

METODOLOGIA DE ANÁLISE DA DINÂMICA DE ÁREA E VOLUME INUNDÁVEL: O EXEMPLO DA VÁRZEA DO LAGO GRANDE DE CURUAI

A methodology for Analysis of Volume and Flooded Area Dynamics: Lago Grande de Curuai Várzea as an Example

Cláudio Clemente Faria Barbosa¹
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo²
John M. Melack³
Ramon Moraes de Freitas²
Waterloo Pereira Filho⁴

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Processamento de Imagens – DPI
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
claudio@dpi.inpe.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
evlyn@ltd.inpe.br
ramon@ltd.inpe.br

³Bren School of Environmental Science and Management
University of California, Santa Barbara, CA 93106, USA
melack@lifesci.ucsb.edu

⁴Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Departamento de Geociências
Prédio 17 – 97111-970 – Santa Maria – RS, Brasil
waterloo@base.ufsm.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia para processamento e utilização de dados batimétricos de alta resolução, coletados com o ecobatímetro – Lowrance- modelo 480M, em áreas inundáveis da planície do rio Amazonas. Imagens TM/Landsat foram utilizadas como suporte ao planejamento e execução do levantamento batimétrico. Um conjunto de 4600 km lineares de transectos gerados durante o levantamento, foi submetido a uma seqüência semi-automática de processamento, e o resultado integrado a uma base de dados georreferenciada. Um modelo de elevação digital com resolução horizontal de 15 metros e resolução vertical de 1 centímetro foi gerado para a planície. A dinâmica de área inundada e de volume de água armazenado na planície foi avaliada a partir destes dados. Modelos de regressão para estimativa de área inundada e de volume armazenado na planície, a partir no nível de água, foram construídos. Os resultados deste trabalho mostraram que a informação de nível de água e área inundada mapeada a partir de imagens são um bom “proxy” para a estimativa do volume de água armazenado na planície do Lago Grande de Curuai.

Palavras chaves: Dinâmica de Área Inundada, Levantamento Batimétrico, Planície de Inundação Amazônica, Volume de Lagos.

ABSTRACT

This paper presents a methodology for processing and applying high resolution bathymetric data acquired with a Lowrance-480M ecosounder in the Amazon floodplain supported by Landast/TM images for planning and executing the survey. 4600 km of transects were processed semi-automatically and integrated into a georeferenced database. A

digital elevation model with 15 m horizontal resolution and 1 cm vertical resolution was generated for the floodplain. The changes in inundated area and volume of water on the floodplain were estimated. Regression models to predict flood area and water stored volume from water level were constructed. The results of this research show that water level and flooded area mapped from images are good enough for estimating water stored volume in the Lago Grande de Curuai.

Keywords: Flooded Area Dynamic, Bathymetry Survey, Amazon Floodplain, Lake Volume.

1. INTRODUÇÃO

Existem pelo menos dois componentes relevantes para a compreensão e a quantificação da circulação da água entre rios e suas planícies inundáveis: o volume de água que circula e é armazenado anualmente nestas planícies, e a área ocupada por elas.

Muitos dos modelos aplicados na escala de bacias, para estudo das trocas de água entre rio e planície baseiam-se, geralmente, no registro da variação do nível da água ao longo do tempo em alguns pontos esparsos. Nesse caso, o cálculo do volume de água que entra na planície se baseia em pressupostos de uma topografia uniforme. Esse pressuposto pode ser aceito em algumas circunstâncias, mas via de regra a topografia da planície de inundação é complexa. Vale ressaltar também que esta topografia é uma componente fundamental para a circulação da água, sendo ao mesmo tempo fator condicionado por e condicionante dessa dinâmica.

RICHEY et al. (1989) utilizaram somente os registros de nível de água ao longo de rios principais da bacia Amazônica e consideraram que o nível de água ao longo da planície era similar ao dos rios, estimando que a troca de água entre o rio Amazonas e sua planície inundável, era da ordem de 25 % de sua descarga anual no oceano. Em outro estudo, COE (1998,2000) estimou a partir de um modelo dinâmico para a simulação do fluxo de água entre rios e suas planícies, uma redução de 50 % na descarga do rio Nilo no Sudão, ao computar o armazenamento da água na planície inundável.

Em grandes bacias hidrológicas, como a amazônica, a dinâmica de água controla não só os processos biogeoquímicos e os fluxos de sedimentos, mas também parâmetros relevantes de modelos hidrológicos em escala continental. Em função destas características e das altas porcentagens de troca planície/rio encontradas por RICHEY et al. (1989) e COE (1998,2000), imprecisões associadas ao uso de modelos simplificados para topografia do fundo da planície, pode levar a erros significativos nos modelos hidrológicos, de sedimentos e biogeoquímicos, que fazem uso desta informação.

Neste sentido, o desenvolvimento de uma metodologia para levantamentos batimétricos de alta resolução em áreas inundáveis, permitirá: 1) a estimativa mais fiel da área inundada e do volume de água que passa pela planície; 2) a geração de parâmetros essenciais para uma descrição mais fiel de sua dinâmica; 3) uma avaliação quantitativa do erro inerente aos cálculos baseados em simplificações. Como

consequência, os modelos que fazem uso destas informações tornar-se-ão mais acurados, ou pelo menos terão uma estimativa de acurácia.

Para que um modelo de relevo da planície seja representativo é essencial que o levantamento batimétrico recubra a maior área possível, ao mesmo tempo em que seja passível de realização rápida, uma vez que esses ambientes se caracterizam por variações quase diárias do nível da água.

Na aplicação desta metodologia, o uso de série histórica de imagens de satélite foi essencial para o planejamento da posição e espaçamento dos transectos de modo que o seu número fosse representativo sem ser excessivo sob o ponto de vista do custo de aquisição e processamento.

O objetivo deste artigo é, portanto, apresentar a metodologia utilizada para a aquisição e processamento de dados batimétricos em um setor da planície do rio Amazonas conhecida como Planície do Lago Grande de Curuai.

2. ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS

A área piloto selecionada para o desenvolvimento e validação da metodologia proposta neste estudo, denominada de planície do Lago Grande de Curuai (LGC), está localizada ao Sul da cidade de Óbidos no Estado do Pará (Figura 1), a 900 km da foz do Rio Amazonas (1,5° S, 55.43° W). Possui aproximadamente 2000 Km² e está sujeita a uma flutuação de até 7 metros no nível da água. É formada por mais de 20 lagos, que são interligados por canais de comunicação que se mantêm durante todo o ciclo hidrológico. O maior dos lagos, denominado Lago Grande de Curuai, possui um comprimento de aproximadamente 50 km.



Fig. 1 - Área de Estudo: Planície do Lago Grande de Curuai. (Fonte: Barbosa, 2005).

A planície de Curuai é recoberta pela cena TM/Landsat 228/61. O cotejo da série histórica de imagens disponível entre 1984 e 2003 e dos dados de variação do nível da água entre 1983 e 2003 referente a

essa cena indicou a disponibilidade de duas datas adequadas ao estudo: 12/12/2001 e 16/07/1999 (BARBOSA et al, 2004). A imagem de Dezembro de 2001 refere-se a melhor cena sem cobertura de nuvens sobre a planície para o período de cota mínima. Nesse nível de cota da hidrógrafa, a topografia da planície fica bastante evidente, uma vez que o fundo do lago encontra-se praticamente exposto, permitindo alocar um menor número de seções transversais nas regiões mais homogêneas e intensificar a amostragem nas regiões heterogêneas, onde o número de seções deve ser adensado para garantir uma boa representatividade do modelo topográfico da planície. Essa imagem de 2001 foi então utilizada para definir a densidade dos transectos batimétricos.

A imagem do período de cota máxima, Julho de 1999, foi utilizada para se definir a extensão dos transectos, permitindo com isto um maior recobrimento da área mostrada.

Este planejamento resultou em um conjunto de rotas (seções transversais) as quais cobriram uma extensão de 4600 km. A campanha de campo para a aquisição dos dados batimétricos foi realizada entre 31 de maio e 21 de junho de 2004, período de cheia. Durante o período de coleta a cota variou entre 936 e 918 cm (Figura 2). O registro desta variação no nível d'água foi essencial para a correção posterior dos dados brutos. O sensor do ecobatimetro – Lowrance modelo 480m foi fixado na popa de uma lancha. (LOWRANCE - Pub. 988-0151-181).

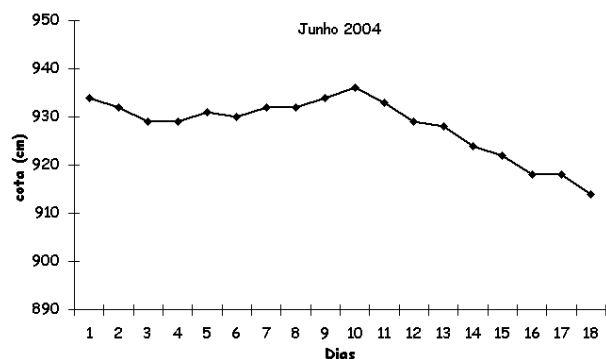
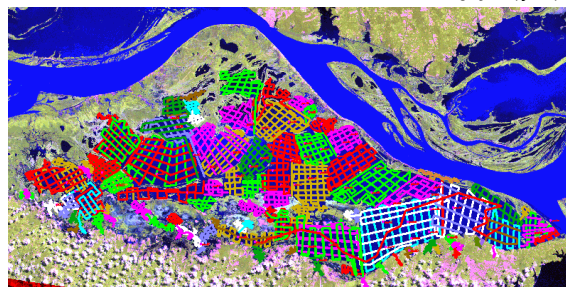


Fig. 2 - Cotas médias diárias durante campanha de Junho 2004 (Fonte: BARBOSA, 2005).

3. DADOS E PARÂMETROS DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

O levantamento batimétrico seguiu o roteiro de transectos programado e apresentado na Figura 3. O equipamento utilizado registrava além da profundidade, a posição geográfica, a velocidade de deslocamento do barco e a temperatura da água. A cota média diária na planície foi estimada a partir de duas leituras da régua centimétrica, uma no início da manhã e outra no final da tarde.

O 55° 01' 15"
S 01° 49' 14"



O 55° 50' 05"
S 02° 20' 20"

Fig. 3 – Conjunto de rotas planejadas para levantamento batimétrico.

A profundidade do detector do eco-batimetro, localizado na popa da lancha, varia de posição na coluna d'água em função da velocidade da lancha. A Figura 4 ilustra este comportamento da popa da lancha em função da velocidade. Esta variação na posição do sensor em relação à superfície do lago foi modelada, conforme apresentado na seção 4.1, para posterior correção dos dados

Considerando-se a lancha parada como referência para a posição do sensor na coluna d'água, verifica-se que ao atingir a velocidade de 14 km/h, o sensor se aprofunda 10 cm na coluna d'água. Ao atingir velocidade de 30 km/h, o sensor assume a profundidade de 5 cm acima da posição de referência (lancha parada).

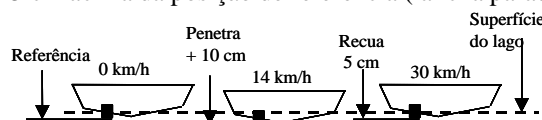


Fig.4 – Penetração do detector com a variação da velocidade da lancha.

4. PROCESSAMENTO DOS DADOS BATIMÉTRICOS

Os dados brutos gerados pelo sonar foram submetidos a uma série de processamentos antes que pudessem ser utilizados para a geração do modelo topográfico. A Figura 5 sintetiza esta seqüência.

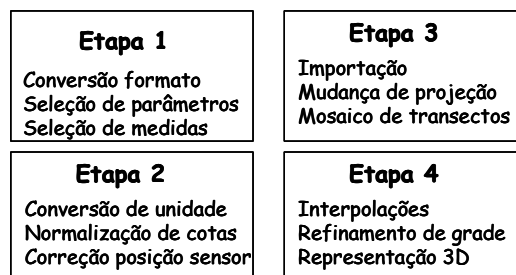


Fig.5 – Etapas de processamento dos dados gerados pelo eco-batimetro.

