

The text that follows is a REPRINT  
O texto que segue é um REPRINT.

Please cite as:  
Favor citar como:

**Feitosa, G.S., P.M.L.A. Graça & P.M. Fearnside. 2007. Estimativa da zona de deplecionamento da hidrelétrica de Balbina por técnica de sensoriamento remoto pp. 6713 – 6720 In: J.C.N. Epiphanyo, L.S. Galvão & L.M.G. Fonseca (eds.) *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil 21-26 abril 2007. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-São Paulo, Brasil.***

Copyright Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-São Paulo

The original publication is available from:  
A publicação original está disponível de:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-São Paulo

## Estimativa da zona de deplecionamento da hidrelétrica de Balbina por técnica de sensoriamento remoto

Gleicyane Souza Feitosa<sup>1</sup>  
Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça<sup>2</sup>  
Philip Martin Fearnside<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Amazonas – UFAM  
Manaus - Am, Brasil  
Gleicy02geog@bol.com.br

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA  
Caixa Postal 478 - 69011-970 – Manaus - AM, Brasil  
{Paulo Maurício} pmlag@inpa.gov.br  
{Philip} pmfearn@inpa.gov.br.

**Abstract.** Dams are permanent source of greenhouse gases, among them methane (CH<sub>4</sub>). The production and emission of this gas occurs because of fluctuation in the water level. When the minimum level is reached, a large area known as the drawdown zone expose where herbaceous vegetation grows up quickly. This vegetation decomposes and emits methane when the reservoirs level rises. The objective this research is to estimate this drawdown area of the Balbina Dam, at the minimum level of 1997 and maximum of 2003. The result of this technique is a change-detection map, derived from the TM/Landsat sensor, a thematic representation of the Balbina Dam drawdown zone.

**Palavras-chave:** Balbina Dam, drawdown, remote sensing, change detection, Hidrelétrica de Balbina, deplecionamento, sensoriamento remoto, detecção de mudanças.

### 1. Introdução

Ao contrário do que comumente se pensa a geração de energia por hidrelétricas não consiste em uma fonte de energia limpa, e um dos seus mais sérios problemas advém de sua alta capacidade de emissão de gás metano (CH<sub>4</sub>), um gás de efeito estufa (Levy, 2005).

A potencialidade de geração desse gás em represas deve-se a flutuação do nível da água. A cada vez que o nível mínimo operacional normal é atingido, um vasto lamaçal é exposto, e a vegetação herbácea, de fácil decomposição, cresce rapidamente nesta zona, conhecida como zona de “deplecionamento”, ou de “*drawdown*”. Subseqüentemente, quando o nível da água sobe, a biomassa se decompõe no fundo do reservatório, produzindo metano (Fearnside, 2005).

Fearnside (2005) aponta que o gás metano gerado e emitido por esta zona difere da emissão daquele originado a partir da decomposição de estoques iniciais de gás carbônico no solo, folhas e serapilheira da floresta original inundada. Essa diferença se dá pela zona de deplecionamento ser uma permanente fonte deste gás e, já a decomposição de gás carbônico da parte superior das árvores da floresta inundada, representa uma grande fonte temporária de emissão de gás de efeito estufa, pois sua decomposição se dá somente nos primeiros anos depois da formação de um reservatório.

O presente trabalho analisa o caso particular da hidrelétrica de Balbina, cujo recrescimento de macrófitas na zona de deplecionamento do seu reservatório, a cada ano, remove o carbono da atmosfera pelo processo de fotossíntese, e depois o emite na forma de metano quando a vegetação é inundada. O recrescimento vegetal na zona de deplecionamento deste reservatório tem semelhança ao que ocorre nas várzeas, sendo que Graciani e Novo (2003) apontam para a ocorrência de um regime artificial constante de enchente e estiagem nos lagos de hidrelétricas, já que o nível da água é controlado de acordo com as necessidades operacionais para a produção de hidroeletricidade da usina.

Esta hidrelétrica é uma fonte potencial de gases de efeito estufa, pois suas emissões após três anos de operação ultrapassavam em 22,6 vezes do que seria emitido se utilizada a mesma quantidade de energia a partir de combustíveis fósseis (Fearnside, 2005).

