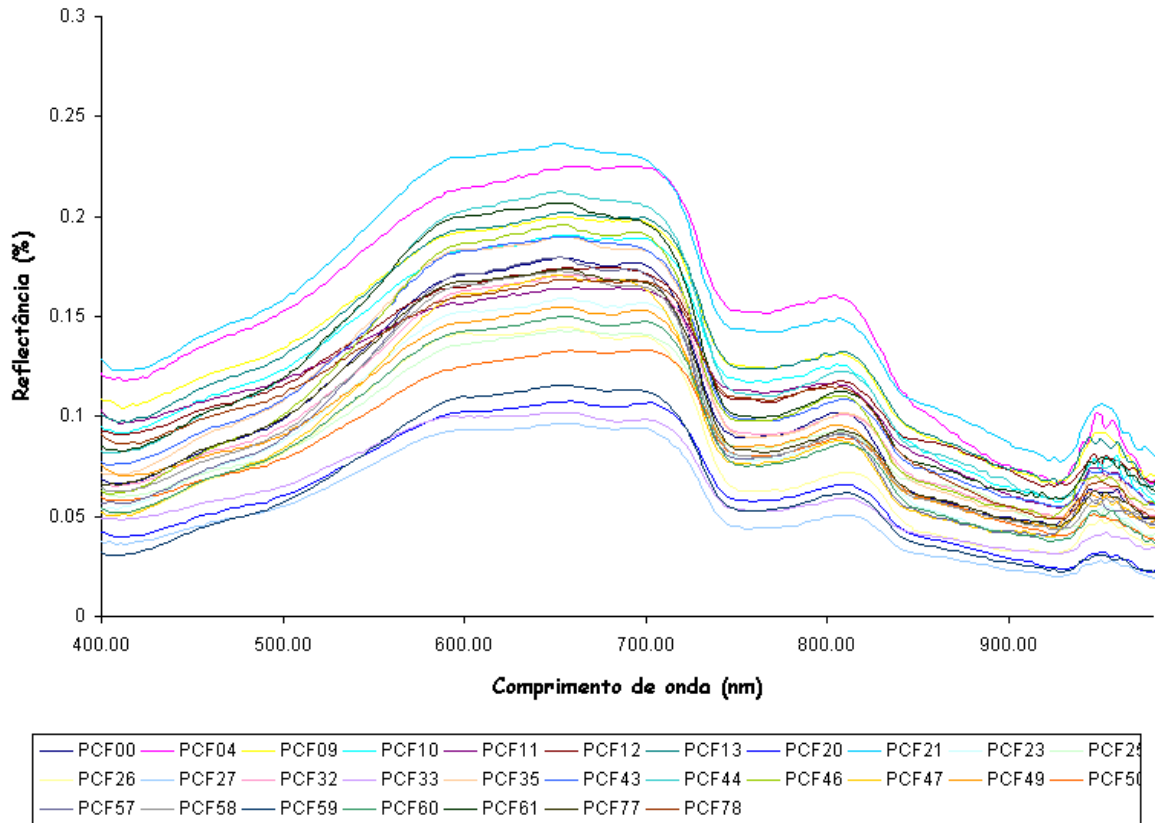


FIGURA 8 – Fator de Reflectância-Birecional em função do comprimento de onda das estações amostrais.

Um dos componentes considerados neste estudo é a dinâmica do volume de água na planície. Dado que se tem o valor diário de nível d'água, decidiu-se por realizar o levantamento batimétrico de toda a planície, durante a campanha IV (Estado 1).

A decisão de se realizar este levantamento durante o Estado 1 do sistema, deve-se ao fato de que nessas condições, seria possível cobrir praticamente toda a área do lago, além de ser o período em que se pode deslocar com maior facilidade pela planície. Um sonar Lowrance modelo LMS-480, que possui um GPS acoplado, foi utilizado neste levantamento. Este equipamento além da profundidade e posição geográfica registra também a velocidade de deslocamento e a temperatura da água.

Para que se tivesse uma amostragem de tal modo que as seções de levantamento batimétrico refletissem a complexidade do relevo, utilizou-se uma imagem do sensor TM do satélite Landsat (FIGURA 9), representativa do Estado 2, para planejamento das rotas. Na data de aquisição da imagem, 12 de dezembro de 2001, o nível d'água foi de 450 cm. Com base nessa imagem representativa de uma situação em que uma grande extensão da planície não se encontrava inundada, foi possível aumentar a densidade de

rotas em áreas de relevo complexo, com pequenos lagos e canais e reduzir a densidade em áreas de relevo mais homogêneo. Conforme mencionado anteriormente, apesar da alocação das rotas ter sido feita no Estado 2, realizou-se o mapeamento no Estado 1, quando a água cobre todo a planície, o que torna mais fácil a movimentação sobre a área.

Este planejamento resultou em um conjunto de rotas (seções transversais) as quais cobriram uma extensão de 4600km. Esse mapeamento batimétrico que foi executado num período de 19 dias. A FIGURA 10 mostras estas rotas.



FIGURA 9 – Composição RGB-TM 543, referente ao Estado 2 (12 de Dezembro 2001)

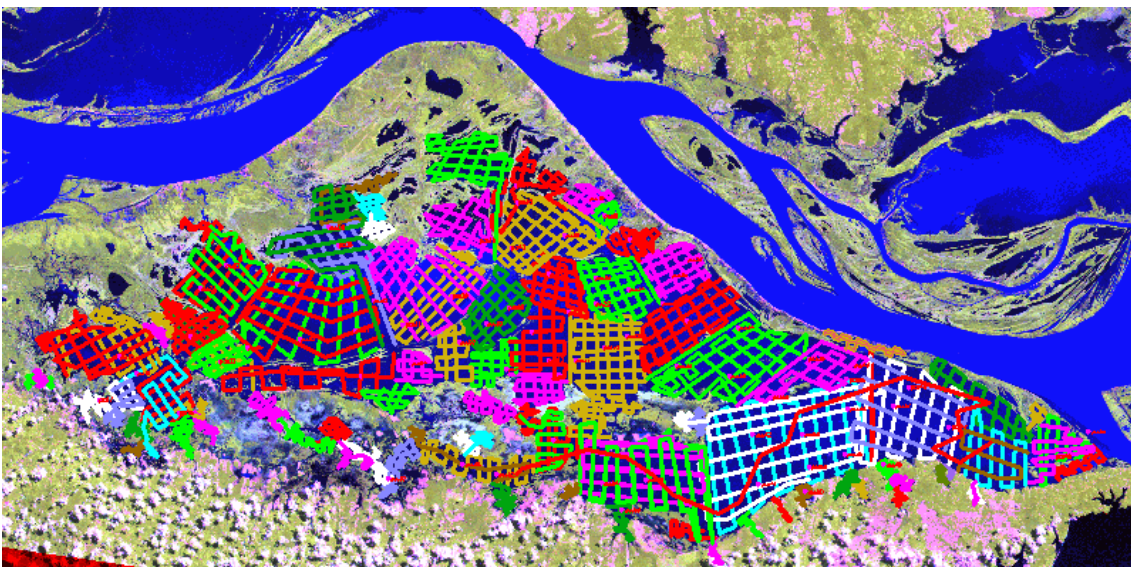


FIGURA 10 – Conjunto de rotas planejadas para levantamento batimétrico.

A FIGURA 11 mostra a hidrógrafa durante ciclo hidrológico em que foram realizadas as quatro campanhas. Esta Figura mostra também as taxas médias de oscilações diárias do nível d'água durante a realização de cada campanha. Na seção 1.2.1, em que se definiu os estados que seriam relevantes para o entendimento da dinâmica de água na planície de Curuai, adotou-se como condição para caracterização dos estados 1 e 2 do sistema rio/planície taxas de variação menores do que 0.05 cm/hora. Verifica-se na FIGURA 12 que esta condição foi satisfeita. Sendo de  $-0.046$  cm/h para o Estado 1 e de  $0.058$  cm/h para o Estado 2. O sinal negativo para o Estado 1, significa que mesmo pequeno a direção do fluxo estava da planície para o rio. No Estado 2, o valor positivo indica que a direção de fluxo era do rio para a planície. A condição de instabilidade, taxa maior que 0.15, foi plenamente satisfeita para o Estado 4 ( $-0.28$  cm/h), e parcialmente satisfeita para o Estado 3 ( $0.13$  cm/h).

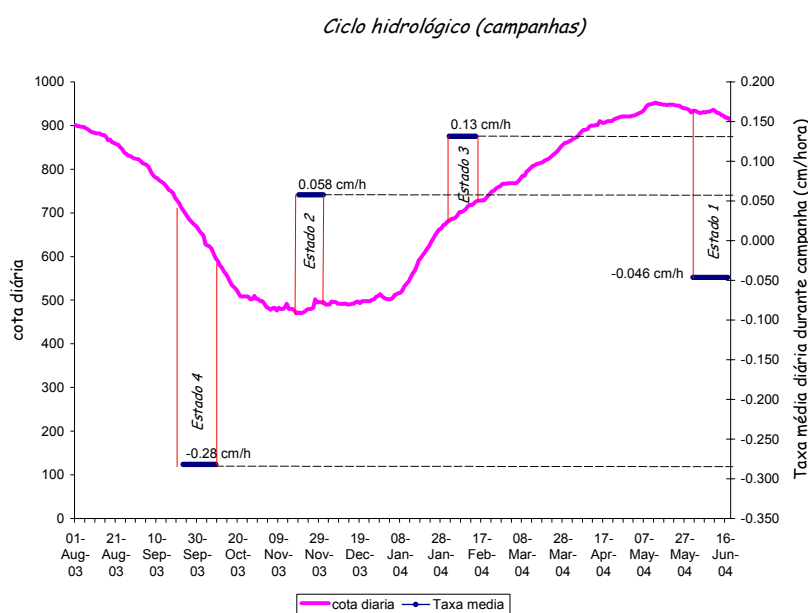


FIGURA 11 – Hidrógrafa do período de realização das campanhas e taxa média de variação do nível d'água durante cada campanha.

