

Avaliação de imagem de abundância de vegetação para o monitoramento de indicadores de manejo florestal na Amazônia

André Luiz Silva Monteiro^{1,2}
Carlos Moreira de Souza Jr.¹
Christel Lingnau²

¹IMAZON – Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
Caixa Postal 5101, Ananindeua, Pará, 67.113-000, Brasil
{andreluiz, souzajr}@amazon.org.br

²UFPR – Universidade Federal do Paraná
Av. Lothário Meissner, 3400, Jardim Botânico
Curitiba, Paraná, 80210-170, Brasil
lingnau@floresta.ufpr.br

Abstract Several recent studies have demonstrated the potential of satellite images to monitor selective logging in the Amazon region. However, there is a lack of remote sensing studies to evaluate the quality of forest management practiced by logging activity. In this study, we carried out a temporal analysis of vegetation fraction images (Landsat ETM+), obtained through spectral mixture models, to evaluate and distinguish canopy disturbance due to Conventional Logging (CL) and Managed Logging (ML) in the region of Paragominas, NE Para, Brazil. The results showed that it is possible to distinguish CL from ML using vegetation fraction images because of the distinct canopy damage created by these two types of logging practices. This methodology can be used as environmental agencies in charge of monitoring selective logging in the Amazon and by institutes that provide forest certification.

Palavras chaves: sensoriamento remoto, modelo de mistura espectral, exploração madeireira, impacto no dossel, Amazônia, remote sensing, spectral mixing models, selective logging, canopy disturbance, Amazon.

1. Introdução

Estima-se que 47% da exploração de madeira praticada na Amazônia é predatória, o que causa severos impactos na floresta (Lentini, 2003). Estudos de campo têm mostrado que a exploração de madeira mecanizada extrai de 30 a 50 m³ de madeira em tora por hectare e reduz a cobertura total do dossel original de 80% para 45% em floresta ombrófila densa (Uhl & Vieira, 1989). Esta redução pode chegar a 39% quando a floresta é submetida à exploração de madeira seguida de intensa queimada (Gerwing, 2002). Dos 53% da madeira extraída legalmente na Amazônia, apenas 33% vem de planos de manejo (Ibama, 2001). Mas, há uma tendência de aumento do número de planos de manejo considerados aptos (Barreto & Souza Jr, 2001; Ibama, 2001). Além disso, apesar de representar apenas 3% do manejo na região, empresas florestais certificadas têm aumentado suas áreas devido ao crescimento da demanda por madeira certificada no mercado mundial. As áreas certificadas na Amazônia passaram de 400 mil hectares em 2003 para 1,3 milhão de hectares em 2004 (FSC, 2004).

A fiscalização e o monitoramento de planos de manejo, conduzido pelo Ibama (Ibama, 2001) é um dos grandes desafios para o futuro da exploração de madeira sustentável na Amazônia. Isto porque a fiscalização e o monitoramento são feitos através de vistorias de campo o que requer tempo.

Imagens de satélite têm sido uma ferramenta promissora para mapear aberturas no dossel e a infra-estrutura criada pela exploração madeireira (Souza Jr. & Barreto, 2000; Jackson et al. 2000;

Koukoulas & Blackburn, 2004) e podem ser úteis para monitorar planos de manejo, otimizando assim a sua fiscalização. Por exemplo, imagens de abundância de solo, vegetação e NPV (vegetação não-fotossintética), obtidas por modelos de mistura espectral, têm sido usadas para detectar pátios de estocagem de madeira – infra-estrutura criada pela exploração mecanizada (Souza Jr & Barreto, 2000; Monteiro et al. 2003); e para quantificar a degradação causada por esta atividade devido à exploração intensiva e entrada de fogo nas áreas exploradas (Souza Jr et al. 2003). Além disso, a identificação e o mapeamento de diferentes intensidades de exploração com imagens de satélite têm sido demonstrados - em particular, imagens de abundância de vegetação, obtidas com modelos de mistura espectral (Asner et. al. 2002; Souza Jr. et al. (submetido)). Neste estudo avaliamos o potencial de imagens de abundância de vegetação para distinguir exploração convencional da exploração manejada a partir do impacto no dossel. E, propomos uma metodologia para monitorar e identificar planos de manejo que não estão seguindo as prescrições aprovadas nos planos.

