

Avanços do sensoriamento remoto para o monitoramento da exploração madeireira na Amazônia

Carlos Moreira de Souza Júnior¹

¹Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – Imazon
Caixa Postal 5101 – 66613-397 – Belém – PA, Brasil
souzajr@imazon.org.br

Abstract. This paper presents the advances in remote sensing to monitor selective logging in the Brazilian Amazon. A literature review of the remote sensing techniques to detect, map and estimate biophysical properties of logged forests was conducted, aiming to compare the advantage and limitations of the available techniques and discuss their applications to monitor the Brazilian Amazon forests. Despite tremendous advances, there are still challenges to overcome: logging in *varzea* forests were not studied using remote sensing; the available techniques were not rigorously compared; other sensors were not evaluated, including radar systems; and lastly, there are confusion among the techniques about what is being detected and mapped. This review highlights how to best use remote sensing technology and shows that, despite the existing limitations, remote sensing is an indispensable tool for monitoring selective logging, in particular when combined with forest management boundaries and attribute information of the management plans.

Palavras-chave: Selective logging, Amazon, forest concession, exploração madeireira, Amazônia, concessão florestal

1. Introdução

O desmatamento e seus impactos associados não são as únicas ameaças à integridade das florestas da Amazônia. A partir da década de 1990 extensas áreas de floresta têm sido anualmente empobrecidas pela degradação causada pela atividade madeireira (Nepstad et al., 1999), queimadas (Cochrane et al., 1999) e fragmentação (Laurance et al., 2000). Ao contrário do desmatamento que remove por completo a floresta, a degradação florestal afeta parcialmente a sua estrutura e a composição. A atividade madeireira é uma das principais causas da degradação florestal levando à redução dos estoques de biomassa e de espécies de valor comercial (Cochrane e Schulze, 1999; Gerwing e Farias, 2000), condições favoráveis para o desenvolvimento de cipós (Vidal et al., 1997) e a um ambiente propício às queimadas (Holdsworth e Uhl, 1997), além de aumentar o risco de extinção local de espécies nativas (Martini et al., 1994).

A exploração madeireira se praticada com técnicas de manejo florestal pode ser uma grande aliada no combate ao desmatamento. A atividade também contribui fortemente com a geração de empregos e renda. Mais de 3.000 empresas madeireiras estão operando na Amazônia, concentradas em 82 pólos de produção madeireira. Os pólos são regiões que produzem mais de 100 mil metros cúbicos por ano (Lentini et al., 2005).

As primeiras estimativas da área afetada pela atividade madeireira foram feitas a partir de dados de volume de madeira explorada obtidos em levantamentos sócio-econômicos (Nepstad et al., 1999). Uma área de 10 a 15 mil quilômetros quadrados de florestas foi estimada para o ano de 1996. As primeiras estimativas obtidas com imagens Landsat divergiram fortemente entre si e entre as estimativas geradas a partir dos dados de volume de madeira explorada. Por exemplo, Santos et al. (2001) estimaram, usando imagens Landsat, que a área afetada pela atividade madeireira na Amazônia em 1992 e 1996 foi de 1.000 quilômetros quadrados e de 1.571 quilômetros quadrados, respectivamente. Matricardi et al. (2001) obtiveram estimativas significativamente diferentes para estes anos: 5.627 quilômetros quadrados para 1992 e 9.449 quilômetros quadrados para 1996. Recentemente, Asner et al., (2005) chegaram a áreas que variaram de 12 a 20 mil quilômetros quadrados por ano, para o período de 1999 a 2002.

As diferenças nas estimativas obtidas com imagens Landsat da área afetada pela atividade madeireira estão associadas às diferentes metodologias, escalas e frequência temporal utilizadas no mapeamento. Esses métodos também diferem em termos dos seus objetivos de mapeamento, ou seja, não foram desenhados para detectar e mapear as mesmas feições da exploração madeireira. Além das metodologias aplicadas nos estudos acima, outros métodos foram recentemente desenvolvidos e validados em áreas menores na Amazônia, utilizando imagens Landsat e outros tipos de sensores (SPOT, IKONOS).