### 1.3.1 Infra-Estrutura Utilizada Durante as Campanhas

Devido às dimensões da área de estudo, 2000 Km<sup>2</sup>, às dificuldades de acesso, e à distância de centros urbanos, uma equipe de 10 pessoas em média permaneceu a bordo de um barco “base” durante as campanhas (FIGURA 12). Esta equipe incluiu pesquisadores, pilotos de lancha e barco e cozinheira. O acesso às estações de coleta foi feito utilizando duas lanchas, cada uma com uma equipe de 3 pessoas. A programação

de amostragem de cada dia foi feita de tal modo que uma dada região do lago pudesse ser coberta entre 9 horas da manhã e 15 horas da tarde (período adequado para radiometria).



FIGURA 12 – Barco “base” e lancha utilizados durante a campanha de campo.

A bordo do barco “base” foi montado um “mini-laboratório” (FIGURA 13-a) para filtração e preparo das amostras de água para posterior análises químicas, físicas e biológicas. Estas amostras e filtros (FIGURA 13-b) foram mantidos a temperatura de zero graus Celsius.



FIGURA 13 – Filtração e preparação de amostras para análise.

Conforme mencionado anteriormente, os equipamentos para medidas in situ foram instalados a bordo das lanchas. A FIGURA 14–a mostra o sistema de sonar utilizado durante a quarta campanha, e a FIGURA 14–b mostra os equipamentos para medidas radiométricas e de variáveis limnológicas utilizados durante as quatro campanhas.



FIGURA 14 – Equipamentos utilizados para medidas in situ.

## 1.4 Processamento dos Dados de Campo

A abordagem adotada para o estudo da dinâmica de circulação de água na planície de Curuai, prevê a análise integrada de diferentes tipos de: imagens de satélite, medidas limnológicas e de qualidade de água, medidas radiométricas e medidas batimétricas. Antes dessa análise integrada, entretanto, há a necessidade de que cada um desses dados sejam processados e analisados separadamente. Esta etapa inicial tem como objetivo descrever e sintetizar separadamente cada tipo de dado e avaliar sua consistência.

### 1.4.1 Parâmetro Limnológicos

Os dados de coletados foram transferidos de cadernetas de campo para planilhas eletrônicas (FIGURA 15) durante a própria campanha, mas devido ao volume de dados e as condições de campo, erros de digitação e trocas de nomes de pontos de coleta aconteceram. Estas planilhas foram posteriormente corrigidas e os dados organizados de forma a facilitar a conversão para formatos adequados às ferramentas de processamento (SIGs e pacotes estatísticos).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Amostra	Data	Hora	Lat	Long	Secchi	Temp	pH	CE	OD	Turb	M. S. Total (mg/l)	M. S. Inorgânico (mg/l)	M. S. Orgânico (mg/l)	Clorofila (µg/l)	DOC (ppm)	DIC (ppm)
PCN 01	22/11/03	11:17	s 02 06 18.8	o 55 27 28.4	0.07	30.90	7.1	34	5.4	999	578.370	508.880	69.490	42.758	5.692	8.233
PCN 02	22/11/03	10:42	s 02 06 33.3	o 55 26 18.3	0.07	30.20	7.0	34	5.2	995	562.280	486.730	75.550	35.055	5.107	7.910
PCN 03	22/11/03	11:53	s 02 06 16.7	o 55 24 52.1	0.06	31.10	7.0	34	5.4	999	796.650	704.560	92.090	37.511	5.793	7.997
PCN 04	22/11/03	12:41	s 02 05 58.7	o 55 23 39.1	0.06	31.50	6.8	35	4.9	999	910.740	806.520	104.220	38.739	7.765	6.475
PCN 05	22/11/03	13:02	s 02 07 08.1	o 55 24 25.1	0.06	31.70	7.0	34	5.0	999	766.920	672.690	94.230	39.186	5.085	8.592
PCN 06	22/11/03	09:15	s 02 08 15.0	o 55 24 27.0	0.07	30.00	7.0	35	4.8	973	584.470	506.530	77.940	31.929	6.600	5.904
PCN 07	22/11/03	13:34	s 02 08 01.1	o 55 23 03.4	0.06	31.90	6.9	36	5.1	999	642.650	565.040	77.610	32.711	5.211	7.307
PCN 08	22/11/03	13:51	s 02 09 04.2	o 55 23 23.2	0.06	32.00	6.9	36	4.7	855	506.960	452.800	54.160	27.575	5.288	7.907
PCN 09	23/11/03	13:27	s 02 10 47.8	o 55 37 57.2	0.07	32.10	7.0	33	5.1	778	475.160	425.740	49.420	47.559	5.367	7.554
PCN 10	23/11/03	12:46	s 02 10 24.5	o 55 36 27.2	0.07	32.00	7.2	42	4.5	741	461.400	404.250	57.150	40.749	5.932	9.011
PCN 11	23/11/03	11:57	s 02 09 03.8	o 55 34 14.0	0.07	31.90	7.0	33	4.4	607	333.530	282.720	50.810	32.152	5.808	6.219
PCN 12	23/11/03	11:23	s 02 08 11.2	o 55 32 59.2	0.07	31.20	7.0	38	4.3	737	483.540	409.800	73.740	37.958	8.776	9.598
PCN 13	23/11/03	10:20	s 02 07 20.5	o 55 32 10.4	0.07	30.30	6.7	33	4.6	913	611.650	519.070	92.580	36.953	6.186	6.154
PCN 14	23/11/03	14:57	s 02 09 49.4	o 55 32 00.0	0.07	32.60	6.8	28	4.7	626	343.650	293.570	50.080	23.444	6.299	5.320
PCN 15	01/12/03	12:53	s 02 09 56.6	o 55 30 21.6	0.06	32.60	7.0	37	4.7	732	446.170	377.700	68.470	26.752	5.791	7.717
PCN 16	01/12/03	13:38	s 02 09 54.8	o 55 28 48.3	0.06	32.40	6.8	44	4.2	580	327.770	282.970	44.800	18.086	8.794	9.176
PCN 17	01/12/03	14:17	s 02 09 26.4	o 55 27 24.9	0.06	32.40	7.0	37	4.8	708	421.430	358.330	63.100	32.794	6.097	9.228
PCN 18	30/11/03	13:52	s 02 08 46.2	o 55 26 23.5	0.06	32.60	6.8	38	4.1	606	359.470	301.940	57.530	33.622	6.376	7.595

FIGURA 15 – Exemplo de planilha com dados de campo.

Com o objetivo de ter uma visão mais realista do comportamento espacial e pesquisar possíveis ocorrências de padrões espaciais nos dados limnológicos, transformou-se cada conjunto de observações pontuais de cada variável coletada durante cada campanha, em uma grade regular de pontos. Esta transformação, também denominada de espacialização, é feita através de métodos de interpolação espacial.

Vários métodos de interpolação espacial a partir de observações pontuais, estão disponíveis nos sistemas de informações geográficas. Quando o volume de amostras é abundante, a maioria das técnicas de interpolação espacial apresenta resultados bastante satisfatórios. Mas quando as observações são esparsas, a escolha do método de interpolação e de seus parâmetros pode ser crítica para se produzir resultados confiáveis (Burrough, 1998).

Métodos tradicionais de interpolação espacial como triangulação, média local, inverso da distância e média móvel ponderada possuem limitações na representação da variabilidade espacial de dados esparsos (Burrough, 1998). Uma das causas destas limitações é que tais métodos não consideram questões como o domínio ou abrangência<sup>3</sup> espacial de uma amostra, ou a possibilidade desta abrangência ser anisotrópica. Nesses métodos, o peso (importância) de cada amostra é baseado somente na distância da amostra ao ponto que se queira estimar. Esses métodos não levam em conta a existência de anisotropia, ou seja, a possibilidade de que a correlação espacial

<sup>3</sup> Abrangência é ate que distância uma determinada amostra influi na inferência de valores para as posições vizinhas

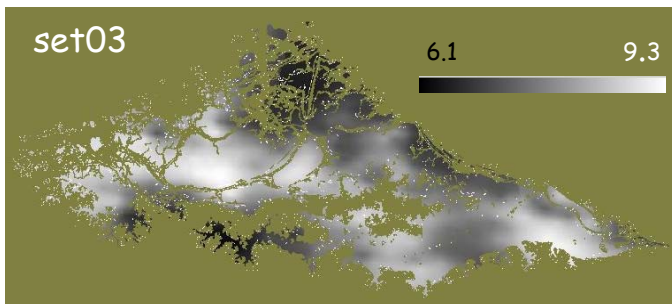


entre valores de uma dada variável seja diferente em direções distintas (Isaaks e Srivastava, 1989).