A primeira etapa consistiu da conversão de formato e seleção dos parâmetros de interesse tais como

profundidade, posição geográfica, e a velocidade de deslocamento do barco. Os dados brutos foram convertidos do formato proprietário do sistema sonar para o formato texto, o qual é normalmente lido pela maioria das ferramentas computacionais. Os demais parâmetros gerados pelo sonar e não aplicáveis a este estudo foram descartados. Como a frequência de medidas de profundidade registradas pelo sonar é maior do que a frequência de posições registradas pelo GPS, o dado resultante contém medidas intermediárias de profundidade entre duas posições geográficas consecutivas. Um dos parâmetros considerados na definição da resolução do modelo de elevação do terreno foi o tamanho dos arquivos. Por exemplo, um modelo de elevação digital em formato de grade regular para a área de estudo resultou, com resolução de 5m, em um arquivo de 500 MBytes. Em função disto, as medidas intermediárias de profundidade, entre duas posições registradas pelo GPS, mencionadas acima, foram descartadas. Com este descarte a distância média entre duas medidas consecutivas de profundidade ficou em torno de 9 metros.

A segunda etapa focalizou as correções decorrentes das variações de cota durante o período do levantamento e da oscilação da posição do sensor, na coluna d'água, durante o processo de aquisição. Como estas correções deveriam ser aplicáveis em todos os pontos de medida, automatizou-se este processamento através de rotinas escritas em Matlab (BARBOSA, 2005).

Para a correção devida à variação do nível d'água considerou-se a cota máxima (936 cm) ocorrida durante o levantamento, como referência para profundidade, ou seja, todas as medidas foram ajustadas adicionando ao valor de profundidade, a diferença entre a cota do dia em que foi realizada a medida e a cota de referência.

A terceira etapa consistiu da importação dos dados referentes aos transectos para a base de dados georreferenciada do projeto, construída no sistema SPRING (CAMARA *et al.*, 1996), em projeção UTM. Esta etapa foi realizada em dois passos: Inicialmente, importaram-se os transectos para a base de dados, e a seguir, como o sistema sonar fornece os dados na projeção Mercator, converteram-se estes transectos da projeção Mercator para UTM.

A quarta etapa consistiu do processo de interpolação das amostras e refinamento da grade regular de pontos 3D. Inicialmente gerou-se um modelo de superfície por triangulação de Delaunay (BURROUGH, 1998) para a planície, e a partir deste modelo, construiu-se um modelo de grade regular de pontos com resolução de 30 metros. O uso da triangulação de Delaunay gera algumas formas triangulares na superfície do relevo as quais foram suavizadas aplicando uma interpolação bicúbica na grade regular de 30 metros, que gerou como resultado, uma nova grade com resolução de 15 metros (FELGUEIRAS, 1996). Finalmente, para adequar ao software de cálculo de volume e de visualização em 3D,

definiu-se o ponto mais profundo da planície como sendo a referência de valor zero. Desta forma todos os demais pontos passaram a ter valores positivos.

4.1 Correção de Posição do Sensor

Para a correção do efeito da mudança na posição do sensor na coluna d'água, localizou-se uma região de aproximadamente 2 km de extensão de fundo plano onde se realizaram vários transectos em diferentes velocidades, com o objetivo de modelar a relação entre velocidade da lancha e profundidade do sensor. Estes transectos foram gerados em duplicatas, ou seja, para cada velocidade realizou-se dois transectos. Os valores médios dos transectos em cada velocidade foram estimados, e um polinômio de segundo grau foi ajustado para descrever a variação na posição do sensor do sonar com a variação de velocidade da lancha. A Figura 6 mostra o modelo resultante dessa etapa.

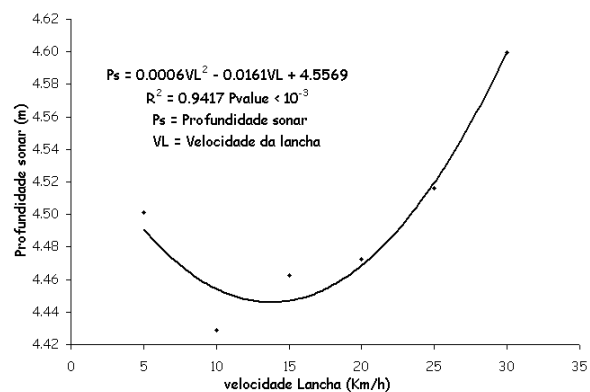


Fig. 6 – Modelo de correção da profundidade em função da velocidade da lancha.

A partir deste modelo de calibração, obteve-se uma equação 1 que foi utilizada para correção de todos os dados do levantamento.

$$Pc = [Ps - (0,0006VL^2 - 0,0161VL) + 0.15] \quad (1)$$

Onde:

Pc = Profundidade corrigida;
Ps = profundidade medida pelo sonar
VL = velocidade da Lancha;

5. MODELO BATIMÉTRICO PARA A PLANÍCIE DE CURUAI

A Figura 7 mostra a distribuição das diferentes profundidades da planície de Curuai, e a Tabela 1 a porcentagem de cada faixa de profundidade. Para a cota de referência (936 cm), 93% da área inundada esta com profundidade entre 2 e 6 metros. Como a altitude média em Curuai é 9 metros em relação a nível médio dos mares, 0,04 % do relevo da planície se encontra abaixo do nível do mar.