2. Área de estudo

O estudo foi conduzido em áreas de exploração convencional (EC) e exploração manejada (EM), na região de Paragominas, nordeste do Estado do Pará. Este sítio é coberto por floresta tropical densa de terra firme em terreno moderadamente ondulado de um planalto residual terciário. Os solos são do tipo Latossolo Amarelo e Argiloso, sendo também encontrados Plintossolos, Gleissolos e Neossolos. O clima caracteriza-se com uma estação seca no período de maio a outubro e chuvoso de novembro a abril, com média anual pluviométrica variando entre 1800 a 2000 mm, e temperatura média anual variando entre 24° e 26° C (Cikel, 2001; **figura 1**).

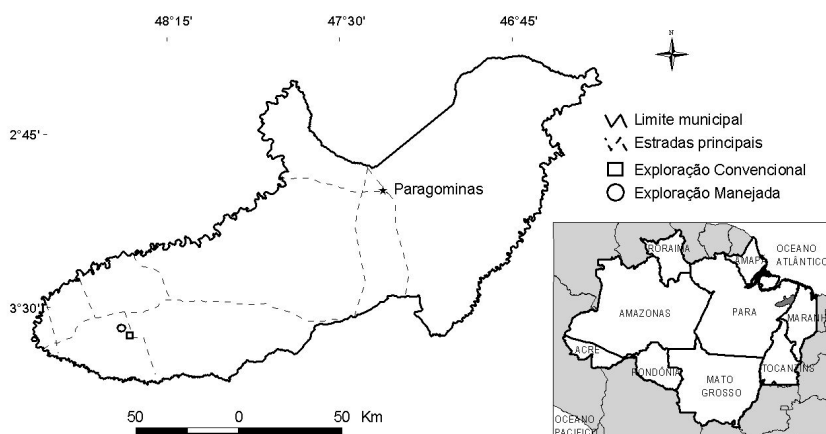


Figura 1. Localização da área de estudo

3. Metodologia

3.1. Quantificação dos impactos no dossel da floresta

Conduzimos trabalhos de campo em julho de 2004, aproximadamente 1 ano após a exploração, para avaliar os impactos no dossel nas áreas de EC e EM. Utilizamos nesta avaliação uma câmera digital (Kodak Coolpix, 5.4 Mega pixel de resolução), acoplada a uma lente “olho de peixe”.

Determinamos a abertura no dossel utilizando o programa Gap Light Analyzer[®] 2.0. Coletamos 28 fotos, aproximadamente a 1,5 m do solo no centro das clareiras abertas na floresta em decorrência da derrubada de árvores e da abertura de estradas e pátios de estocagem, para cada ambiente (EC e EM). Além disso, medimos a abertura no dossel de florestas intactas para comparação com as áreas exploradas. Coletamos também as coordenadas geográficas, com GPS (Garmin[®] 2 Plus), das áreas onde foram feitas as medições.

3.2. Pré-processamento das imagens

Utilizamos imagens Landsat ETM+, órbita/ponto 223/62, de julho de 2000, de agosto de 2001 e de setembro de 2002, adquiridas do Tropical Forest Information Center (TRFIC). As imagens foram registradas com base em uma imagem referência georeferenciada com RMS (Root Mean Square) menor que 1 pixel. As imagens foram submetidas à correção atmosférica e convertidas para reflectância utilizando o programa ACORN[®] 4.1. Os parâmetros de calibração radiométrica e da geometria de aquisição das imagens foram extraídos dos respectivos meta-arquivos das imagens.

3.3. Modelos de mistura espectral

Os modelos de mistura espectral foram aplicados às imagens Landsat. Primeiramente, pixels puros (endmembers) foram identificados nestas imagens com o algoritmo PPI (Pixel Purity Index) (Boardman et al, 1995). O resultado deste processamento foi analisado através da seleção dos “endmembers” que melhor representaram os elementos: sombra, solo, vegetação e NPV (vegetação não-fotossintética). A modelagem de mistura espectral foi determinada por:

$$DN_b = \sum F_i DN_{i,b} + \varepsilon_b \quad (\text{Eq. 1})$$

para:

$$\sum F_i = 1 \quad (\text{Eq. 2})$$

onde DN_b é o número digital da banda b ; F_i a abundância do “endmember” i ; $DN_{i,b}$ o número digital relativo do “endmember” i , na banda b ; e ε_b é o erro na banda b . A análise de mistura espectral utilizou o software ENVI[®] 4.0 para estimar as abundâncias de sombra, solo, vegetação, NPV e erro (RMS).