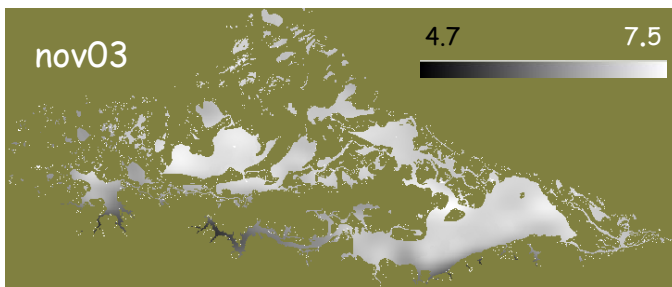
Procedimentos geoestatísticos que consideram a abrangência de uma amostra vêm sendo utilizados com sucesso principalmente na área de mineralogia. Esses procedimentos oferecem uma maneira de identificar, descrever e considerar a correlação espacial que pode estar presente entre muitos fenômenos naturais no processo de inferência dos valores das posições não amostradas. A krigeagem é um desses procedimentos.

A diferença entre a krigeagem e outros métodos de interpolação é a maneira pela qual são atribuídos pesos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a  $1/N$  ( $N$  = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigeagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que neste caso os pesos são determinados a partir de uma análise espacial exploratória, em que se modela a estrutura de variação espacial da variável em estudo. Esta modelagem denominada de análise estrutural ou modelagem do variograma pressupõe a existência de correlação espacial entre os valores da variável em estudo (Camargo,1997).

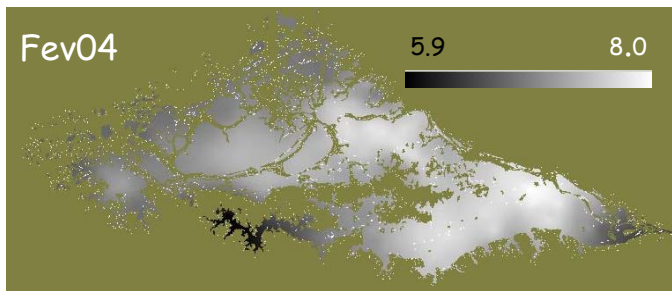
No relatório final do projeto, será feita uma descrição mais detalhada da aplicação do método de krigeagem. A FIGURA 16 exemplifica a aplicação de krigeagem sobre o parâmetro pH para as quatro campanhas.



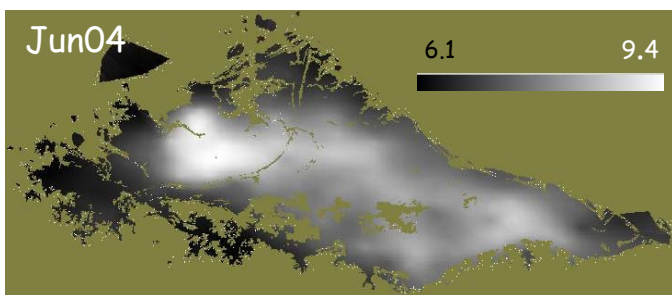
Média	7.72
Variância	0.55
Desvio Padrão	0.74
Coefficiente de Variação	0.10
Coefficiente de Assimetria	0.16
Coefficiente de Curtose	2.03
Valor Mínimo	6.10
Quartil Inferior	7.10
Mediana	7.60
Quartil Superior	8.40
Valor Máximo	9.30



Média	6.75
Variância	0.20
Desvio Padrão	0.45
Coefficiente de Variação	0.07
Coefficiente de Assimetria	-2.16
Coefficiente de Curtose	8.62
Valor Mínimo	4.70
Quartil Inferior	6.60
Mediana	6.90
Quartil Superior	7.00
Valor Máximo	7.50



Média	7.27
Variância	0.12
Desvio Padrão	0.34
Coefficiente de Variação	0.05
Coefficiente de Assimetria	-0.77
Coefficiente de Curtose	4.19
Valor Mínimo	5.90
Quartil Inferior	7.10
Mediana	7.30
Quartil Superior	7.50
Valor Máximo	8.00



Média	7.54
Variância	0.57
Desvio Padrão	0.75
Coefficiente de Variação	0.10
Coefficiente de Assimetria	0.30
Coefficiente de Curtose	2.36
Valor Mínimo	6.10
Quartil Inferior	6.93
Mediana	7.47
Quartil Superior	8.10
Valor Máximo	9.40

FIGURA 16 – Representação através de uma imagem em níveis de cinza da espacialização por krigeagem do pH das águas da planície. Níveis de cinza mais claro representam maior pH.

Como mencionado anteriormente, a modelagem estrutural por variografia, explora a possível correlação entre valores de uma mesma variável coletada em posições distintas. Ou seja procura descrever a possível correlação espacial entre os valores de uma mesma variável. Uma outra análise exploratória será feita sobre a possível correlação entre diferentes parâmetros limnológicos coletados durante uma mesma campanha, ou seja, será explorada a aplicação de modelos de regressão múltipla.

## 1.4.2 Radiometria de Campo

Por se tratar de uma medida in situ, as curvas espectrais foram obtidas para todos os pontos visitados, isto é, pontos completos e incompletos. Em média foram geradas 220 curvas durante cada campanha.

O processamento inicial das curvas espectrais teve como objetivo organizá-las, agrupá-las por similaridade de forma e confrontá-las com os componentes opticamente ativos presentes na água (TSS, Clorofila, DOC) e os parâmetros limnológicos turbidez e profundidade Secchi. Neste caso também os dados de cada campanha estão sendo processados separadamente.

A hipótese é que curvas similares em termos de forma, isto é, pertencentes a um mesmo grupo, provém de águas com características similares em termos de composição dos componentes opticamente ativos presentes.

O algoritmo Média K (Schowengerdt, 1997), desenvolvido para classificar dados, foi utilizado para agrupar as curvas. Este algoritmo trata cada curva espectral como um vetor, e para quantificar o grau de similaridade entre vetores, utiliza uma medida geométrica (equação 1.1) obtida a partir do arco-coseno do produto escalar dos vetores.

$$d = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{t} \cdot \vec{r}}{\|\vec{t}\| \|\vec{r}\|} \right)$$

(1.1)

As e 1.18 mostram os resultados destes agrupamentos para as curvas espectrais dos pontos completos para as campanhas relativas aos Estado 2 e 3 do sistema rio/planície. O número de classes considerado representativo para cada estado foi obtido empiricamente, aplicando o Média K para diferentes números de agrupamentos, e avaliando as classes resultantes tanto visualmente quanto confrontando com os parâmetros apresentados nas TABELA 5 e 6.

Nota-se que tanto para o Estado 2, , quanto para o Estado 3, FIGURA 18, as curvas de cada classe possuem formas bastante distintas. Para o Estado 2, a reflectância média de cada classe, representada pelas curvas médias, apresenta níveis bastante distintos. A classe 1, com baixa reflectância média (-curvas médias), é representativa das massas d'água com maior transparência, o que pode ser confirmados (TABELA 5) tanto pelo

Total de Sedimentos em Suspensão(TSS) médio de 22.64 mg/l, quanto pela turbidez média de 48.5 NTU, ambos os menores valores entre as três classes. A classe 3, com a maior reflectância média entre as três classes, é representativa das massas d'águas com menor transparência, também confirmado pelo maior TSS médio(567.62 mg/l). Para a classe 2 com curva de reflectância média entre a classe 1 e 3, é de se esperar que a densidade de sedimentos em suspensão esteja entre os valores da classe 1 e a classe 3. Isto se confirma com o valor de TSS em 127.95 mg/l.

Esta análise superficial, mesmo sem levar em conta a contribuição dos demais componentes opticamente ativos, já permite comprovar a eficiência do algoritmo Média K, utilizando a distância geométrica definida pela equação 1.1, como ferramenta para classificação de curvas espectrais neste estudo.

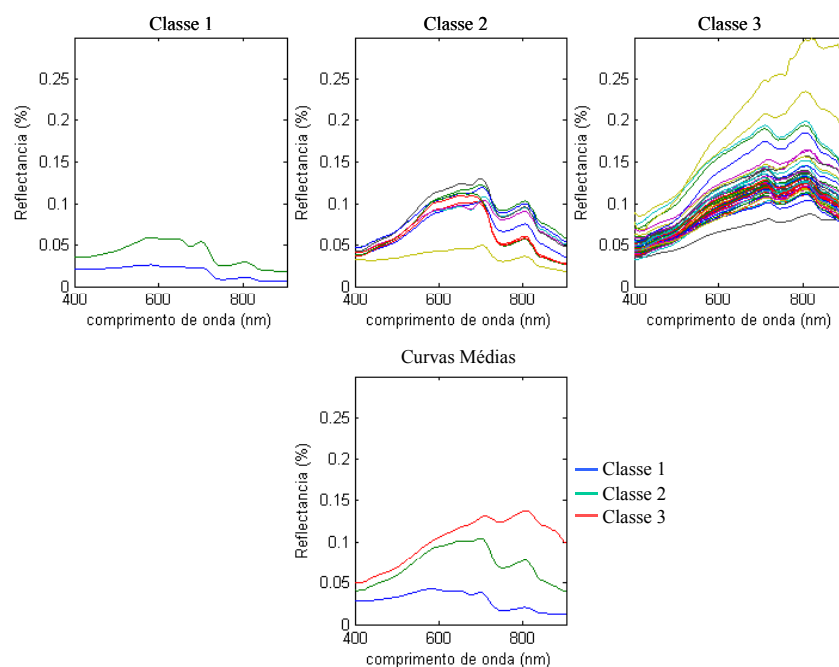


FIGURA 17 – Classes resultantes do agrupamento por Média K para dados do Estado 2.