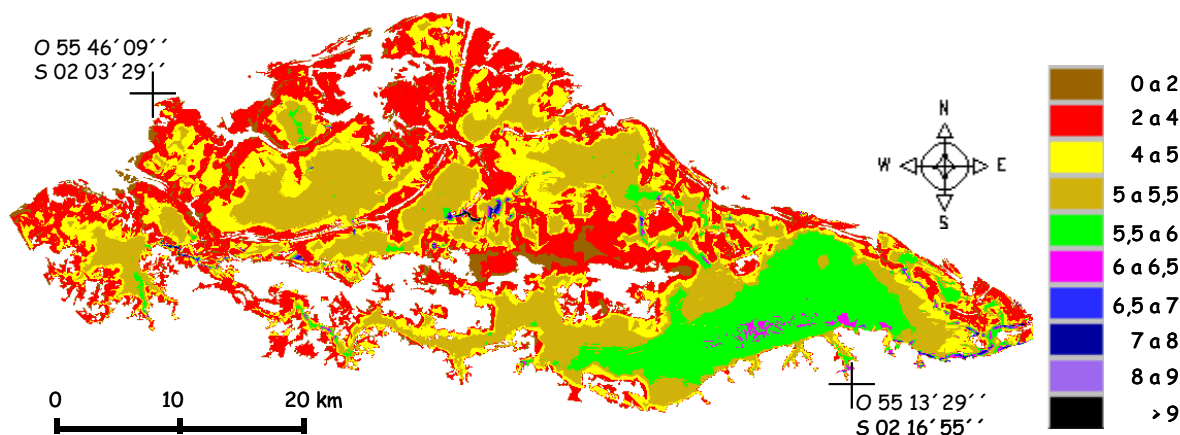


Fig. 7 – Distribuição das diferentes profundidades na planície de Curuai (Fonte: BARBOSA, 2005).

TABELA 1: FAIXAS DE PROFUNDIDADE E PORCENTAGEM DE ÁREA DE CADA FAIXA DE PROFUNDIDADE

Profundidade (metros)	% de área
0 a 2,0	5,8
2,01 a 4,0	33,1
4,01 a 5,0	21,8
5,01 a 5,5	25,5
5,51 a 6,0	12,7
6,01 a 6,5	0,7
6,51 a 7,0	0,2
7,01 a 8,0	0,2
8,01 a 9,0	0,1
> 9	0,04

(Fonte: BARBOSA, 2005)

6. DINÂMICA DE ÁREA INUNDADA E DE VOLUME NA PLANÍCIE DE CURUAI

Para quantificar a dinâmica da área inundada e do volume de água na planície de Curuai, foram utilizados os seguintes dados: as séries históricas de cotas (Janeiro de 1983 a Junho de 2004) e de imagens ópticas TM/Landsat (1984 a 2004), e o modelo de elevação digital produzido a partir do dado batimétrico. Como as imagens ópticas só permitem delimitar áreas de água aberta, e o levantamento batimétrico foi realizado somente em áreas acessíveis, que não estavam obstruídas por bancos de macrófitas, a estimativa de área inundada restringiu-se às áreas de água aberta, que representam em torno de 95% da área inundável na planície de Curuai. Como a estimativa de área seria utilizada tanto para a dinâmica de área inundada quanto para a dinâmica de volume de água na planície, duas alternativas foram avaliadas para cálculo de área: a) a partir das imagens ópticas, b) a partir do modelo de elevação digital.

Cada alternativa apresentou algumas restrições; o levantamento batimétrico ocorreu em cota média de 930 cm, não cobrindo, portanto toda a área inundável, como por exemplo, alguns lagos marginais inacessíveis devido à obstrução dos canais de acessos

por bancos de macrófitas. Para a alternativa por imagens ópticas, não havia limitações em 930 cm, e permitia mapear áreas marginais da planície, cujos acessos estavam obstruídos por bancos de macrófitas. Entretanto, para algumas datas/cotas, grandes bancos de macrófitas mascaravam as dimensões das áreas inundadas obtidas a partir das imagens, resultando em situações irreais; maior cota e menor área de água aberta.

Devido a estas restrições, adotou-se a seguinte solução: Para o cálculo de volume, utilizou-se a área inundada extraída do modelo de elevação digital, dado que somente para estas regiões tinha-se o relevo do fundo da planície. Para a modelagem da dinâmica de área inundada por água aberta, utilizou-se tanto um conjunto de imagens representativas da variabilidade do nível de água na planície, quanto a área inundada extraída do modelo de elevação digital, conforme esta descrito na próxima seção. Desta forma pode-se avaliar qual a contribuição do levantamento batimétrico para estimativa de área inundada, e qual seria o erro ao estimar a área inundada só a partir de imagens históricas.

6.1 Dinâmica de Área Inundada

Para descrever e quantificar a dinâmica de área inundada durante o ciclo hidrológico, um modelo de regressão relacionando a área inundada com o nível da água na planície foi desenvolvido. As etapas da seqüência de processamento realizada, identificadas por letras, estão ilustradas no fluxograma da Figura 8.

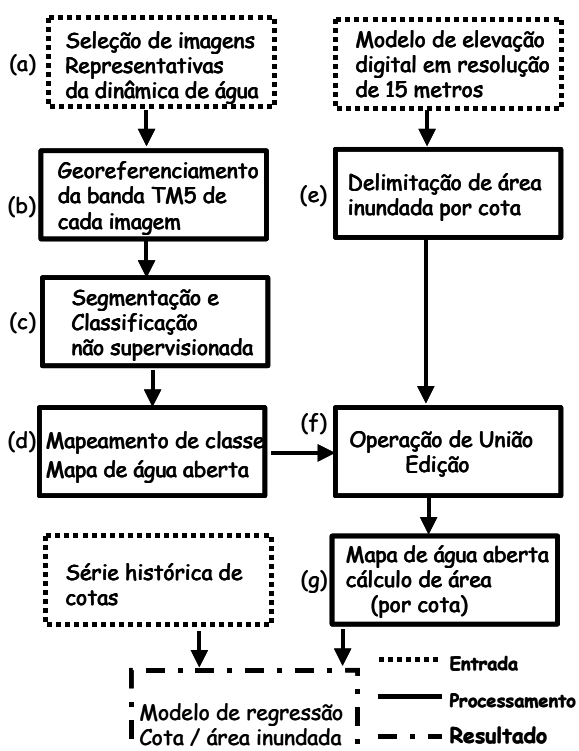


Fig. 8 – Sequência de processamento para modelagem da dinâmica de área inundada.