A estimativa da área de deplecionamento do reservatório desta hidrelétrica pela técnica de detecção de mudança, permitiu mapear e quantificar esta área. A área de deplecionamento considerada neste estudo correspondeu à diferença entre as cotas no nível mínimo, referente ao mês junho do ano de 1997, e no nível máximo, obtida mês agosto do ano de 2003. As informações geradas neste estudo contribuirão na melhoria dos modelos utilizados também para estimativa das emissões de gases de efeito estufa, originadas pelas hidrelétricas na Amazônia.

## 2. Área de estudo

A Hidrelétrica de Balbina (Eletronorte) foi construída em 1987 no rio Uatumã no povoado de Balbina, município de Presidente Figueiredo, Amazonas, a 155 km ao norte de Manaus, Amazonas (**Figura 1**), com o objetivo de fornecer energia para Manaus (Moura et al., 2004). O lago formado ocupou uma área de floresta de 2.360 km<sup>2</sup> que, ao ser inundada condicionou a existência de uma hidrelétrica desproporcional à sua modesta capacidade energética, cuja geração média de energia é de 112,2 MW (Figueiredo e Laraque, 1999). A região possui um lago com cerca de 3.300 ilhas formadas principalmente devido ao relevo altamente plano e entalhamentos pouco pronunciados. Possui margens dendríticas e grande quantidade de “paliteiros” (árvores afogadas). O regime hidrológico segue o mesmo padrão característico dos demais rios amazônicos, com um período de águas altas, nos meses de abril a junho, e de águas baixas de agosto a dezembro. O clima da região é classificado como tropical úmido, típico da região amazônica, com temperaturas elevadas (média de 36° a 38° C) e alta pluviosidade (2000 mm), possuindo estações seca (junho a novembro) e chuvosa (dezembro a maio) bem definidas.

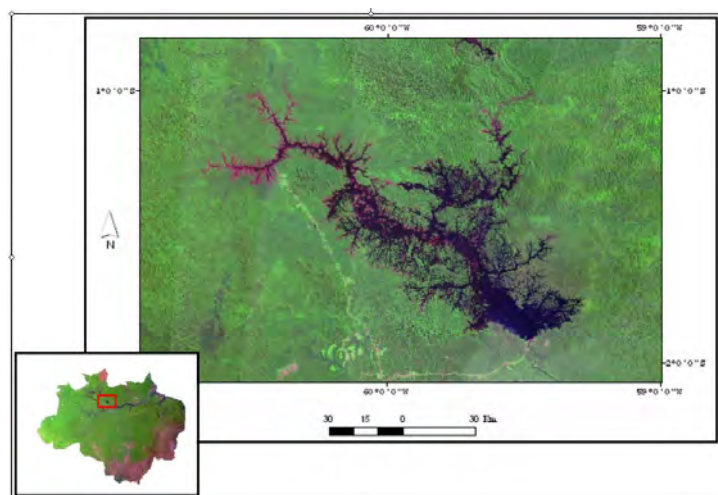


Figura 1- Localização da área de estudo.

## 3. Material e Métodos

As informações das imagens de satélite neste trabalho foram extraídas com a utilização do aplicativo ENVI e da linguagem de programação computacional LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) do aplicativo SPRING (Câmara, 1995). Para o georreferenciamento das imagens foram utilizadas imagens do banco de dados (“geocover”) da NASA (National Aeronautics and Space Administration), disponível na página de rede <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>.

## Dados Multitemporais

A dimensão da zona de deplecionamento foi obtida a partir de dados multitemporais do sensor TM/Landsat para as datas de 30 e 21 de Junho de 1997 e 09 e 18 de Agosto de 2003. Estas imagens representam uma subcena do mosaico formado pelas cenas 231/61 (datas 21/06/1997 e 09/08/2003) e 230/61 (datas 30/06/1997 e 18/08/2003).

Para cada ano foi necessário utilizar duas cenas diferentes para compor um mosaico de imagens, no qual abrangesse a totalidade da represa, impondo a utilização de datas distintas para a composição do mosaico, pois as cenas adjacentes 231/61 e 230/61 possuem intervalos de aquisição diferentes pelo sensor. A fim de minimizar a diferença entre as cotas dos mosaicos, utilizaram-se datas com o menor intervalo de tempo possível. Estas imagens também foram seleccionadas por apresentarem pouca presença de nuvens, e também por representarem o período de estiagem e enchente do regime hídrico artificial do Lago de Balbina, respectivamente, ressaltando que a primeira imagem consistiu em dados de ano com atuação do fenómeno El Niño.