Neste artigo, são apresentados os avanços do sensoriamento remoto para o monitoramento da exploração madeireira na Amazônia. Os objetivos específicos do estudo são: i) revisar os métodos existentes para a detecção e mapeamento dos impactos da exploração madeireira na Amazônia; ii) comparar as vantagens e desvantagens desses métodos; e iii) discutir o potencial dos diferentes sensores para o monitoramento da exploração madeireira.

2. A Exploração Madeireira na Amazônia

Há vários padrões de exploração madeireira na Amazônia. Estes padrões são definidos com base nos tipos de ambientes explorados (i.e., florestas de várzea ou de terra firme), e na forma e intensidade da exploração (**Tabela 1**). Reconhecer estes padrões é de grande importância para o sucesso da detecção e mapeamento da atividade madeireira por satélite. A **Tabela 1** apresenta um resumo desses padrões.

Tabela 1. Tipos de exploração e impactos causados pela exploração madeireira e fogo.

Classe	Descrição
Floresta Intacta	Floresta madura que não foi explorada para fins madeireiros.
Exploração não-mecanizada	Exploração altamente seletiva; não utilize veículos, tratores e caminhões para exploração. Pátios de exploração, estradas e ramais de arraste não são construídos. O uso de animais para transportar toras é comum. Os impactos não são visíveis em imagens de satélite de resolução espacial moderada (pixel com 10-30 m).
Exploração manejada	Exploração planejada para extração seletiva de madeira, baseada em inventários florestais prévios e construção organizada de estradas, pátios e ramais de extração, visando à redução dos danos na floresta. Os impactos nas florestas não aparecem de forma pronunciada nas imagens de satélite de resolução espacial moderada.
Exploração convencional	Extração madeireira sem planejamento para construção de estradas, pátios e ramais e extração de madeira. Os impactos são facilmente identificados nas imagens de satélite de resolução espacial moderada.
Exploração e queimada	Área de exploração madeireira que sofre subsequente ação de queimadas não intencionais. Os impactos causados por essa sinergia são muito altos, sendo, portanto, facilmente identificado nas imagens de satélite de resolução moderada.

3. Sensoriamento Remoto da Exploração Madeireira

3.1. Detecção da Exploração Madeireira por Satélite

A detecção refere-se à capacidade dos sensores orbitais em distinguir alvos, padrões ou objetos específicos, com base em suas características espectrais e/ou espaciais. A detecção da exploração madeireira é difícil porque se trata de um padrão de uso da terra que gera um mosaico complexo de ambientes formados por diferentes tipos de materiais, com arranjo espacial variado (Souza Júnior et al., 2003). São encontradas nas florestas exploradas áreas com solos expostos devido a pequenos desmatamentos para a construção de pátios de estocagem e estradas; clareiras no dossel da floresta causada pela queda de árvores e movimentação de máquinas; além de remanescentes florestais não danificados (Uhl e Vieira, 1989) (**Figura 1**).

Os ambientes da área explorada são facilmente detectados em imagens de alta resolução espacial (pixel de 1-4 m) (**Figura 1**). Técnicas de fusão de imagem Ikonos pancromática (1 m) com imagens multi-espectrais (4 m) foram usadas para realçar e identificar estradas, clareiras e aberturas no dossel de florestas exploradas (Souza Júnior e Roberts, 2005). As imagens Ikonos, pancromáticas e multi-espectrais, também foram usadas individualmente para detectar os impactos da exploração madeireira, não sendo possível detectar apenas os ramais de arraste de toras (Read et al., 2003).