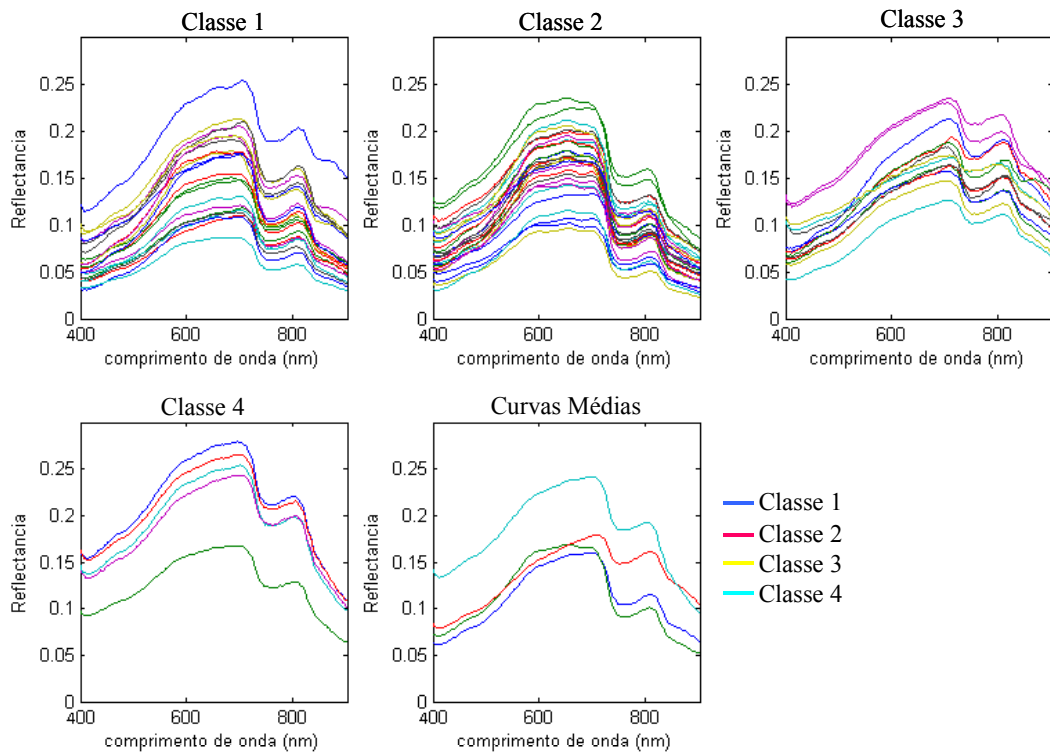


FIGURA 18 – Classes resultantes do agrupamento por Média K para dados do Estado 3.

TABELA 5 – Classe de curvas espectrais referentes ao estado 2 e síntese dos dados limnológicos.

		Turbidez (NTU)	Secchi (metros)	Prof. T. (metros)	TSS (mg/l)	TSI (mg/l)	TSO (mg/l)	Clorofila (µg/l)	COD	CID
<b>Classe 1</b>	Mínimo	39.00	0.40	0.40	12.74	9.00	3.74	0.80	1.04	1.13
	Máximo	58.00	0.35	0.90	32.54	24.08	8.46	14.87	2.73	1.43
	Média	<b>48.50</b>	0.38	0.65	<b>22.64</b>	16.54	6.10	7.83	1.88	1.28
<b>Classe 2</b>	Mínimo	120.00	0.09	0.60	53.94	40.97	5.00	1.62	3.33	0.76
	Máximo	436.00	0.20	1.40	222.88	200.78	34.31	86.28	9.76	15.22
	Média	<b>256.30</b>	0.13	1.06	<b>127.95</b>	109.60	18.35	28.67	4.89	9.73
<b>Classe 3</b>	Mínimo	508.00	0.06	0.60	252.52	207.58	27.84	18.09	4.38	0.74
	Máximo	999.00	0.08	1.20	876.46	773.16	103.30	49.57	11.38	13.31
	Média	<b>872.40</b>	0.07	0.90	<b>567.72</b>	495.19	72.53	31.12	6.21	6.91

TABELA 6 – Classe de curvas espectrais referentes ao estado 3 e síntese dos dados limnológicos.

		Turbidez	Secchi	Prof. T.	TSS (mg/l)	TSI (mg/l)	TSO (mg/l)	Clorofila (ug/l)	COD	CID
<b>Classe1</b>	Mínimo	246	0.03	1.8	92.8	77.8	15.0	4.1	4.3	3.1
	Máximo	569	0.1	3.1	359.4	308.6	50.8	25.8	11.3	14.5
	Media	<b>373.6</b>	0.1	2.6	<b>192.6</b>	164.5	28.0	8.6	6.8	11.4
<b>Classe2</b>	Mínimo	198.00	0.09	2.80	92.10	77.87	12.48	6.36	2.81	15.97
	Maximo	263.00	0.10	3.10	110.93	95.26	15.80	10.20	6.35	18.45
	Media	<b>228.20</b>	0.09	2.98	<b>100.40</b>	85.91	14.49	8.34	4.42	17.05
<b>Classe3</b>	Mínimo	165.00	0.08	1.70	63.24	50.06	10.38	1.01	4.32	8.26
	Máximo	425.00	0.12	4.20	188.73	172.73	22.65	17.79	7.60	20.85
	Media	<b>265.81</b>	0.10	2.89	<b>113.48</b>	98.27	15.21	7.69	5.70	16.97
<b>Classe4</b>	Mínimo	118.00	0.10	2.30	45.20	35.86	5.89	0.21	3.33	14.88
	Máximo	239.00	0.15	3.50	91.44	80.72	14.19	13.96	8.63	21.95
	Media	<b>173.69</b>	0.12	2.96	<b>62.79</b>	53.21	9.58	8.56	5.00	19.27

### 1.4.3 Dados Batimétricos

O resultado a ser obtido do processamento dos dados batimétricos é um modelo matemático, na forma de uma grade regular de pontos, do relevo da planície. Este modelo será utilizado posteriormente para em conjunto com a informação de cota diária estimar o volume d'água na planície.

A FIGURA 1 mostra um exemplo do dado bruto gerado pelo sonar e visualizado num software aplicativo que acompanha o equipamento.

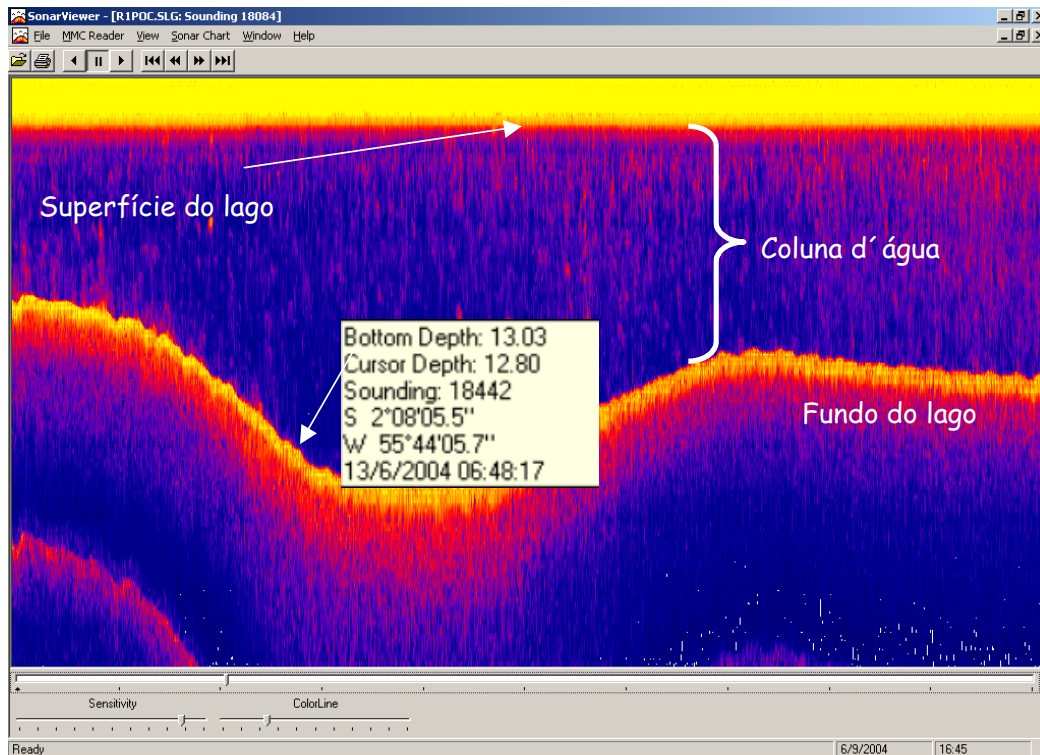


FIGURA 19 – Dado bruto gerado pelo sonar Lowrance modelo LMS-480.

O dado bruto gerado pelo sonar necessita de uma série de processamentos antes de se obter um modelo de relevo da área mapeada. Estes dados se encontram em fase de processamento. A FIGURA 20 ilustra alguns resultados intermediários obtidos durante o processamento preliminar destes dados.