## Procedimentos Metodológicos

A metodologia empregada neste estudo baseou-se na técnica de detecção de mudanças por subtração de imagens. As etapas envolvidas no procedimento metodológico são apresentadas na **Figura 2** e descritas a seguir:

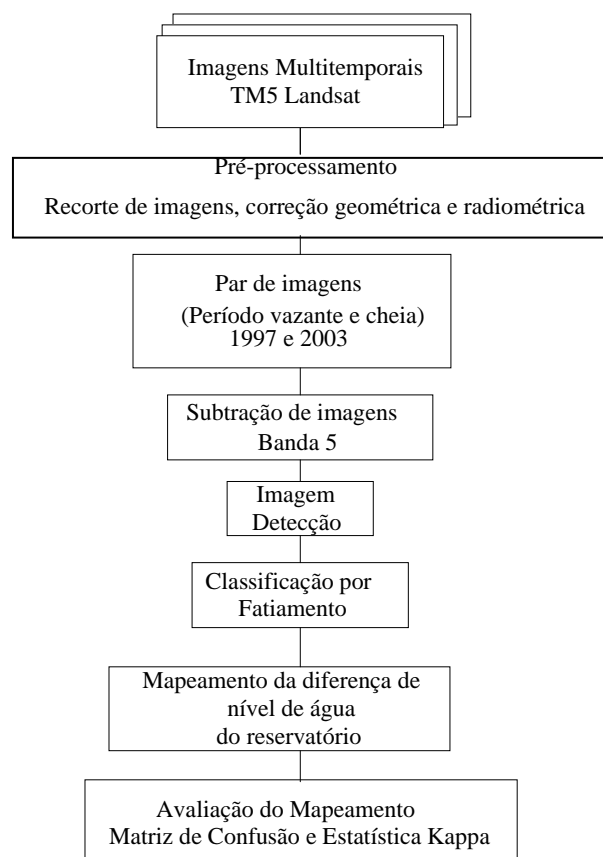


Figura 2 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

A técnica de detecção tem como um de seus pré-requisitos básicos a intercalibração geométrica e radiométrica. Por isso as imagens analisadas foram corrigidas geometricamente através de um registro imagem-imagem e de um polinômio de mapeamento de primeiro grau e

reamostragem pelo vizinho mais próximo. Com a finalidade de normalizar a radiometria das imagens adquiridas em diferentes datas foi realizada uma intercalibração radiométrica a partir do método de retificação radiométrica de imagens, de acordo com Hall et al. (1991). Posteriormente, o georreferenciamento da imagem classificada a um sistema de coordenadas geográficas foi obtido a partir do co-registro desta com as imagens disponíveis no banco de dados (“geocover”).

A técnica utilizada envolveu a álgebra de imagens, sendo aplicada uma operação aritmética de subtração aos pixels em cada imagem, obtendo-se a partir dos valores resultantes, uma terceira imagem, a imagem de mudança, que é simplesmente o resultado de uma operação de subtração realizada em um par de imagens co-registradas de uma mesma área adquirida em diferentes datas (Mather, 1999).

O procedimento descrito aplicou-se somente para a banda do espectro do sensor TM5 correspondente à faixa espectral do infravermelho médio (1,55  $\mu\text{m}$  a 1,75  $\mu\text{m}$ ) ou banda 5. Esta banda foi selecionada por apresentar sensibilidade ao teor de umidade das plantas, condicionando a visualização de áreas expostas em regiões inundadas. Esta região do espectro tem sido utilizada em estudos relacionados aos sistemas lacustres na Amazônia de acordo com Assis e Matos (2001), que concluíram que sua utilização é adequada para mostrar áreas de exposição em locais inundados, formando reservatórios que sofrem influência climática sazonal para seu preenchimento. Conforme mencionado por Slater (1980), a banda do infravermelho médio é pouco afetada pelo espalhamento atmosférico, ao contrário das três primeiras bandas espectrais do visível do sensor (azul, verde, vermelho). Este fato nos levou a desconsiderar o procedimento de correção atmosférica das imagens.