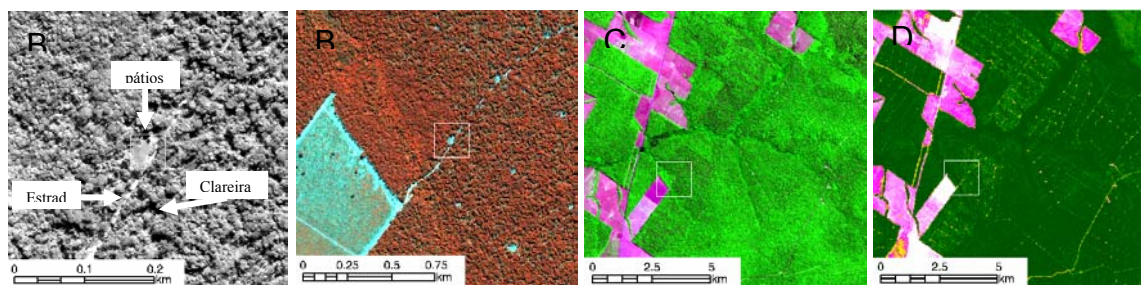


Figura 1. Exploração madeireira em imagens de satélites: (A) Ikonos pancromática (1 m de resolução espacial); (B) Ikonos multi-espectral (4 m); (C) Landsat multi-espectral (R5, G4, B3; 30 m); e (D) NDFI (sub-pixel).

A detecção em imagens de resolução espacial moderada (pixel de ~30 m) da exploração madeireira é mais difícil (**Figura 1**). Técnicas de realce, como filtros de textura (Asner, et al., 2002) e índices espectrais (Souza Júnior et al., 2005a) foram avaliadas e não geraram resultados satisfatórios. Os resultados mais promissores para imagens multi-espectrais SPOT (20 m) e Landsat (30 m) foram obtidos com modelos de mistura de espectral (MME). Souza Júnior e Barreto (2000) foram os pioneiros a demonstrar a aplicação destas técnicas para realçar a infra-estrutura criada pela exploração madeireira (pátios e estradas). Asner et al. (2004a) usaram imagem fração vegetação para detectar clareiras associadas à exploração madeireira. A imagem fração NPV (Vegetação Não-Fotossintética, do inglês, *Non-Photosynthetic Vegetation*), obtida com imagem SPOT 4, foi eficaz para detectar a degradação florestal causada pela exploração madeireira (Souza Júnior et al., 2003).

A combinação de imagens fração Vegetação, Solos e NPV levou a amplificação do sinal da degradação causada pela exploração madeireira através de um novo índice espectral, denominado NDFI (do inglês *Normalized Difference Fraction Index* – Índice de Diferença Normalizada de Frações) (Souza Júnior et al., 2005b). O NDFI é calculado pela equação abaixo:

$$\text{NDFI} = \text{VGs} - (\text{NPV} + \text{Solo}) / (\text{VGs} + \text{NPV} + \text{Solo})$$

onde VGs é a imagem fração vegetação normalizada para sombra dada por $\text{VGs} = \text{VG} / (1 - \text{Sombra})$, e VG é a fração vegetação.

Testes estatísticos revelaram que a imagem NDFI é mais robusta para detectar exploração madeireira do que as imagens de reflectância, índices de vegetação e as frações (Souza Júnior et al. 2005b), inclusive com capacidade para distinguir exploração manejada de não manejada (**Figura 2**). Por último, vários estudos demonstraram que a exploração madeireira em imagens de resolução espacial moderada só pode ser detectada até um ano depois dos distúrbios (Stone e Lefebvre, 1998; Asner et al., 2004b; Asner et al., 2004b), mesmo com as imagens NDFI (Souza Júnior et al., 2005b).