Inicialmente selecionou-se, da série histórica, um conjunto de imagens representativo da variabilidade do nível de água na planície (a). Cada banda 5 TM/Landsat, adequada para delimitar corpos de água, foi georeferenciada e integrada a base de dados (b). As áreas de água aberta de cada imagem foram delimitadas a partir de uma segmentação seguida por uma classificação não supervisionada (c). A classe identificada como água aberta no resultado da classificação, foi então rotulada e gerado um mapa temático de água aberta (d). A área estimada somente a partir da imagem foi denominada de “Área [1] TM”.

Para o mesmo nível de água, em que cada imagem foi adquirida, gerou-se também um mapa de área inundável a partir do modelo de elevação digital (e). Esta área foi denominada de “Área [2] batimétrica”. Uma terceira área foi obtida aplicando uma operação de união lógica sobre os dois resultados anteriores (etapas d e e), (f). Esta operação de união permitiu que eventuais corpos de água mascarados por bancos de macrófitas nas imagens fossem considerados, se estas macrófitas não estivessem presentes no mesmo local durante o levantamento batimétrico. Esta terceira área, denominada de “Área [3] TM corrigida”, foi gerada para avaliar a contribuição do dado batimétrico na estimativa de área alagada e também para estimar a porcentagem de área coberta por bancos de macrófitas.

Corpos de água fora da planície e a calha do rio Amazonas, foram removidos através de uma edição final. Finalmente ao término da etapa (g), obteve-se três conjuntos de mapas temáticos de água aberta para diferentes cotas, um obtido diretamente das imagens TM, outro obtido do modelo de elevação digital, e um

terceiro obtido das imagens, mas refinado com o mapa do modelo de elevação. Como o levantamento batimétrico foi feito na cota média de 930 cm, áreas de inundação extraídas de imagens TM, para cotas maiores que 930 cm, não foram corrigidas. A TABELA 2 sintetiza as estimativas de áreas feitas a partir destes mapas.

TABELA 2: COTAS E ÁREAS EXTRAÍDAS DE IMAGENS REPRESENTATIVAS DA DINÂMICA DE ÁREA INUNDADA E DO MODELO DE ELEVÇÃO DIGITAL

Cota (cm)	Área [1] TM (Km ²)	Área [2] batimétrica (Km ²)	Área [3] TM corrigida (Km ²)	Diferença a [1]-[2] (Km ²)	Diferença [3]-[1] (Km ²)	% de área coberta por macrófitas
416	706,7	526,7	707,9	178	1,2	0,18
425	656,9	551,0	707,2	105,9	50,3	7,66
476	840,7	697,7	840,7	143	0,0	0,00
563	1003,8	874,9	1015,4	128,9	11,6	1,15
662	1104,4	1052,6	1117,8	51,7	13,4	1,21
722	1195,4	1132,8	1266,1	62,6	70,7	5,91
809	1254,8	1205,4	1260,6	49,4	5,8	0,46
881	1341,4	1252,9	1430,0	88,6	77,8	5,80
897	1393,5	1263,2	1449,2	130,4	55,5	3,98
930	1424,3	1284	1438	140,3	13,7	0,96
984	1431,5	**	**	**	**	**
1015	1587,2	**	**	**	**	**

As áreas estimadas a partir das imagens (Área [1] TM), foram sempre maiores que as estimadas pelo modelo de elevação digital. Isto se explica pelo fato das imagens capturarem corpos de água em locais não acessados pela batimetria. Como grandes bancos de macrófitas cobrem extensas áreas inundáveis a precisão da estimativa destas áreas a partir de imagens ópticas pode ser questionada. Muitos destes bancos de macrófitas ocorrem principalmente no período de descida e de água baixa, em locais onde se teve acesso para batimetria no período cheia. Delimitando através do dado batimétrico áreas inundáveis para a mesma cota da imagem, pode-se não só corrigir a área como também determinar o erro que se comete ao se usar somente a imagem para determinação de área de água aberta.

As diferenças entre as áreas inundadas “Área [3] TM corrigida” e “Área [1] TM”, correspondem em Km², as áreas que estavam cobertas por bancos de macrófitas, na data da aquisição da imagem, mas sem macrófitas no período do levantamento batimétrico. Estes valores estão na coluna “Diferença [3]-[1]” da TABELA 2. Para as cotas avaliadas, a diferença máxima foi de 7,6 %. Este número tem dois significados; primeiro, que bancos de macrófitas ocuparam até 7,6% da área inundada, nas imagens históricas. Segundo, considerando-se que naquelas áreas onde não se tem batimetria, a proporção de bancos de macrófitas é a mesma, o erro que se comete ao usar somente imagens para se estimar área de água aberta, pode chegar a 7,6%.

A partir da análise da Tabela 2 e das taxas de variação do nível de água (BARBOSA, 2005), podem-se levantar as seguintes hipóteses explicativas para as diferenças de áreas estimadas pelas imagens e aquelas estimadas a partir dos dados batimétrico: 1) Para cotas

entre 416 e 563 cm (Figura 9), a diferença de área foi sempre próxima de 140 Km². Esta diferença deve-se às áreas de lagos marginais que não puderam ser submetidos a levantamento batimétrico. Como o nível de água está baixo, a superfície desses lagos marginais não aumenta com o aumento do nível da cota, pois a água que está entrando fica confinada às regiões mais profundas da planície (calha dos lagos principais), não extravasando para os lagos marginais; 2) A partir da cota 662 cm, nota-se que a diferença entre as medidas obtidas a partir das imagens e aquela derivada do levantamento batimétrico se reduz à metade. Pode-se supor que em torno dessa cota encontram-se os níveis em que a água extravasa da calha dos lagos principais para as regiões mais baixas da planície. A partir dessa cota até em torno da cota de 690 cm, acontece um nítido e rápido decréscimo na taxa de subida diária do nível de água (elipse 1 – Figura 9), devido a esse extravasamento, que faz com que o excedente de água se acomode em uma maior área de armazenamento. Como consequência vê-se esta redução na diferença de áreas. 3) Nota-se novamente um aumento, porém menor, na taxa diária de subida entre 700 e 780 cm (elipse 2). Isto se deve a uma segunda área de confinamento, que reflete em uma maior diferença de áreas estimadas em 722 cm. 4) Entre a cota 881 e 930 cm, nota-se que a diferença entre as áreas aumentou novamente. Este aumento reflete o aumento das áreas dos corpos de água isolados, com o aumento da cota.