A imagem detecção foi classificada através da técnica de fatiamento, rotulando-se as mudanças ocorridas entre as datas de acordo com o tipo de mudança: 1) Inundação – classe com alterações na cobertura vegetal ou na superfície do solo, em decorrência do alagamento pela água da represa; 2) Não mudança – classe de áreas que mantiveram o mesmo tipo de cobertura de um ano para outro, com alterações mínimas na resposta radiométrica, não sensíveis à técnica utilizada e; 3) Exposição – caracterizada como a classe que apresentou ganho de cobertura vegetal ou cobertura de solo exposto, resultante da redução do nível de água da represa, no caso deste estudo, a região de interesse, a zona de deplecionamento. Estas classes foram estabelecidas por limiares de mudança baseados no desvio padrão. Intervalos de 0,25 desvios padrão, numa amplitude de 0,25 a 2,0 desvios foram testados para selecionar o melhor limiar obtido pela estatística da imagem detecção, a partir de uma avaliação visual das imagens. O limiar escolhido por este procedimento foi de  $\pm 1,25$  desvio padrão.

Para aferir a consistência do mapeamento foram utilizados dados de imagens de satélite TM Landsat na composição 3(B), 4 (G) e 5(R) para o período de vazante (junho de 1997), com base na experiência do fotointérprete para região de estudo. O grau de concordância do mapeamento foi avaliado com base em uma matriz de erro e na estatística Kappa, de acordo com Congalton e Green (1999).

#### 4. Resultados

A dimensão da área de deplecionamento da hidrelétrica de Balbina (659,6  $\text{km}^2$ ), consistiu em aproximadamente 22,0% do total da área afetada pelo sistema lacustre, que correspondeu a uma área de 2.995,5  $\text{km}^2$  (espelho d’água e área de deplecionamento) (**Figura 2**). A área da represa (área alagada) estimada por este estudo foi de 2.335,9  $\text{km}^2$ , para uma cota de 47,6 m<sup>1</sup>. Este valor está próximo da área de inundação de 2.360  $\text{km}^2$  estimado pela Eletrobrás (1986)

---

<sup>1</sup> Média entre as cotas das duas cenas utilizadas para o mosaico

para a cota 50m. No entanto, quando considerado o espelho d'água e a área de deplecionamento (2995,5 km<sup>2</sup>), que corresponde à área alagada na cota 49,54m, a área estimada para o lago da represa foi 26,9% (635,5 km<sup>2</sup>) superior aquela estimada para cota 50m pela Eletrobrás. Estes dados indicam que a estimativa de 2.360 km<sup>2</sup> para a cota 50m estimada pela Eletrobrás deva estar subestimada.

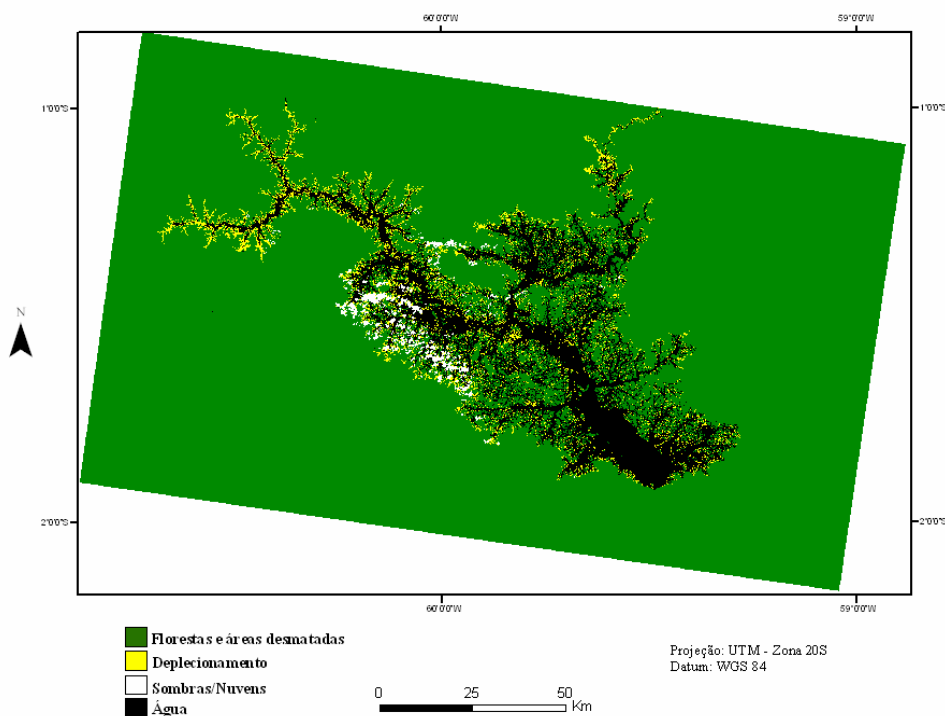


Figura 2 - Mapa de detecção de mudanças.