3.2. Mapeamento da Exploração Madeireira por Satélite

Watrin e Rocha (1992), pesquisadores da Embrapa-CPATU, foram os pioneiros no mapeamento da exploração madeireira por satélite na Amazônia. O mapeamento foi feito

através de interpretação visual de imagens analógicas das bandas 4 e 5 do Landsat TM5. O estudo foi conduzido em 1988, na escala 1:100.000, no município de Paragominas, estado do Pará. Esses autores usaram a presença de pátios e estradas de exploração como critério para identificação da exploração madeireira, mas não apresentam os critérios para a definição do perímetro da exploração. Stone e Lefebvre (1998) também usaram interpretação visual para mapear exploração madeireira na região de Paragominas, para os anos de 1986 e 1991. Santos et al. (2001) conduziram interpretação visual, utilizando composição colorida de imagens Landsat (R5, G4, B3) na escala 1:250.000, para mapear a exploração madeireira em toda a Amazônia, apontando uma área anual média afetada pela atividade madeireira de 1.580 km²/ano, no período de 1988 a 1998.

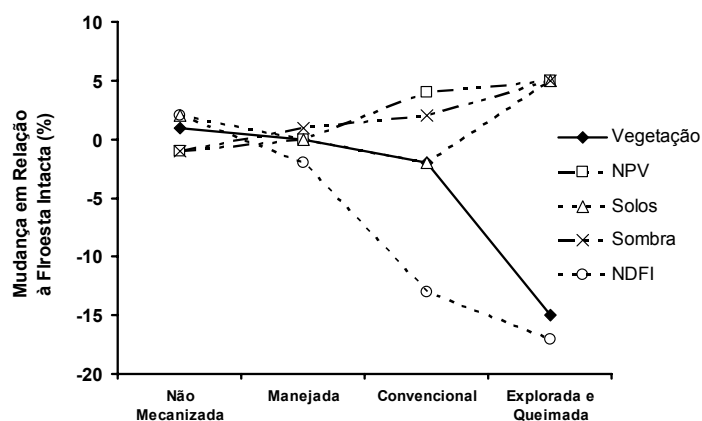


Figura 2. Variação na diferença dos valores médios entre floresta intacta (antes da exploração) e florestas que sofreram diferentes intensidades de exploração em um período de um ano, para fração Vegetação, NPV, Solos e Sombra, e de NDFI, na região de Sinop-MT. O NDFI respondeu melhor para detecção da exploração manejada, convencional e em áreas exploradas que sofreram queimadas (adaptado de Souza Júnior et al., 2005b).

Apesar de ser possível detectar visualmente a exploração madeireira em imagens de composição colorida, a definição dos limites da área explorada não é tão clara. Nenhum dos estudos que utilizou esta técnica de mapeamento definiu critérios rigorosos e replicáveis para o mapeamento de áreas de exploração madeireira através de interpretação visual.

A necessidade de mapeamento rápido e replicável em áreas extensas levou vários pesquisadores a desenvolver técnicas de processamento digital de imagem para mapear a exploração madeireira. O primeiro estudo utilizou um procedimento simples de detecção e extração de pátios de estocagem de imagem fração solo, seguida da aplicação de *buffers* definidos pelo raio médio de extração de árvores a partir dos pátios (Souza Júnior e Barreto, 2000; Monteiro et al., 2003). O método de pátios+*buffers* estima a área explorada a qual integra as áreas de clareiras, estradas, pátios e de florestas não danificadas. Essa técnica foi empregada por Matricardi et al. (2001) em combinação com interpretação visual para estimar a área afetada pela exploração madeireira em toda a Amazônia. O problema desse método é que a área gerada pelos *buffers* apresenta contorno circular (Souza Júnior e Barreto, 2000), ou retangular (Monteiro et al., 2003), o que não correspondem em grande parte à forma real da área explorada. Espírito-Santo et al. (2004) utilizaram álgebra *booleana* foram aplicados para detectar exploração madeireira associada a rios e à estradas.