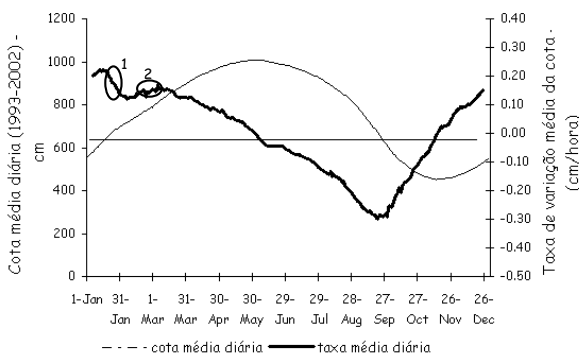


Fig. 9 – Taxa de variação do nível da água.

Os modelos de regressão relacionando as áreas inundadas com o nível d'água na planície pelas duas abordagens são apresentados nas figuras 10 e 11, e a correlação entre as áreas estimadas é mostrada na Figura 12.

Tanto o modelo cota *versus* área inundada a partir das imagens históricas quanto o modelo cota *versus* área inundada a partir da batimetria, foram descritos por um polinômio de segundo grau (Equações 2 e 3). Ambos se mostraram altamente representativos, com coeficientes de determinação (R) de 0,99 e valores P menores 10⁻⁴, indicando que para a planície de Curuai, o nível de água é um bom indicador de área inundada. Um modelo linear também se ajustou bem aos dados, entretanto, o polinômio de segundo grau contempla melhor a tendência de redução da taxa de crescimento da área inundada para cotas maiores.

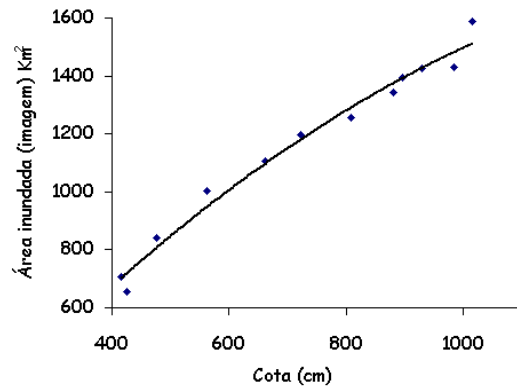


Fig. 10 - Modelo de regressão relacionando cota com área de água aberta, obtida a partir de imagens.

$$\text{Área (imagem)} = -7 \cdot 10^{-4} \times \text{cota}^2 + 2,4 \times \text{cota} - 164,5 \quad (2)$$

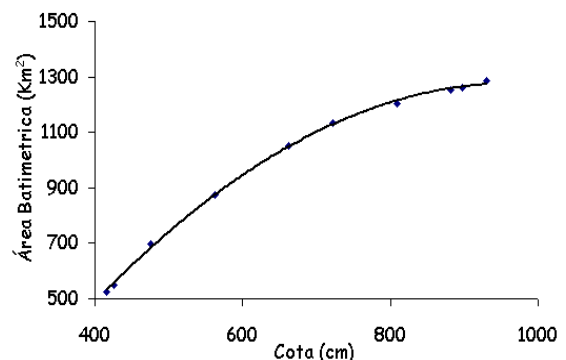


Fig. 11 - Modelo de regressão relacionando cota com área de água aberta, obtida a partir de dados batimétricos.

$$\text{Área (batimétrica)} = -25 \cdot 10^{-4} \times \text{cota}^2 + 4,75 \times \text{cota} - 1020,5 \quad (3)$$

Analisou-se também a relação entre as áreas estimadas a pelos dois métodos. Confirmou-se, como era de se esperar, que apesar da diferença de valores, a correlação entre as estimativas foi praticamente 1 (0,99). A Fig. 12 mostra na forma gráfica esta correlação.

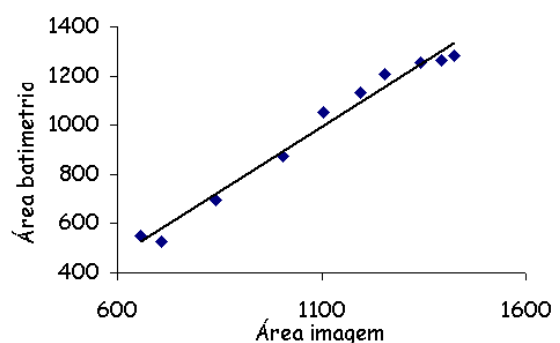


Fig. 12 – Correlação entre áreas inundadas obtidas a partir de imagens TM/Landsat e a partir de dados batimétricos.

6.2 Dinâmica de Volume

6.2.1 Métodos de Cálculo de Volume de Água em Lagos

KALFF (2001) propõe a abordagem ilustrada conceitualmente na Figura 13 para a estimativa do volume de um lago. A abordagem sugere que inicialmente sejam geradas isóbatas com espaçamentos adequados para a escala da área de estudo e a seguir se aplique a equação 4 para estimar o volume de água entre duas isóbatas consecutivas.

$$Volume_{(i_2,i_1)} = \left(\frac{A_{i_1} + A_{i_2}}{2} \right) (V_{i_2} - V_{i_1}) \quad (4)$$

onde:

$Volume_{(i_2,i_1)}$ – volume de água entre duas isóbatas consecutivas;

A_{i_1} – área compreendida pela isóbata i_1 ;

A_{i_2} – área compreendida pela isóbata i_2 ;

V_{i_1} – valor da isóbata i_1 ;

V_{i_2} – valor da isóbata i_2 ;

O volume do lago, conforme ilustrado na Figura 13 é o somatório de todos os volumes entre isóbatas.