3.4. Análise temporal das imagens

Selecionamos aleatoriamente três polígonos de 36 ha (400 pixels) nas imagens de abundância de vegetação para as áreas de EM e EC. Em seguida, extraímos os valores dos pixels de cada um dos polígonos ($n = 1200$ pixels para cada tipo de exploração) das imagens de abundância adquiridas no ano da exploração, um ano antes da exploração (representando a condição de floresta intacta), e um ano depois da exploração (representando a regeneração após a exploração). Cada polígono é composto por um mosaico de ambientes (floresta, estradas, pátios e clareiras). Por último, computamos as estatísticas destas informações como média e desvio padrão e aplicado o teste de comparação múltipla de Duncan com taxa de erro de 0,05% para testar diferenças entre os tipos de exploração e diferenças temporais de cada tipo de exploração.

4. Resultados

A **figura 2** mostra exemplos de aberturas no dossel na floresta intacta, na EM e na EC, tomadas com câmera digital acoplada a lente “olho de peixe”. A abertura no dossel foi estatisticamente diferente entre os padrões estudados. A abertura média no dossel na EM foi 11% maior que na floresta intacta. Por outro lado, a abertura no dossel na EC foi 26% maior que na floresta intacta e o dobro da abertura da EM (**tabela 1**).

Tabela 1. Análise da abundância de vegetação e da abertura no dossel entre Floresta Intacta, Exploração Manejada (EM) e Exploração Convencional (EC) na região de Paragominas, Pará

	Floresta Intacta (n=28 ^a ; 6 ^b)	EM (n=28 ^a ; 3 ^b)	EC (n=28 ^a ; 3 ^b)
^a Abertura no dossel	0,04 (0,02)a	0,15 (0,04)c	0,30 (0,06)b
^b Abundância de vegetação	0,60 (0,02)a	0,54 (0,02)c	0,50 (0,02)b

Médias apresentadas com desvio padrão entre parênteses (DP). As letras diferentes indicam diferenças entre as idades da exploração com $p < 0,05$ utilizando o Teste de Duncan

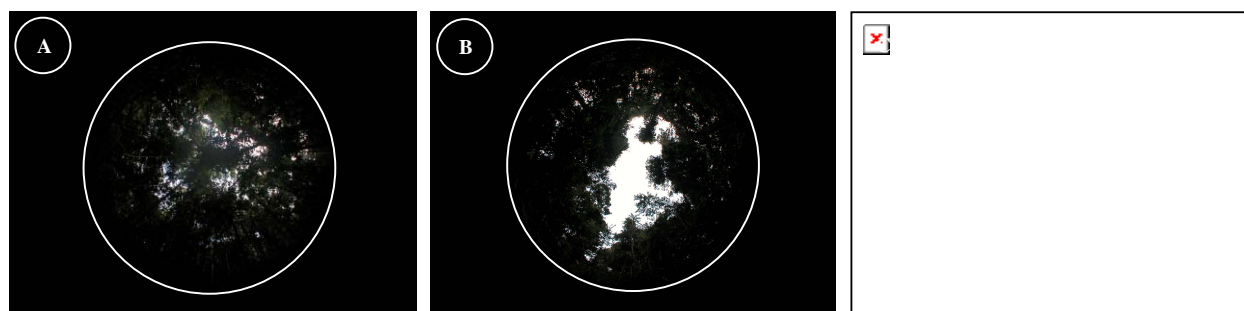


Figura 2. Exemplos de aberturas no dossel em clareiras, tomadas com câmera digital acoplada a lente “olho de peixe”, na Floresta Intacta (A), Exploração Manejada (B) e Exploração Convencional (C), na região de Paragominas, Pará

A análise estatística mostrou que a abundância de vegetação foi 10% significativamente menor na EC e 6% menor na EM comparado à floresta intacta. Quando comparamos a abundância de vegetação entre EC e EM, observamos diferença significativa em torno de 4% (**tabela 1**).

A análise temporal das imagens de abundância de vegetação mostrou uma significativa redução de 8% da abundância de vegetação, devido à exploração, na EC (33 m³/ha extraído) e de 7% na EM (32 m³/ha extraído). Após um ano da exploração, a abundância de vegetação aumentou significativamente 8% na EM. Por outro lado, este aumento foi de apenas 3% na EC. Comparando os resultados neste período, observamos que a redução da abundância de vegetação na EC (53%) continuou significativa quando comparada à floresta intacta (58%). Enquanto que na EM, não houve diferença de abundância em relação à floresta intacta (**tabela 2 e figura 3**).