A FIGURA 20-b mostra o resultado do primeiro processamento, no qual os dados de cada rota são convertidos do formato interno do sonar para o formato ASCII separado por vírgula. Esses dados estão sendo processados de tal forma a que somente as medidas de profundidade coincidentes com a posição do GPS sejam utilizadas para gerar o modelo de terreno, visto que o equipamento registra várias medidas de profundidade, entre duas medidas do GPS acoplado. Com esta redução, a distância média entre duas medida consecutivas de profundidade esta em torno de 9 metros.

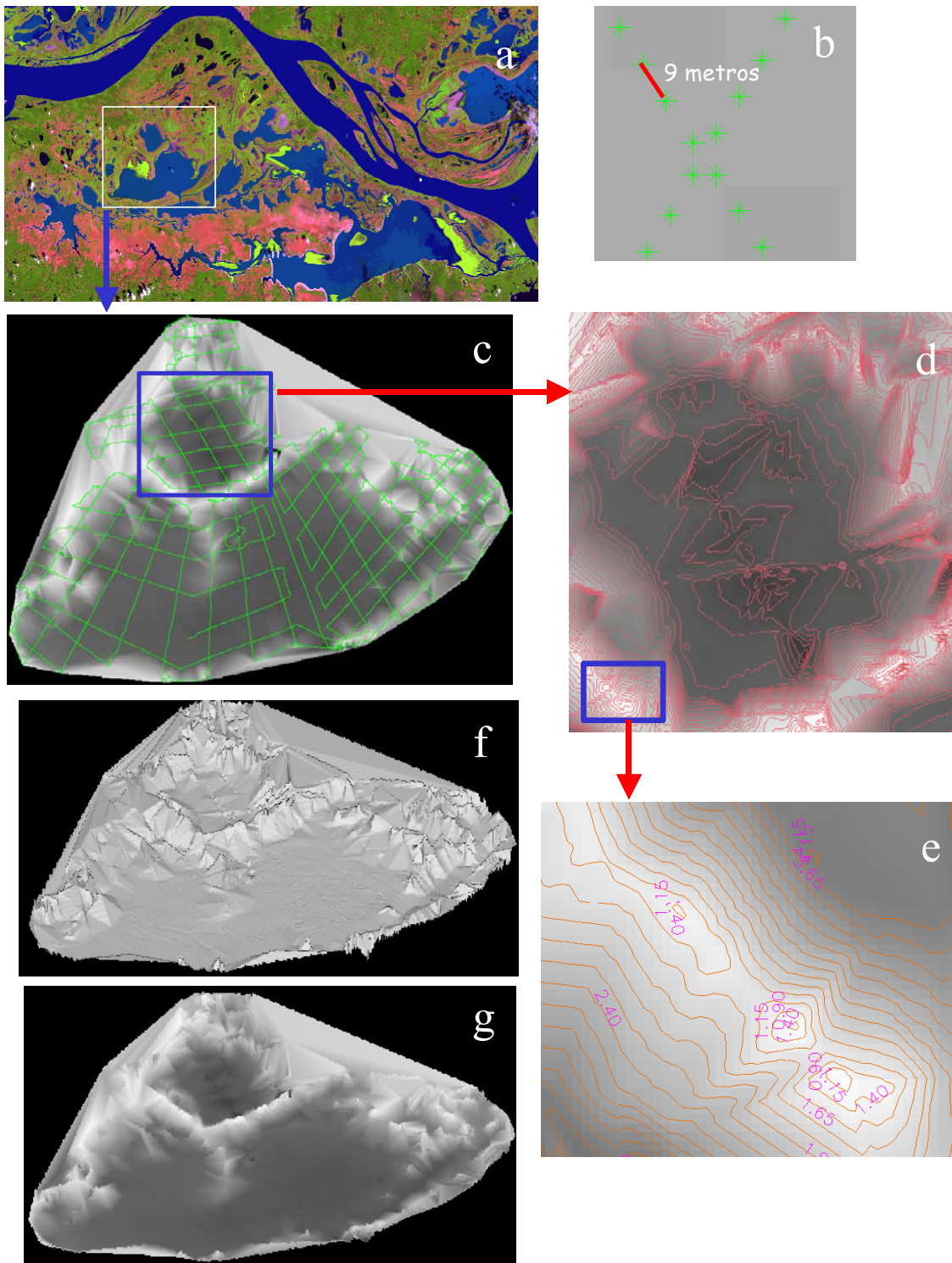
Esses dados serão então utilizados para se obter o modelo de relevo do fundo do lago aplicando krigeagem ordinária. Anteriormente à krigeagem, entretanto, é necessário validar os dados batimétricos. Para isso, foi gerado um modelo preliminar utilizando triangulação de Delaunay (Burrough, 1998) seguida de geração de grade regular. Neste processamento preliminar, eventuais dados discrepantes podem ser localizados e eliminados. A FIGURA 20-c mostra os dados reduzidos sobre uma imagem escalonada

em níveis de cinza, onde as regiões claras representam as áreas rasas e regiões escuras representam as áreas mais profundas.

A FIGURA 20-d mostra linhas de isovalores de profundidade (isóbatas) equidistantes de 25 cm. A FIGURA 20-e, mostra o detalhamento de uma pequena região. Vale ressaltar que gerado o modelo de relevo, pode-se gerar linhas de isovalores com qualquer espaçamento entre elas. O seção 1.6.2, descreve sucintamente uma metodologia para cálculo de volume de água em lagos a partir de isóbatas.

As FIGURA 20-f e g, são ilustrações de visualização tridimensionais geradas em um Sistema de Informação Geográfica a partir do modelo de relevo experimental gerado para a área selecionada para teste.





relativos a cada campanha terão tido sua consistência avaliada, estarão organizados e sintetizados da seguinte forma:

**Dados Limnológicos:**

- Uma grade regular com resolução de 150 metros para cada variável em para cada campanha de campo, geradas através da técnica de krigeagem ordinária;
- Uma descrição estatística de cada variável em cada campanha de campo;
- Uma planilha com todas as variáveis contendo valores e descrição das condições de coleta (data, hora, condições ambientais, etc.), para cada campanha de campo;
- Todos os dados integrados num banco de dados geográfico, gerenciado por um SIG.

**Dados Radiométricos:**

- Planilhas com curvas de pontos completos e planilhas com curvas de pontos incompletos, para cada campanha de campo;
- Planilhas com curvas separadas por classes resultantes do processamento por Média K, para cada campanha de campo;
- Planilhas com caracterização das classes a partir dos dados limnológicos.

**Dados Batimétricos:**

- Planilhas com rotas batimétricas reduzidas e corrigidas pelo nível d'água e pela velocidade de aquisição.
- Todas as rotas batimétricas integradas num banco de dados geográfico, gerenciado por um SIG.
- Grade regular com resolução de 150 metros para toda a área mapeada da planície gerada por krigeagem ordinária.

**Imagens de Satélite:**

- Um conjunto de 10 imagens TM/LANDSAT (de datas distintas, compreendidas entre junho 2003 a setembro de 2004) processadas e integradas num banco de dados geográfico, gerenciado por um SIG;

- Um conjunto de delimitação das massas homogêneas de água nas 10 imagens processadas. (o mapeamento das massas homogêneas, é igual ao descrito na seção 1.2.2)

## **1.5 Próximas Etapas de Processamento.**

O processamento em separado de cada tipo de dado não foi encerrado ainda. Descreve-se a seguir as próximas etapas deste processamento.

### **1.5.1 Dados Radiométricos**

Os resultados apresentados na seção 1.4.2 são relativos a classificação por Média K sobre curvas de pontos completos. Como para os pontos completos, têm-se medidas dos componentes opticamente ativos, foi possível caracterizar cada classe em termos, por exemplo, do TSS médio. Além disto, gerou-se uma curva média para cada classe. Na próxima etapa de processamento, as curvas médias serão usadas como curvas de referência para a aplicação do Média K sobre as curvas de pontos completos e incompletos, de cada campanha. O resultado deste processamento, além de classificar as curvas dos pontos incompletos, dá um indicativo, por exemplo, do valor médio e da faixa dentro da qual se encontra o TSS para os pontos incompletos. Ao final dessa etapa poder-se-á avaliar a eficiência dos métodos radiométricos para inferência de propriedades ópticas das águas.

Para a estimativa do conteúdo de clorofila-a (Chl-a) nos pontos incompletos, alguns modelos pré-estabelecidos serão avaliados, como por exemplo, o modelo que relaciona o conteúdo de clorofila-a com a razão do pico de reflectância em 702 nm e de absorção por Chl-a em 676 nm (Gitelson e Kondratyev, 1991).

Um segundo modelo que relaciona a relação linear entre a Chl-a e a diferença entre a reflectância na faixa (700-705 nm), que representa o espalhamento pelo fitoplâncton, e a faixa (675-680 nm) de absorção pela Chl-a, também será avaliado.

Análise derivativa em bandas conhecidas de absorção por clorofila e bandas de espalhamento por sedimentos em suspensão também serão explorado. Se as inferências de Chl-a e TSS pelos modelos avaliados foram estatisticamente de qualidade, os

resultados poderão ser usados para refinar a espacialização por krigagem destes variáveis.