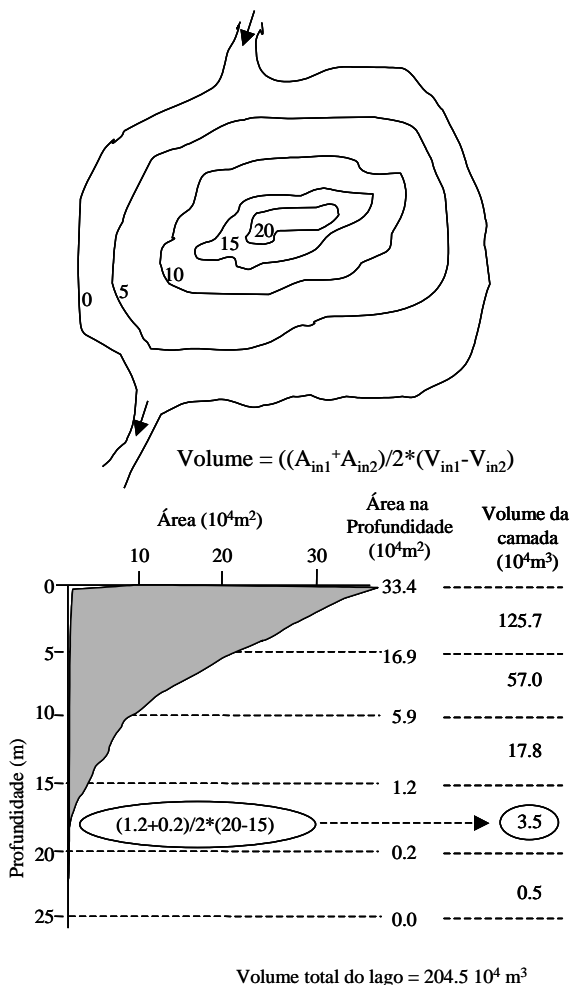


Fig. 13 – Método para determinação do volume de um lago (Adaptado de KALFF (2001)).

A abordagem proposta por KALFF (2001) é adequada para lagos isolados e com relevo simples, onde as isóbatas são concêntricas, mas se mostra de difícil aplicação para o caso da planície de Curuai, que além de possuir um relevo complexo, com vários lagos e uma série de canais entre esses lagos, possui grandes dimensões, com uma área inundável de aproximadamente 2000 km². Em função disto, a abordagem descrita a seguir, disponível no sistema SPRING, a qual estima o volume do lago a partir de uma grade regular de células, parece mais adequada, e de fácil execução.

Em um modelo de grade regular de células, a região geográfica de estudo é particionada em uma matriz de células (Figura 14) e a cada célula é atribuído o valor médio relevo (altitude ou profundidade). Na Figura 14-a, as linhas ilustram um exemplo teórico de isóbatas de um lago, cuja área foi particionada na forma de uma matriz regular de células. A Figura 14-b ilustra o valor médio de profundidade atribuído a cada célula. Sabendo-se a área da célula, pode-se estimar o volume de água na célula, multiplicando sua área pelo valor da célula, que no caso é igual à sua profundidade média. Obtém-se o volume total somando os volumes de toda as células que compõem o lago.

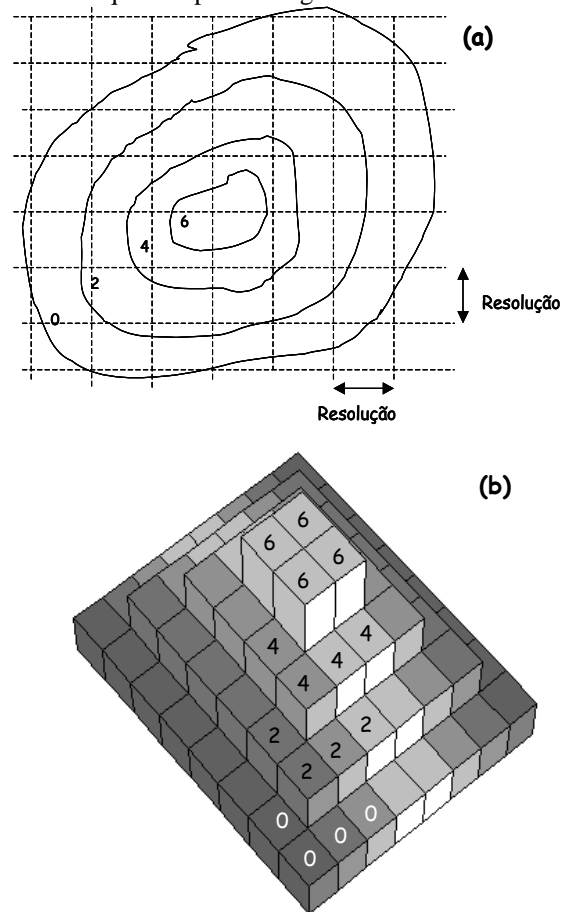


Fig. 14 – Método para determinação do volume de um lago através de uma grade regular de células. (a) – A região de interesse é particionada em células regulares. (b) – Representação 3D onde cada célula recebe o valor médio de profundidade.

6.2.2 Estimativa de Volume de Água na Planície de Curuai

Para as estimativas de volume de água em diferentes cotas, utilizou-se o modelo de elevação digital, na forma de uma grade regular de pontos, com resolução horizontal de 15 metros, resolução vertical de 1 centímetro, e a área inundada estimada também a partir deste modelo. Os volumes foram calculados através de um aplicativo disponível no sistema SPRING (ROSIM, 1996) que recebe como entrada além do modelo de elevação digital, a cota e as delimitações das regiões, na forma de polígonos, sobre a qual se quer estimar o volume. Foram estimados os volumes de água para as mesmas cotas das imagens utilizadas na modelagem da dinâmica de área inundada. As etapas da seqüência de processamento, identificadas por letras estão ilustradas no fluxograma da Figura 15. Inicialmente realizou-se uma operação para identificar, através do modelo de elevação digital, quais as regiões inundadas para cada cota desejada [a]. Como o programa para cálculo de volume, precisa receber a delimitação da área sobre a qual se quer saber o volume, na forma de polígonos, uma operação de conversão matriz/vetor, transforma o resultado da etapa [a], que esta na forma matricial, para polígonos [b]. Finalmente, o programa estima o volume sobre a área desejada [c]. A Figura 16 apresenta os volumes estimados para as mesmas cotas em que foram calculadas as áreas de água aberta, e o gráfico de ajuste da relação cota / volume de água armazenado na planície.