Os histogramas normalizados para todos os 36 ha (400 pixels) de cada classe, mostram que a abundância média de vegetação foi de 63% para floresta intacta, 52% para EM e 48% para EC (**figura 4**). Tanto na EM como na EC a abundância de vegetação foi estatisticamente diferente em relação à floresta intacta (Teste de Duncan, $p < 0,05$). Dentre as três classes, apenas a floresta intacta apresentou uma distribuição da abundância de vegetação próxima a normal. As variações

da abundância de vegetação ocorreram largamente na EM (mínimo= 28% e máximo = 70%) e na EC (mínimo= 24% e máximo= 68%). Portanto, a porcentagem de pixels com abundância média de vegetação foi menor na EC devido as maiores aberturas no dossel nesta classe.

Tabela 2. Análise temporal da abundância de vegetação em Exploração Manejada (EM) e Exploração Convencional (EC) na região de Paragominas, Pará

Tipo de exploração	Volume explorado (m ³ /ha)	Idade da exploração		
		1 ano antes (n=3)	Exploração (n=3)	1 ano depois (n=3)
Manejada	32	0,61 (0,01)a	0,54 (0,02)b	0,61a
Convencional	33	0,58a	0,50 (0,02)b	0,53 (0,01)c

Médias apresentadas com desvio padrão entre parênteses (DP). As letras diferentes indicam diferenças entre as idades da exploração com $p < 0,05$ utilizando o Teste de Duncan

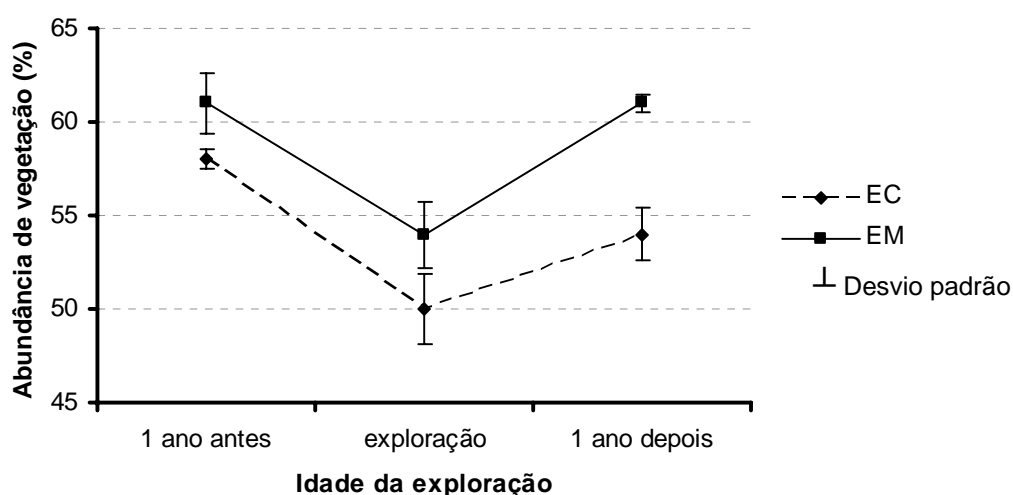


Figura 3. Análise temporal da abundância de vegetação em Exploração Manejada (EM) e Exploração Convencional (EC) na região de Paragominas, Pará

A significativa redução da abundância de vegetação na EC pode ser claramente observada na **figura 5**. Comparando as imagens de abundância de vegetação nos dois tipos de exploração, notamos uma tonalidade de verde mais escura na EC (**figura 5B**), caracterizado pelo maior impacto no dossel, devido à não aplicação de técnicas de manejo como planejamento de abertura de estradas, pátios de estocagem e trilhas de arraste, corte de cipós e derrubada direcional da árvore.