O método de crescimento de regiões a partir de pátios foi proposto por Graça et al. (2005) para superar as limitações dos métodos discutidos acima. Essa técnica foi testada localmente (Sinop-MT) com sucesso e é bastante promissora para ser aplicada na escala da Amazônia. Classificadores que utilizam árvores de decisão, aplicadas à imagem fração, foram também

desenvolvidos como alternativa (Souza Júnior et al., 2003). Esta técnica detecta apenas a área impactada pela atividade madeireira (clareiras e pequenos desmatamentos para pátios e estradas), ou seja, detectam uma área menor do que a área total explorada.

Duas novas técnicas promissoras foram desenvolvidas e validadas recentemente para o monitoramento da exploração madeireira. A primeira, denominada CLAS (*Carnegie Landsat Analysis System*), foi aplicada com sucesso para a grande totalidade das áreas sobre influência da exploração madeireira na Amazônia (Asner et al., 2005). O algoritmo de detecção e mapeamento de exploração madeireira do CLAS utiliza técnicas de correção atmosférica; decomposição do pixel por MME baseado em simulação de Monte Carlo; máscaras de desmatamento (Prodes, INPE) e nuvem; e técnicas de reconhecimento de padrões de distúrbios florestais. Os padrões de distúrbios de exploração madeireira do CLAS são detectados em imagens diferença de frações (Vegetação, Solos e NPV) com no máximo um ano entre as datas de aquisição. As áreas de exploração apresentam redução nas frações de Vegetação e aumento em NPV. Os pátios também são detectados pelo CLAS e combinados com as áreas de distúrbio em um algoritmo baseado em janelas móveis hierárquicas (*kernels* de 7x7 e 3x3 pixels) para integrar e delinear a área afetada pela atividade madeireira, com base numa lista de 16 regras definida por valores de limiares aplicados às frações. O mapeamento é finalizado após inspeção visual, onde os erros de classificação são corrigidos. A detecção da exploração madeireira (área total) com o CLAS tem a limitação de necessitar de supercomputadores para o processamento das imagens. Além disso, depende de imagens MODIS para a correção atmosférica e de pares de imagens Landsat ETM+ para a detecção da exploração.

A segunda técnica utiliza um algoritmo de classificação contextual (CCA, do inglês, *Contextual Classification Algorithm*) para a detecção da área de impacto da exploração madeireira (aberturas no dossel da floresta e clareiras geradas por pátios e estradas) (Souza Júnior et al., 2005b). O CCA utiliza as imagens NDFI para mapear as áreas de danos da exploração madeireira. Primeiramente, pátios são detectados usando o algoritmo proposto por Souza Jr, e Barreto (2000). Os pátios servem como pontos de referência para crescer regiões da floresta que sofreram danos no dossel causados por quedas de árvores e os pequenos desmatamentos para pátios e estradas. Valores de NDFI, em áreas de florestas, menores que 0.75 são classificados como danos; as regiões de danos crescem até que todos os pixels vizinhos sejam classificados como floresta intacta (i.e., sem dano de exploração). O CCA tem a vantagem de não necessitar de pares de imagens para detectar os danos da exploração madeireira, porque utiliza a imagem NDFI, mais robusta que as frações individuais (Souza Júnior et al., 2005b). Além disso, o padrão espacial detectado pela combinação do NDFI+CCA pode ser usado para separar exploração madeireira de florestas queimadas. A combinação do NDFI com o CCA detecta apenas as áreas de danos e ainda não foi aplicada em toda a Amazônia. Um novo algoritmo baseado na definição do *Convexo de Hull* da área de danos detectada pelo NDFI+CCA está sendo desenvolvido para superar esse problema.

3.3. Estimativa de propriedades biofísicas de florestas exploradas

Há poucos estudos que usaram o sensoriamento remoto para estimar propriedades biofísicas de florestas exploradas pela atividade madeireira na Amazônia. As propriedades avaliadas incluem a proporção de abertura no dossel, intensidade de exploração e perda de biomassa acima do solo.