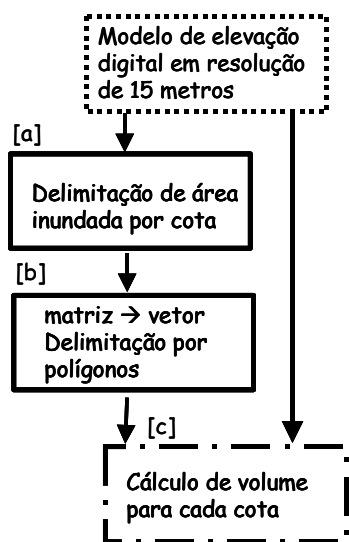


Fig. 15 – Seqüência de processamento para a dinâmica de volume.

Uma relação linear (equação 5) foi encontrada entre a cota e o volume de água armazenado na planície. Com um fator de determinação de 0,99 e um valor p menor 10^{-4} , esta relação se mostrou altamente representativa, sinalizando que a cota também é um bom parâmetro para estimativa de volume de água armazenado a planície de Curuai.

$$\text{Volume} = 10^7 \text{ cota} - 4,0 \times 10^9 \quad (5)$$

Para a série histórica disponível de cotas, determinaram-se as cotas médias, mínima e máxima nos últimos 30 anos que foram de 420 cm e 950 cm respectivamente. Aplicando estes valores na equação 5, chega-se que o volume médio de água armazenado na planície em cada ciclo hidrológico estaria em torno de $5,3 \times 10^9 \text{ m}^3$.

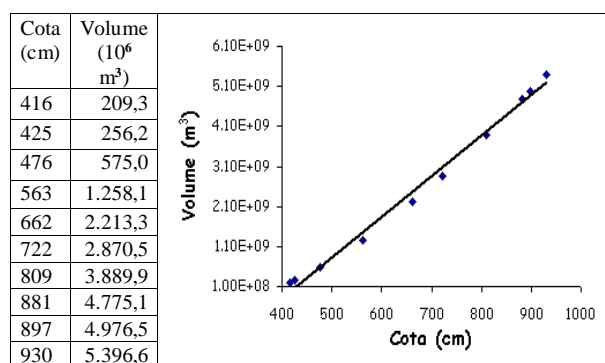


Fig. 16 – Volume de água na planície para diferentes cota e modelo relacionando cota com volume.

7. CONCLUSÕES

Os resultados da análise batimétrica permitiram concluir que não existem diferenças significativas entre as estimativas de área inundada a partir do levantamento batimétrico e de série históricas de imagens. O erro médio estimado ao se utilizar apenas imagens para o cálculo de água aberta na planície é inferior a 10 %.

O uso de dados batimétricos, entretanto, foi fundamental para o desenvolvimento de um modelo cota/volume de água que é armazenado e circula anualmente pela planície. A análise da distribuição das profundidades na planície de Curuai, revelou, entretanto, que o relevo é bastante homogêneo e que pode ser aproximado a partir de uma profundidade média de cerca de 5 metros, dado que para uma cota de 936 cm, 92% da planície se encontra na profundidade média de 5 metros. A diferença de estimativa do volume de água da planície com base no modelo batimétrico e na adoção de uma profundidade média foi da ordem de 16 %, sugerindo que esse método talvez possa ser estendido para outras seções da planície do médio Amazonas utilizando modelos batimétricos simplificados. Ou seja, realizam-se apenas alguns transectos para determinar a profundidade média da planície em análise, e utilizam-se imagens adquiridas em diferentes níveis de cota para determinação de área inundada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), sob processo nº 2003/06999-8, ao projeto GEOMA (Rede

Temática de Pesquisa em Modelagem da Amazônia) e ao projeto LBA-LC-07 (LBA-Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia), pelo apoio financeiro, para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curuai/rio Amazonas**. (Tese de Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais –(INPE), São José dos Campos, 2005.

BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; FILHO, W.P.; CARVALHO, J.C. **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**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-11483-NTC/365, 2004.

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

CAMARA G.; SOUZA R.C.M.; FREITAS U.M.; GARRIDO J. Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, 20;(3) 395-403, May-Jun 1996.

COE, M.T. A linked global model of terrestrial hydrologic processes: Simulation of modern rivers, lakes, and wetlands. **Journal of Geophysical Research** 103(D8), 8885-8899, 1998.

COE, M.T. Modeling terrestrial hydrological systems at the continental scale: Testing the accuracy of an atmospheric **Journal of Climate** (13): 686-704. GCM. 2000.

FELGUEIRAS, C. A.; GOODCHILD, M. F. **"Two Papers on Triangulated Surface Modeling**, Technical Report 95-2, NCGIA - National Center for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara, California, USA. 1995.

KALFF J. **Limnology: Inland Water Ecosystems**. Prentice Hall, 2001. 592p.

LOWRANCE - Pub. 988-0151-181 - **LMS-480M, LMS-480DF Fish-finding Sonar & Mapping GPS Operation Instructions 2003**. 206p. Disponível em <www.lowrance.com>. Acesso: 15 Janeiro 2005.

RICHEY, J.E., L.A.K. MERTES, T. DUNNE, R.L. VICTORIA, B.R. FORSBERG, A.C.N.S. Tancredi and E. Oliveira. Sources and routing of the Amazon River flood wave. **Global Biogeochemical Cycles** 3:191-204, 1989.

ROSIM, S.; NAMIKAWA, L. M., Calculo do volume de corte e aterro usando modelagem numérica de terrenos **VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Salvador - BA, 14-19 de abril de 1996.