### 1.5.2 Imagens de Satélite

Entre Junho 2003 e Setembro de 2004, período dentro do qual foram realizadas as quatro campanhas de campo, foram selecionadas 10 imagens LANDSAT/TM sem cobertura de nuvens. Sobre este conjunto de imagens será aplicado a seqüência de processamento descrita na seção 1.2.2. O resultado será a delimitação das massas homogêneas de água nas datas em que estas 10 imagens foram geradas. A FIGURA 21 apresenta o resultado deste processamento para uma das imagens. Cada classe delimitada em cada imagem será caracterizada estatisticamente, baseando-se nas bandas espectrais (bandas TM1,2,3,4) pelo seu nível digital médio, conforme ilustra

TABELA 7 e a FIGURA 22. Além do valor digital médio de cada banda, outros parâmetros estatísticos como variância e desvio padrão também poderão estimados para cada classe. O resultado deste processamento sobre todas as imagens será um conjunto de massas homogêneas ou classes de água delimitadas ao longo do tempo.

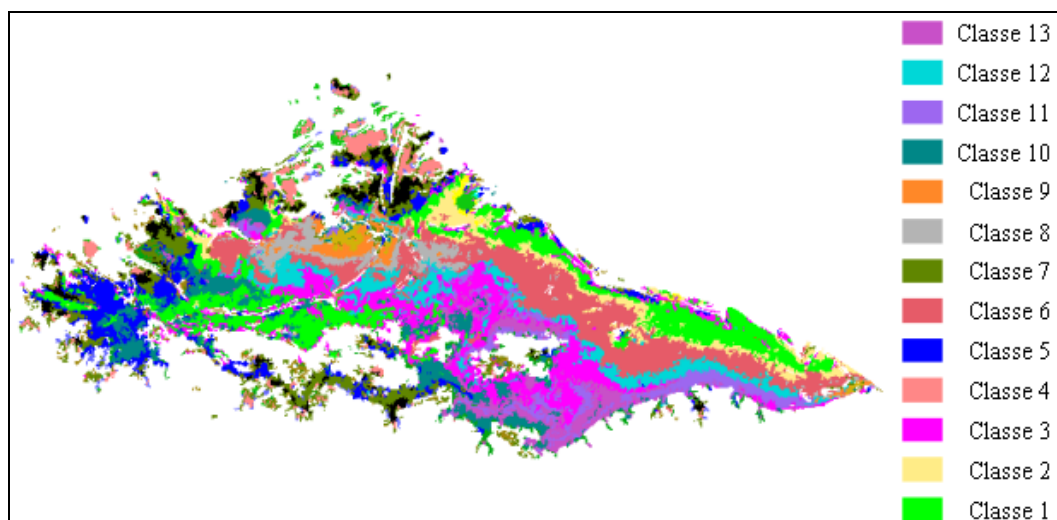


FIGURA 21 – Delimitação de massas de água a partir de suas respostas espectrais utilizando segmentação de imagens seguido de uma classificação não supervisionada.

TABELA 7 – Média do valor digital de cada classe em cada banda TM.

Classe	Media TM 1	Media TM 2	Media TM 3	Media TM 4
Classe_1	7,15	10,73	9,42	4,69
Classe_2	6,79	9,20	8,37	4,30
Classe_3	6,73	9,86	10,65	3,99
Classe_4	8,27	11,96	12,49	5,91
Classe_5	6,01	7,67	6,87	7,59
Classe_6	8,05	12,37	12,74	4,75
Classe_7	5,65	6,79	6,48	8,81
Classe_8	6,64	9,30	9,31	8,66
Classe_9	7,53	11,76	10,03	4,85
Classe_10	4,38	4,73	4,51	4,73
Classe_11	5,39	7,78	7,72	9,20
Classe_12	7,10	11,00	8,32	5,06
Classe_13	7,40	12,50	8,57	7,83

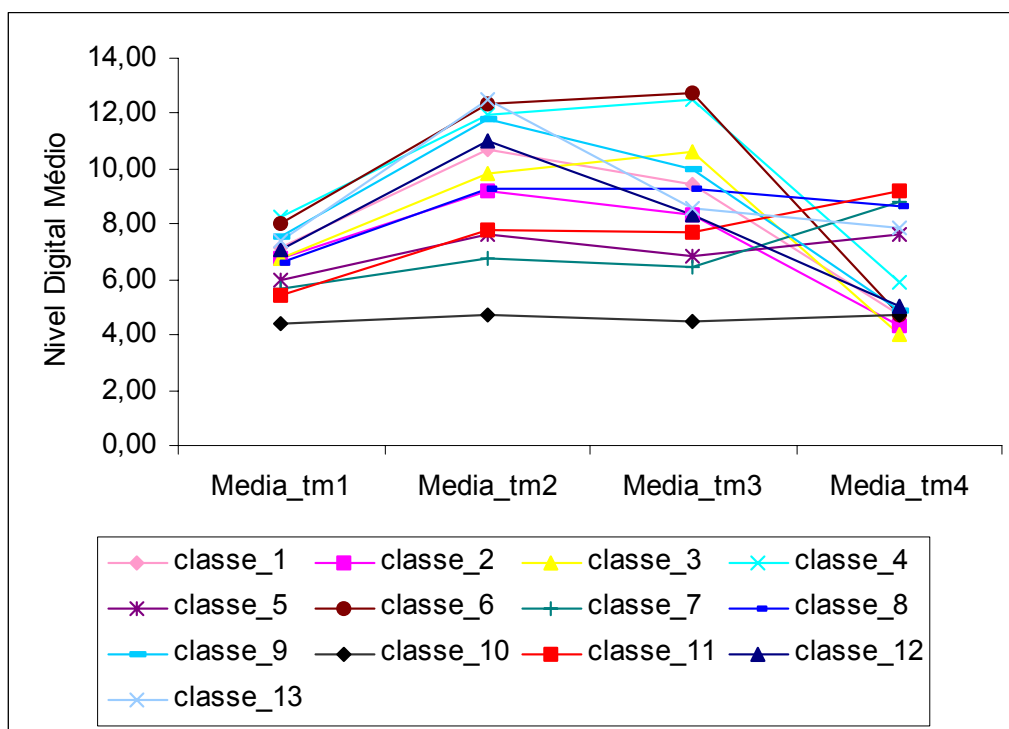


FIGURA 22 – Comportamento espectral dos tipos de água do Lago Curuai.

### **1.5.3 Dados Batimétricos**

Os dados batimétricos serão processados em três etapas. A primeira etapa, em fase de execução, segue a descrição feita na seção 1.4.3, e tem o objetivo de reduzir e validar os dados bruto gerado pelo sonar.

Na segunda etapa, todo o conjunto de dado reduzido (somente medidas de profundidade coincidente com posições de GPS), precisará ser submetido a dois tipos de correção, antes de se gerar a grade regular. A primeira tem o objetivo de corrigir o valor de profundidade devido a variações no nível d'água no dia da coleta. Esta correção se faz necessária, porque apesar de se ter procurado realizar as medidas no Estado 1, houve variação média na cota diária de  $-0,046$  cm/hora (FIGURA 11), durante os 18 dias de medidas. Este valor de  $-0.046$ , é a variação média durante os 18 dias. As medidas de cada dia de coleta serão corrigidas pela variação media do dia em que foram coletadas. Uma segunda correção esta associada com a variação de velocidade da lancha durante a coleta. Como o sensor do sonar estava na popa da lancha, notou-se que dependendo da velocidade da lancha, o sensor afundava mais ou menos na coluna d'água. Devido a este problema, fez-se uma calibração da posição do sensor em relação à superfície da água com a velocidade da lancha. Como o sistema sonar registrar a velocidade de deslocamento durante a aquisição, para cada medida tem-se registrado a velocidade instantânea no momento da medida.

A terceira etapa se resume em aplicar a seqüência metodológica por krigeagem, para se obter o modelo de relevo da planície.

## **1.6 Integração de Resultados**

### **1.6.1 Inferência Sobre a Dinâmica de Circulação da Água**

Nas seções 1.5.2 e 1.4.2 apresentou-se abordagens distintas, em função dos diferentes tipos de dados disponíveis, para a identificação e caracterização das massas homogêneas de água que circulam pela várzea de Curuaí, em diferentes níveis da hidrógrafa. Na abordagem descrita na seção 1.5.2, o resultado do processamento digital de uma imagem LANDSAT/TM é um conjunto de classes, tal que cada classe é caracterizada pelo seu nível digital médio em cada uma das bandas TM1,2,3,4. Este processamento será realizado nas 10 imagens de data distintas. Nota-se que o processamento digital

gera mais classes que o processamento das curvas espectrais (seção 1.4.2). Uma questão a ser investigada é o porque desta diferença entre as duas abordagens e como compatibilizar o número de classes de um processamento com o do outro.

A FIGURA 23 exemplifica uma análise integrada dos resultados extraídos das imagens, onde uma seqüência com as diferentes configurações espaciais de uma determinada massa homogênea de água “M”, delimitada e identificada em datas distintas de imagens LANDSAT/TM. Na data T1, esta massa de água M foi identificada e caracterizada pela estatística dos níveis digitais das bandas TM1,2,3,4. Na data T2 identifica-se, dentre as classes que foram delimitadas e caracterizadas pela estatística dos níveis digitais das bandas, a classe similar à massa de água M na data T1. A classe identificada será então a nova configuração espacial da massa de água M na data T2. Este processo de identificação se repete para as demais datas das imagens LANDSAT/TM disponíveis.