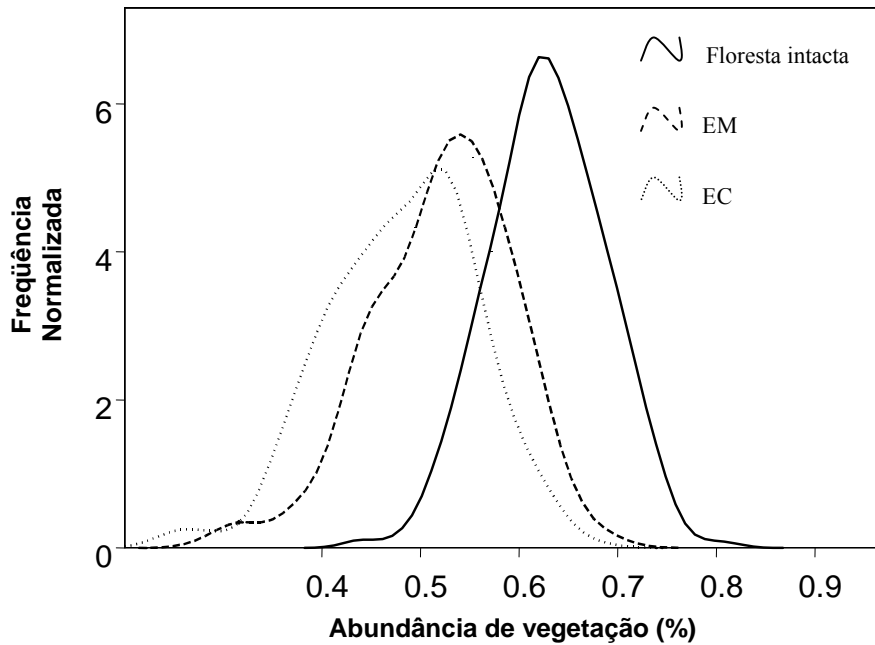


Figura 4. Histogramas das imagens de abundância de vegetação para Floresta Intacta, Exploração Manejada (EM) e Exploração Convencional (EC).

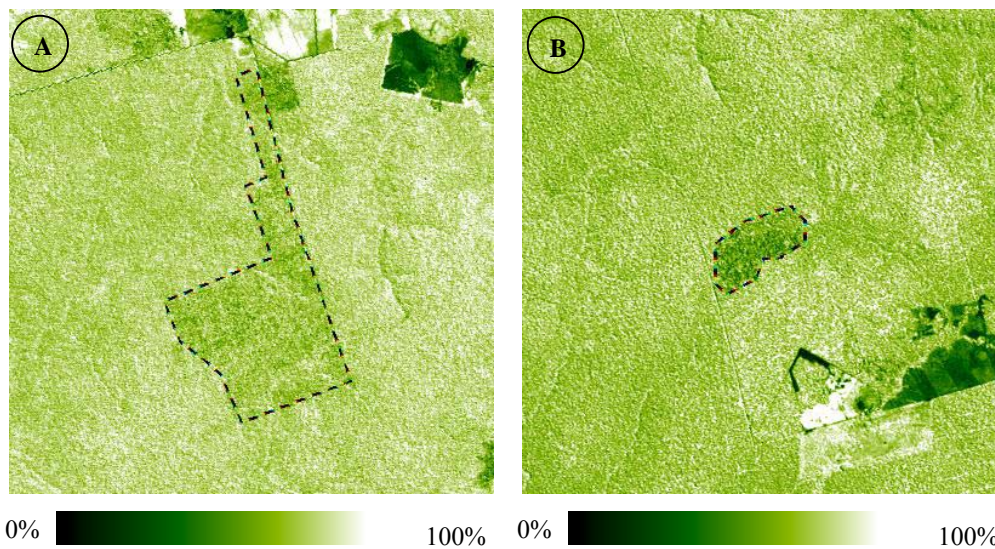


Figura 5. Comparação das imagens de abundância de vegetação em Exploração Manejada (A) e Exploração Convencional (B).

5. Fiscalização e Monitoramento de Planos de Manejo

A metodologia utilizada neste estudo tem grandes implicações para a fiscalização e monitoramento dos planos de manejo florestal em operação na Amazônia. Indicadores de manejo

monitorados em campo, como os relacionados à infra-estrutura – pátios e estradas – e o impacto no dossel poderiam ser monitorados remotamente através de imagens de satélite. Neste estudo, apresentamos um método para monitorar a abertura no dossel, capaz de identificar e distinguir manejo florestal da exploração predatória. Com isso, seria possível monitorar planos de manejo através da avaliação do indicador do impacto no dossel com imagens de satélite Landsat.