De acordo com Asner (2001) a utilização de dados multiespectrais do sensor Landsat para a região tropical úmida, particularmente para a Amazônia Brasileira, apresenta como maior obstáculo a presença de nuvens na maior parte do ano. Isto pode impossibilitar ou dificultar a visualização da superfície terrestre através das imagens captadas pelo sensor, e conseqüentemente os estudos através de sensoriamento remoto.

A estimativa da zona de deplecionamento da represa de Balbina também foi prejudicada pela presença de nuvens sobre a superfície do reservatório, que representaram juntamente com suas respectivas sombras, uma área de 159,6 km<sup>2</sup>, o que correspondeu a 5,3% do total dos 2995,5 km<sup>2</sup> (**Tabela 1**). Desta maneira a estimativa encontrada deste estudo pode ter sido subestimada.

Tabela 1-Quantificação das áreas mapeadas.

Categoria	Área (km <sup>2</sup> )
1. Floresta e áreas desmatadas	21.891,6
2. Deplecionamento	659,6
3. Água	2.335,9
4. Nuvens/Sombras	159,6
<b>Total</b>	<b>25.046,7</b>

1. Floresta e áreas desmatadas; 2. Deplecionamento-exposição de solo entre um período de enchente e outro de estiagem; 3. Água- o lago propriamente dito e; 4. Nuvens/Sombras sobre a represa.

Vale ressaltar que esta estimativa foi realizada a partir da técnica de subtração de imagens, utilizando uma das imagens com data em ano de passagem do fenômeno atmosférico global El Niño, responsável por mudanças significativas na cota de alagamento desta hidrelétrica. Por exemplo, as cotas do reservatório desta hidrelétrica atingiram seus picos mínimos nos anos de passagem deste fenômeno, de 1997 a 1998, se estendendo a 1999 (**Tabela 2**), no período de analisado de 1995 a 2004.

Tabela 2 - Valores anuais de cotas máximas e mínimas e suas respectivas diferenças durante um período de dez anos<sup>2</sup>.

Ano	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Cota máxima	49,91	51,15	48,38	45,08	50,82	51,14	50,63	50,86	49,66	48,17
Cota mínima	47,56	48,44	42,07	40,86	45,1	48,53	47,43	47,65	47,69	47,14
$\Delta$ cotas	2,35	2,71	6,31	4,22	5,72	2,61	3,2	3,21	1,97	1,03

No entanto, a diferença de cota utilizada neste estudo foi em média de 2,0m (**Tabela 3**), valor que pode ser encontrado em anos de ausência de El Niño. As diferenças sazonais intra- anuais apontam para médias de cotas, normalmente aproximadas, ou até superiores, que as dos períodos das imagens estudadas, como, por exemplo, no ano de 2002, que apresentou diferença entre nível mínimo e máximo de 3,21 metros.

Tabela 3 - Datas de aquisição das imagens utilizadas, suas respectivas cotas e média das cotas entre as cenas<sup>3</sup>.

IMAGEM (cena)	DATA	COTA (metros)	Média de cotas (metros)
230/61	21/6/1997	47,7	47.6
231/61	30/6/1997	47,51	
230/61	9/8/2003	49,58	49.6
231/61	18/8/2003	49,54	
$\Delta$ cotas (metros)			2

Na avaliação do mapeamento a exatidão global obtida foi de 98.2%, no entanto a classe de interesse “deplecionamento” apresentou uma exatidão de 76.1%, portanto, uma confusão de 12,9% com a classe “floresta/desmatamento”. Esta confusão relativamente alta pode ter sido resultado de sombreamento da floresta sobre o solo argiloso seco, por exemplo. A exatidão de mapeamento para a classe floresta/desmatamento foi de 99,26 %, ou seja, de um total de 2188 pontos de teste (pixels), apenas 16 pixels desta classe foram classificados erroneamente, apresentando um erro de comissão de 0,7% e de omissão de 1,2%. Em geral, a matriz de confusão indicou maiores erros de comissão que de omissão (**Tabela 4**).