No entanto, se por um lado, devido às dimensões da área e a escala de trabalho deste estudo, pode-se considerar que as imagens LANDSAT/TM são dados de alta resolução espacial, por outro lado, para o objetivo do estudo, que é a modelagem da dinâmica de água, estas mesmas imagens são de baixa resolução temporal (devido ao seu período de revisita e a coberturas de nuvens). Já os dados do sensor MODIS-Terra que possui baixa resolução espacial (~250 metros), tem maior freqüência de revisita, portanto com maior probabilidade de se obter dados entre duas datas de imagens de LANDSAT/TM. Em função disto, pretende-se utilizar dados MODIS-Terra para fazer interpolações nos intervalos de tempo para os quais não se dispõe de imagens LANDSAT/TM.

Desta forma, as informações espaciais sobre as massas de água seriam derivadas das imagens LANDSAT/TM, e as mudanças sofridas por essas massas seriam acompanhadas pelas imagens MODIS. Para que se possam desenvolver chaves de correspondência entre massas d'água identificadas em dados MODIS e TM, imagens dos dois produtos serão obtidas simultaneamente, respectivamente. (tabela com resolução espacial e temporal do MODIS e TM).

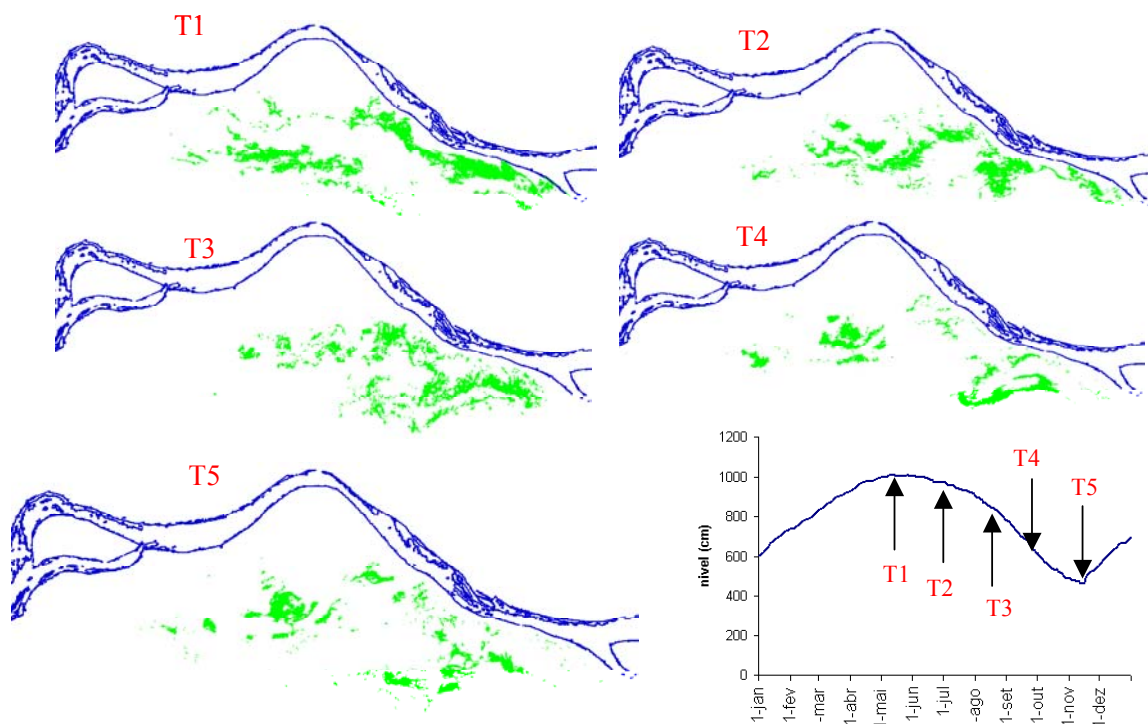


FIGURA 23 – Diferentes configurações espaciais de uma determinada massa de água ao longo do tempo.

Entretanto, para que a metodologia proposta na abordagem acima seja validada e os parâmetros relevantes sejam calibrados, torna-se fundamental que os resultados derivados de imagens de satélite sejam cotejados com resultados obtidos a partir do processamento dos dados campo.

Neste sentido, o estabelecimento das relações entre as propriedades espectrais (seção 1.4.2), que foram obtidas a partir de dados com resolução espectral compatível com as feições de absorção e espalhamento dos componentes opticamente ativos (Kirk, 1994) e livres de interferência atmosférica, e as propriedades limnológicas de amostras de água coletadas simultaneamente, permitirão validar e fazer a ligação entre as relações das propriedades espectrais medidas em imagens e as propriedades limnológicas das massas de água do lago Curuaí. Permitirão também avaliar as limitações impostas pelo uso de imagens obtidas por sensores de banda a bordo de satélites.

### 1.6.2 Inferência sobre a Dinâmica de Volume de Água na Planície

Tendo em mãos o modelo numérico do relevo da planície e o histórico de nível d'água diário durante um ciclo hidrológico completo, a inferência sobre a dinâmica do volume de água na planície resume-se no cálculo de volume para diferentes cotas. A



FIGURA 24 ilustra de forma conceitual a abordagem proposta por Kalff, 2001. Para estimar o volume de água de um lago.

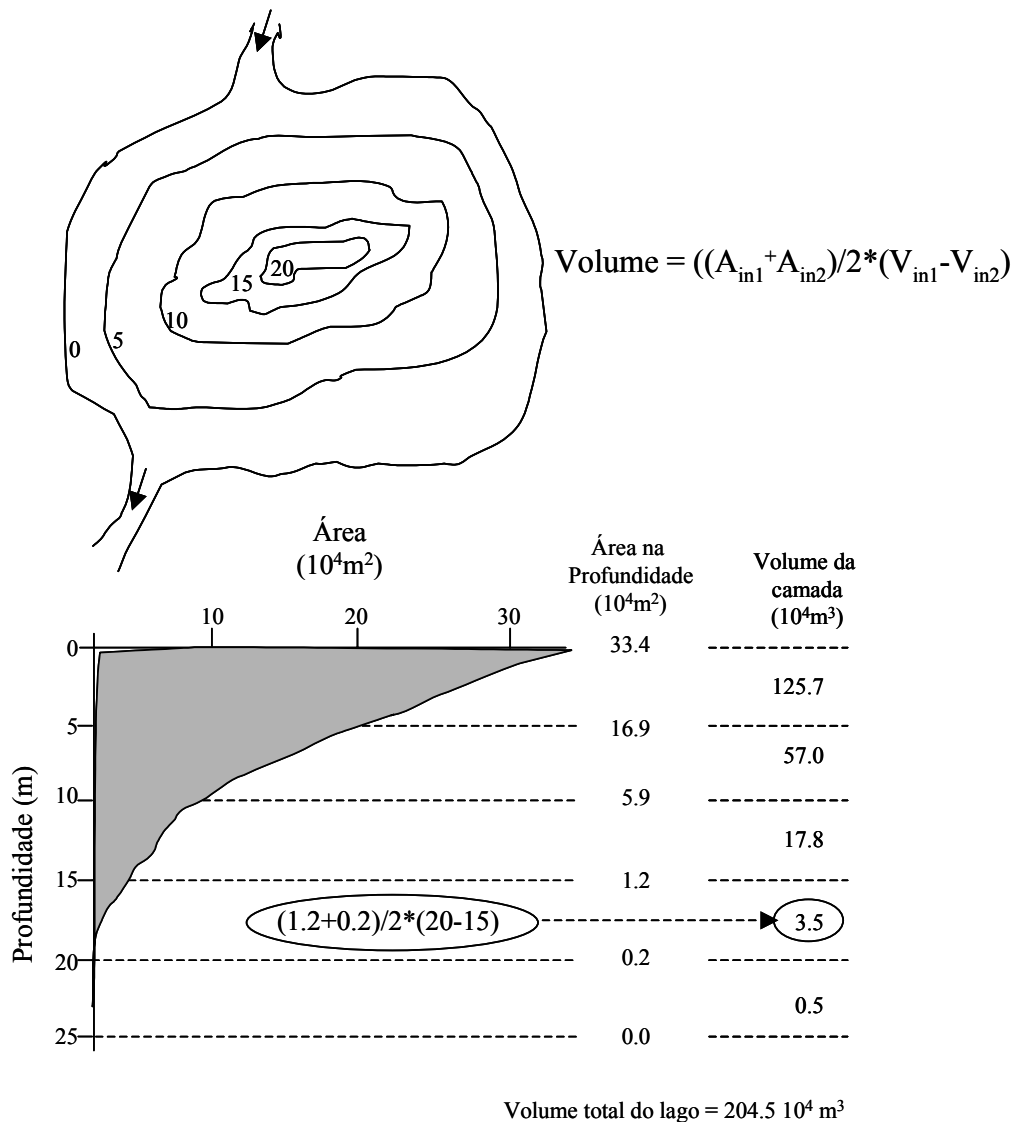


FIGURA 24 – Método para determinação do volume de um lago.

FONTE: Adaptada de Kalff (2001).

Conforme ilustrado na FIGURA 24, Kalff sugere que inicialmente se gere isóbatas com espaçamentos adequados para a escala da área de estudo e a seguir se aplique a equação abaixo para estimar o volume de água entre duas isóbatas consecutivas.

$$\text{Volume}_{(i_2, i_1)} = \left( \frac{(A_{i_1} + A_{i_2})}{2} \right) (V_{i_2} - V_{i_1})$$

onde:

$\text{Volume}_{(i_2, i_1)}$  - volume de água entre duas isóbatas consecutivas;

$A_{i1}$  - área compreendida pela isóbata  $i_1$ ;  
 $A_{i2}$  - área compreendida pela isóbata  $i_2$ ;  
 $V_{i1}$  - valor da isóbata  $i_1$ ;  
 $V_{i2}$  - valor da isóbata  $i_2$ ;

O volume do lago, conforme ilustrado na FIGURA 24 é um somatório de todos os volumes entre isóbatas.