A proporção de abertura no dossel foi utilizada como indicador de danos causados pela exploração madeireira (Asner et al., 2002). Esta propriedade biofísica é definida como a proporção do hemisfério, em relação a um determinado ponto no interior da floresta, que possui visão direta do céu. Portanto, quando maior os danos no dossel devido à exploração

madeira, maior a proporção de aberturas no dossel. Medidas de abertura no dossel foram feitas em vários tipos de ambientes de exploração e correlacionadas com imagens fração de vegetação. Pátios apresentaram as maiores proporções de abertura no dossel, em áreas de exploração convencional e manejada, alcançando >97% e 73%, respectivamente. As estradas geraram aberturas no dossel de 43-72% em exploração convencional e de 22-39% em área manejada. As áreas de arraste apresentaram menores proporções de abertura no dossel nos dois tipos de exploração (9-44%); e as áreas de queda de árvores aberturas de 4-29% (Asner, et al., 2002). Imagens Landsat calibradas e de textura não apresentaram boa correlação com as aberturas no dossel. Medidas indiretas da proporção de abertura no dossel foram obtidas com imagem fração vegetação derivadas de modelos de mistura espectral (Asner et al., 2006).

A melhor resposta da estimativa da intensidade da exploração madeira também foi obtida com imagem fração derivadas de MME. Quatro tipos de intensidade [de degradação] foram estudados: exploração não mecanizada ou tradicional; exploração manejada, exploração convencional; e exploração seguida de queimada Souza Jr et al (2005a). Souza Júnior et al. (2003) demonstraram que a fração NPV responde estatisticamente de forma satisfatória à biomassa florestal acima do solo perdida pela exploração. Quanto maior a intensidade de exploração, maior o percentual de NPV e maior a perda de biomassa. Por último, Asner, et al. (2005) fizeram a primeira estimativa do fluxo de carbono associado à exploração madeira na Amazônia com base na área explorada, danos e volume extraído, resultando em ~0.1 bilhão de toneladas métricas de carbono emitida para atmosfera por ano.

6. Discussão e Conclusão

Várias técnicas de sensoriamento remoto foram desenvolvidas e testadas para a detecção e mapeamento dos impactos da exploração madeira na Amazônia. Os sensores de resolução espacial moderada apresentam a melhor relação custo-benefício para o monitoramento da exploração madeira por satélite. Os sensores de alta resolução espacial são as melhores opções para detectar com precisão os diversos tipos de ambientes da exploração madeira, mas o custo das imagens é ainda proibitivo para o seu uso operacional na Amazônia. E não há técnicas automáticas desenvolvidas para mapear a exploração madeira com este tipo de dados.

As técnicas de mapeamento disponíveis, para os sensores multi-espectrais de resolução espacial moderada, detectam e mapeiam áreas distintas. O primeiro grupo de técnicas foi desenvolvido para mapear a área explorada total, integrando as áreas de florestas que sofreram distúrbios (pátios, estradas, áreas de queda de árvores) e remanescentes florestais que não sofreram impactos. As técnicas de detecção de pátios+*buffers*, de interpretação visual, de crescimento de regiões e o CLAS foram desenvolvidas para esse propósito. O outro grupo de técnicas foi desenvolvido para detectar a área do dossel da floresta impactado pela exploração, incluindo NDFI+CCA e árvores de decisão.