<sup>2</sup> Dados fornecidos pela empresa Manaus Energia.

<sup>3</sup> Dados para média de cotas, fornecidos pela empresa Manaus Energia.

Tabela 4 - Matriz de erro do mapeamento.

		Terrestre Referência				Total	Erro de Comissão (%)
		Floresta	Água	Deplecionamento	Outras		
Classes temáticas	Floresta	2172	0	8	8	2188	0,7
	Água	5	68	0	3	73	10,9
	Deplecionamento	15	0	54	2	71	23,9
	Outras	6	0	0	42	48	12,5
	Total	2198	68	62	55	2380	
Erro de Omissão (%)		1,2	0	12,9	23,6		
Exatidão global = 98,2%				Coeficiente <i>Kappa</i> = 0,95			

## 5. Conclusões

O resultado da avaliação do desempenho do mapeamento foi bastante satisfatório, alcançando um valor de Kappa igual a 0,95 (excelente). Demonstrou-se assim que a técnica utilizada, aplicada a dados multitemporais, possui um grande potencial para o mapeamento de áreas sujeitas à inundação, como no caso do reservatório de Balbina. Com a utilização destes dados para a estimativa da zona de deplecionamento da represa de Balbina, seria possível a construção de um modelo de previsão de área de deplecionamento. Este modelo teria por base a relação entre as diferenças de nível de cota dos anos analisados, e as áreas de deplecionamento obtidas pela detecção de mudança, derivadas de imagens de satélite. Esforços futuros, neste sentido, serão empenhados para o desenvolvimento deste modelo.

## Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq (Proc.55712/2005-4, 306031/2004-3, 420199/2005-5) e ao INPA (INPA: PPI 851 1-1005) pelo suporte financeiro, ao projeto Geoma/INPE pelas imagens cedidas e ao CNPq pela bolsa de iniciação científica.

## Referências

- Asner, G.P. Cloud Cover in Landsat Observation of the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**. vol. 22, n. 18, p. 3855-3862, 2001.
- Assis, F.P.; Matos, F. D. A. Análise Multitemporal da UHE de Balbina Através de Imagens de Sensoriamento Remoto Orbital. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 10, 2001, Foz do Iguaçu. Anais. São José dos Campos: INPE, 2001. Artigos p. 527-529.
- Levy, B. Uma energia nem tão limpa. Instituto Ciência Hoje. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/controlPanel/materia/view/3263>>. Acesso em: 05 mai. 2006.
- Brasil, Eletrobrás. Programa de expansão do setor elétrico brasileiro, ano 2010- PRS. Centrais Elétricas S.A. (Eletrobrás). Brasília, 1986. 2 vols.
- Câmara, G. Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos. 1995, 286 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1995.
- Congalton, R.G. and Green, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Boca Raton: Lewis Publishers. 137 pp. 1999.



Eletronorte. Usina Hidrelétrica – Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.eln.gov.br/Usinas/Balbina/MeioBalbina.asp>> Acesso em: 20 de maio de 2006.

Fearnside, P.M. **Hidrelétricas planejadas no rio Xingu como fontes de gases do efeito estufa: Belo Monte (Kararaô) e Altamira (Babaquara)**. In: Tenotã-Mô: Alertas sobre as conseqüências dos projetos hidrelétricos no rio Xingu. São Paulo: IRN, p. 204-241, 2005.

Figueiredo, M. D. M.; Laraque, A. **Balbina: 10 anos depois**. In: Manaus'99 -hydrological and geochemical processes in large scale riverbasins: extended abstracts. Brasília: HIBAM, 1999. 1 CD-ROM.

Graciani, S.D.; Novo, E.M.L.M. Determinação da Cobertura de Macrófitas Aquáticas em Reservatórios Tropicais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11, 2003, Belo Horizonte. Anais. São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos p. 2509-2516.

Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson, J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**. vol. 35, n.1, p. 11-27. 1991.

Mather, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 2. ed. Chinchester, John Wiley. 292pp. 1999.

Moura, M.A.L.; Meixner, F.X.; Trebs, I.; Lyra, R.F.F.; Andrae, M.O.; Filho M.F. Evidência observacional das brisas do lago de Balbina (Amazonas) e seus efeitos na concentração de ozônio. **Acta Amazônica**, vol. 34, n. 4, p. 605-611. 2004.

Slater, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading, MA, Addison-Wesley. 574 pp. 1980.