Conforme descrito anteriormente e ilustrado na FIGURA 20d-e, a grade regular gerada a partir do processamento dos dados batimétricos permitirão que se gere isóbatas com diferentes espaçamento.

A abordagem proposta por Kalff parece adequada para lago com relevo simples, onde as isobatas são concêntricas, o que não é o caso da planície de Curuai. A planície de Curuai, além de possuir um relevo complexo, com vários lagos e uma série de canais entre esses lagos, possui também grandes dimensões, com uma área de aproximadamente 2000 km<sup>2</sup>. Em função disto, a abordagem descrita a seguir, a qual estima o volume do lago a partir de uma grade regular de células, parece mais adequada.

Em uma grade regular de células, a região geográfica de estudo é dividida em uma matriz de células, conforme ilustra a FIGURA 25-a, e a cada célula é atribuído o valor médio da variável em estudo dentro do espaço da célula. Na FIGURA 25-a, as linhas de isovalores ilustram um exemplo fictício de isóbatas de um lago, onde a área do lago foi particionada por uma matriz regular de células. Na FIGURA 25-b, a cada célula é atribuído o valor médio da profundidade na área da célula.

Sabendo a área de cada célula, a partir da resolução, pode-se estimar o volume de água em cada célula, multiplicando a área pelo valor da célula, que é igual à profundidade. Partindo do volume de cada célula, pode-se obter o volume total somando os volumes de toda as células. Uma questão a ser avaliada, é que resolução seria adequada para a planície de Curuai.

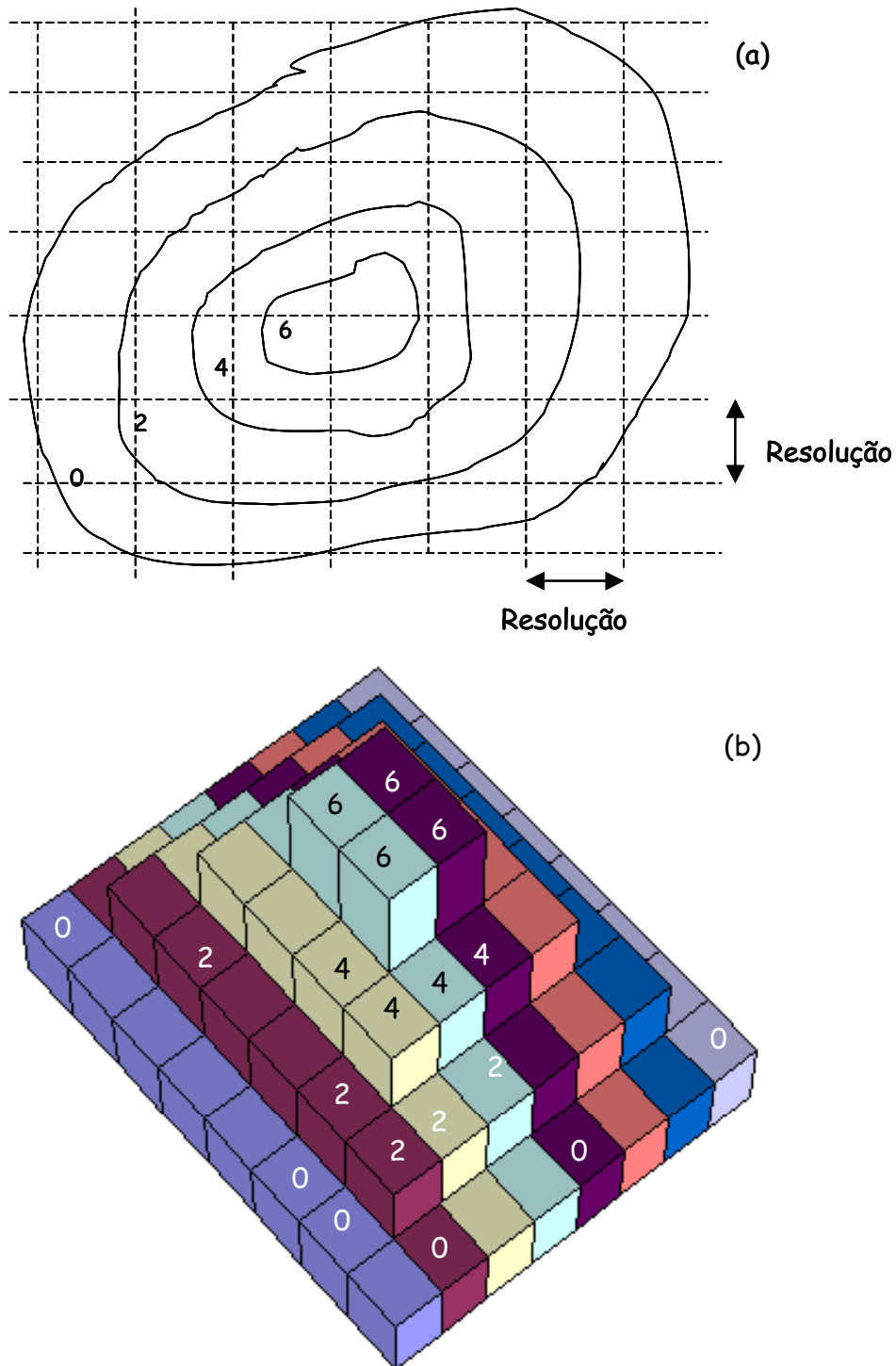


FIGURA 25 – Método para determinação do volume de um lago através de uma grade regular de células. (a) – Modelo digital do Lago particionado em células. (b) – Representação 3D das células de profundidade.

### 1.7 Conclusões

Apresentou-se neste relatório uma descrição do planejamento e execução das quatro campanhas de campos previstas e realizadas entre Setembro de 2003 e Junho de 2004.

Descreveu-se também o processamento executado até o momento sobre os diferentes tipos de dados coletados. Este processamento teve como objetivo avaliar a qualidade dos dados, definir a melhor forma de organizá-los e testar sobre todo o conjunto de dados as metodologias delineadas anteriormente para a extração de informação e integração dos dados.

As campanhas de campo foram realizadas com sucesso, tendo sido cumprido o objetivo previsto em cada campanha.

Os valores de medidas e análises foram consistentes, ou seja, não houve perda de medidas ou análises devido à deterioração das amostras.

As condições de estabilidade e instabilidade delineadas para os quatro estados do sistema rio/planície foram encontradas durante as realizações das campanhas, conforme mostrado no final da seção 1.3

A partir da espacialização dos dados limnológicos por krigeagem, pode-se confirmar que o número de 70 pontos completos foi satisfatório para aplicação da técnica.

O uso de métodos de segmentação e classificação por regiões das imagens de satélite se mostrou adequado à discriminação de classes espectralmente homogêneas.

O mapeamento de massas homogêneas de água a partir de dados de radiometria de campo e a partir de imagens de satélite resultou em números de classes diferentes. Uma questão a ser investigada é a causa desta diferença entre as duas abordagens e como compatibilizar o número de classes de um processamento com o do outro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, C.C.F.; Hess, L.L.; Melack, J.M.; Novo, E.M.L.M.; Mapping Amazon Basin Wetlands Through Region Growing Segmentation and Segmented-Based Classification JERS-1 Data. In: Latin-American Symposium on Remote Sensing, 9. ,Nov. 2000, Misiones, Argentina. **Proceedings...** Misiones: Universidad Nacional de Lujan, 2000.

Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L.M., Costa, M. Remote Sensing for Sampling Station selection in the study of water circulation from river system to and Amazon floodplain lakes: a methodological proposal. In: Conferência Científica Internacional do Experimento LBA, 2., 2002, Manaus(AM). **Proceedings...** Manaus: LBA, 2002.

Bins, L.S.; Fonseca, L.M.G.; Erthal, G.J.; Mitsuo II, F. Satellite Imagery Segmentation: Aregion Growing Approach, In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., 1996, Salvador-Brazil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996.

Burrough, P. A.; McDonnell, R.A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998.

Camargo, E. C. G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geostatísticos (krigeagem) no sistema de processamento de informações georeferenciadas (SPRING)**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – , São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.

Gitelson, A. A.; Kondratyev, K. Y. ; Optical of mesotrophic and eutrophic water bodies. **Int. J. Remote Sens.** v. 12, p.:373–385, 1991.

Isaaks, E. H.; Srivastava R. M. **An Introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560p.

Kalff, J. **Limnology: inland water ecosystems**. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 592p.

Kirk, J. T. O. **Light & photosynthesis in aquatic ecosystems**. London: Cambridge University Press, 1983.

Richards, J. A. **Remote sensing digital image analysis**. an introduction. New York: Springer-Verlag, 1995.

Schowengerdt, R. A. **Remote sensing, models and methods for image processing**. 2 ed . Academic Press, 522 p., 1997.

Vermote, E.F.; Tanré, D.; Deuze, J.L.; Herman, M.; Morcrette, J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n.3, p. 675-636686, 1997.