Apesar dos avanços, há várias lacunas que precisam ser preenchidas na área de sensoriamento remoto da exploração madeira. Primeiro, a exploração madeira em área de várzea não foi investigada a luz do sensoriamento remoto. A exploração neste tipo de ambiente afeta extensas áreas (Lentini et al., 2005) e gera impactos ambientais significativos (Barros e Uhl, 1995). Segundo, as técnicas desenvolvidas não foram rigorosamente comparadas. Terceiro, outros sensores que operam nas faixas do visível e do infravermelho próximo (i.e., CBERS-CCD, Aster, Alos) ainda não foram testados e validados. Quarto, apenas um estudo reconheceu a necessidade de tratar de forma independente as áreas exploradas daquelas que foram exploradas e queimadas (Souza et al., 2005b). Os impactos em áreas de exploração que foram queimadas são mais significativos, sendo, portanto, importante separá-los para não superestimar a área explorada. Por último, imagens da faixa espectral do

microondas precisam também ser avaliadas, com poucos exemplos na literatura que incluem a exploração madeireira com classe de uso, mas não sendo o seu objeto de estudo principal (Angelis et al, 2002).

O cruzamento de imagens de satélite com limites de planos de manejo é uma abordagem promissora para o monitoramento e controle desta atividade. É possível, por exemplo, avaliar se um plano de manejo está ou não sendo conduzido de forma a reduzir os impactos da exploração. Por exemplo, nos planos cujos limites apresentam alta densidade de estradas, pátio e ou aberturas no dossel, é possível inferir remotamente, com alto grau de confiabilidade, se os planos de manejo estão sendo respeitados ou não. Esta abordagem já foi testada com sucesso na Amazônia (Monteiro et al., 2005). Portanto, o sensoriamento remoto será fundamental para o controle das concessões florestais na Amazônia.

Agradecimentos

Esta revisão, e os demais estudos de Souza Júnior discutidos neste artigo, receberam apoio da Fundação Gordon e Betty Moore e da USAID-Brasil.

Referências

- Angelis, C. F.; Freitas, C. C.; Valeriano, D. M.; Dutra, L. V. Multitemporal analysis of land use/land cover JERS-1 backscatter in the Brazilian tropical rainforest. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 7, p. 1231-1240, 2002.
- 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**, v. 80, n. 3, p. 483-496, 2002.
- Asner, G. P.; Keller, M.; Pereira, R.; Zweede, J. C.; Silva, J. N. M. Canopy damage and recovery after selective logging in Amazonia: Field and satellite studies. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. S280-S298, 2004a.
- Asner, G. P.; Keller, M.; Silva, J. N. M. Spatial and temporal dynamics of forest canopy gaps following selective logging in the eastern Amazon. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 765-783, 2004b.
- Asner, G. P.; Knapp, D. E.; Broadbent, E. N.; Oliveira, P. J. C.; Keller, M.; Silva, J. N. Selective logging in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 310, n. 5747, p. 480-482, 2005.
- Barros, A. C.; Uhl, C. Logging Along the Amazon River and Estuary - Patterns, Problems and Potential. **Forest Ecology and Management**, v. 77, n. 1-3, p. 87-105, 1995.
- Cochrane, M. A. e Schulze, M. D. Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: Effects on forest structure, biomass, and species composition. **Biotropica**, v. 31, n. 1, p. 2-16, 1999.
- Cochrane, M. A.; Alencar, A.; Schulze, M. D.; Souza, C. M.; Nepstad, D. C.; Lefebvre, P. e Davidson, E. A. Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. **Science**, v. 284, n. 5421, p. 1832-1835, 1999.
- Graça, P. M. L. A.; Santos, J. R.; Soares, J. V.; Souza, P. E. U. Desenvolvimento metodológico para detecção e mapeamento de áreas florestais sob exploração madeireira: estudo de caso, região norte do Mato Grosso, In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. Artigos, p. 1555-1562. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.16.13.56/doc/1555.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2001.
- Gerwing, J. J. e Farias, D. L. Integrating liana abundance and forest stature into an estimate of total aboveground biomass for an eastern Amazonian forest. **Journal of Tropical Ecology**, v. 16, n. 3, p. 327-335, 2000.
- Holdsworth, A. R.; Uhl, C. Fire in Amazonian selectively logged rain forest and the potential for fire reduction. **Ecological Applications**, v. 7, n. 2, p. 713-725, 1997.
- Laurance, W. F.; Vasconcelos, H. L.; Lovejoy, T. E. Forest loss and fragmentation in the Amazon: implications for wildlife conservation. **Oryx**, v. 34, n. 1, p. 39-45, 2000.
- Lentini, M., Pereira, D., Celentano, D., Pereira, R., **Fatos florestais da Amazônia**. Belém: Imazon, 2005. 141 p