6. Conclusão

O presente estudo mostrou que é possível avaliar e distinguir os impactos no dossel pela exploração convencional (EC) e exploração manejada (EM) utilizando imagens de abundância de vegetação, obtidas através de modelos de mistura espectral. Esta avaliação mostrou que o impacto no dossel pela EC foi significativo mesmo 1 ano após a exploração, o que não foi ocorrido na EM devido à rápida regeneração neste padrão de exploração.

Imagens de abundância de vegetação poderiam ser usadas para avaliar os impactos da exploração no dossel como um indicador de manejo florestal, ou seja, se a exploração madeireira detectada pela imagem de satélite foi feita obedecendo às técnicas de manejo florestal, possibilitando direcionar a fiscalização de campo para estas áreas. Portanto, esta técnica poderia ser incorporada a programas de fiscalização e monitoramento anual da atividade madeireira na região amazônica pelas agências ambientais (i.e., OEMAS e Ibama). Além disso, empresas certificadoras florestais poderiam utilizar esta ferramenta nas avaliações de áreas a serem certificadas e no monitoramento anual das mesmas.

Agradecimentos

Agradecemos a Cikel Brasil Verde S.A. pelo apoio logístico e por ceder áreas de exploração manejada para este estudo, o apoio financeiro da Fundação Moore para o trabalho de campo, a Fundação FORD e a CAPES pelo apoio ao programa de mestrado de André Monteiro.

Referências

- ASNER, G. P., KELLER, M., PEREIRA, R., ZWEEDE, J. C. Remote sensing of selective logging in Amazonia Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM⁺, and textural analysis. **Remote Sensing of Environment**, 80, 483-496, 2002.
- BARRETO, P., & SOUZA Jr., CARLOS. Controle do desmatamento e da exploração de madeira na Amazônia: diagnóstico e sugestões. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Brasileiro de Recursos Naturais Renováveis. PPG7/Promanejo. **Relatório Técnico do Componente III**. Belém, PA. Novembro de 2001.
- BOARDMAN, J. W., KRUSE, F. A., & GREEN, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data: **In summaries**, FIFTH JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, JPL Publications 95-1, v.1, pp.23-26. Allen, E. (1990). "Government Development Policies and Deforestation in Brazil Amazon Region – Mahar, Dj. "Third World Quarterly 12(1):229-235, 1995.
- CIKEL BRASIL VERDE S.A. Avaliação de Certificação do Manejo Florestal das florestas naturais da Cikel Brasil Verde S.A. Fazenda Rio Capim – Paragominas, PA, Brasil. Scientific Certification Systems, Inc. 2001. 39p. **Relatório técnico**.

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL – FSC BRASIL. Brasil assume o primeiro lugar em área de florestas certificadas na América Latina. Disponível em: <<http://www.fsc.org.br>> Acesso em: novembro de 2004.

GERWING, J. J. Degradation of forests through logging and fire in the eastern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, 157, 131-141, 2002.

IBAMA. Manejo Florestal Sustentável na Amazônia. Projeto PNUD BRA 97/044. **Relatório técnico**. Brasília-DF, 2001.

JACKSON, R. G., FOODY, G. M., QUINE, C. P. Characterising windthrown gaps from fine spatial resolution remotely sensed data. **Forest Ecology and Management**, 135, 253-260, 2000.

KOUKOULAS, S., BLACKBURN, G. A. Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LIDAR imagery and GIS. **International Journal of Remote Sensing**, 15 (25), 3049-3071, 2004.

LENTINI, M., VERISSIMO, A., SOBRAL, L. **Fatos Florestais da Amazônia 2003**. Belém: Imazon 2003. 108p.

MONTEIRO, A. L., SOUZA Jr, C & BARRETO, P. Detection of logging in Amazonian transition forest using spectral mixture models. **International Journal of Remote Sensing**, 1 (24): 151-159, 2003.

SOUZA Jr., C. & BARRETO, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, 21, 173-179, 2000.

SOUZA Jr., C.; FIRESTONE, L.; MOREIRA, L.; ROBERTS, D. Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, 87, 494-506, 2003

SOUZA Jr., C., ROBERTS, D., MONTEIRO, A. (Submetido). Multitemporal Analysis of Degraded Forests in the Southern Brazilian Amazon. Earth Interaction LBA Special Issue.

UHL, C. & VIEIRA, I. C. G. Ecological impacts of selective logging in the Brazilian Amazon: a case study from the Paragominas region of the State of Para. **Biotropica**, 21(1):98-106, 1989.