- Martini, A., Rosa, N., Uhl, C. An attempt to predict which Amazonian tree species may be threatened by logging activities. **Environmental Conservation**, v. 21, n. 2, p. 152-162, 1994.
- Matricardi, E. A. T., Skole, D. L., Chomentowski, M. A., Cochrane, M. A. **Multi-temporal detection of selective logging in the Amazon using remote sensing**. East Lansing, Special Report BRSRI Research Advances –Tropical Forest Information Center, Michigan State University Nº. RA03-01\w, 27p. 2001
- Monteiro, A. L.; Souza Júnior, C. M.; Barreto, P. Detection of logging in Amazonian transition forests using spectral mixture models. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 1, p. 151-159, 2003.
- Monteiro, A. L. **Monitoramento de indicadores de manejo florestal na Amazônia Legal utilizando sensoriamento remoto**. 2005. 110p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2005.
- Nepstad, D. C.; Verissimo, A.; Alencar, A.; Nobre, C.; Lima, E.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P.; Potter, C.; Moutinho, P.; Mendoza, E.; Cochrane, M.; Brooks, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6727, p. 505-508, 1999.
- Read, J. M.; Clark, D. B.; Venticinque, E. M.; Moreira, M. P. Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. **Journal of Applied Ecology**, v. 40, n. 3, p. 592-600, 2003.
- Santos, J. R.; Krug, T.; Araujo, L. S.; Meira Filho, L. G.; Almeida, C. A. Dados multitemporais TM/Landsat aplicados ao estudo da dinâmica de exploração madeireira na Amazônia In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2001. Foz do Iguaçu, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 1751-1755. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00016-1. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.10.35/doc/1751.1755.264.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2006.
- Souza Júnior, C.; Barreto, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 1, p. 173-179, 2000.
- Souza Júnior, C.; Firestone, L.; Silva, L. M.; Roberts, D. Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 494-506, 2003.
- Souza Júnior, C. M.; Roberts, D. Mapping forest degradation in the Amazon region with Ikonos images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 3, p. 425-429, 2005.
- Souza Júnior, C. M.; Roberts, D.; Monteiro, A. Multitemporal Analysis of Degraded Forests in the Southern Brazilian Amazon. **Earth Interactions**, v. 9, n. 19, p. 1-25, 2005a.
- Souza, Júnior, Carlos M.; Roberts, D. A. e Cochrane, M. A. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n.2-3, p. 329-343, 2005b.
- Stone, S. W. Using a geographic information system for applied policy analysis: the case of logging in the Eastern Amazon. **Ecological Economics**, v. 27, n. 1, p. 43-61, 1998.
- Stone, T. A.; Lefebvre, P. Using multi-temporal satellite data to evaluate selective logging in Para, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 13, p. 2517-2526, 1998.
- 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**, v. 21, n. 2, p. 98-106, 1989.
- Vidal, O.; Barlow, J.; Hurtado, L. A.; Torre, J.; Cendon, P. e Ojeda, Z. Distribution and abundance of the Amazon river dolphin (*Inia geoffrensis*) and the tucuxi (*Sotalia fluviatilis*) in the Upper Amazon river. **Marine Mammal Science**, v. 13, n. 3, p. 427-445, 1997.
- Watrin, O. S., Rocha, A. M. A.. Levantamento da vegetação natural e do uso da terra no Município de Paragominas (PA) utilizando imagens TM/Landsat. Belém, Boletim de Pesquisa, n.124, 1992, 40p. (EMBRAPA/CPATU).