

Detecção de corte seletivo de madeira por técnica de rotação radiométrica na floresta amazônica

Detecting selective logging using radiometric rotation techniques in the amazon forest

Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça¹
Francisco Dario Maldonado²
João Roberto dos Santos³
João Viane Soares⁴

Resumo

Este estudo teve por objetivo desenvolver uma metodologia para detectar a exploração seletiva de madeira na Amazônia. Para alcançar este objetivo utilizou-se a técnica de detecção de mudanças baseada na rotação radiométrica controlada por eixo de não mudança (RCEN) acoplada a um classificador temático probabilístico. Esta técnica tem como vantagem dispensar a necessidade de correções radiométricas prévias para as imagens analisadas. Os resultados encontrados revelam que as áreas de florestas afetadas pela extração madeireira ultrapassaram a extensão das áreas de florestas convertidas para fins agrícolas na região de Cláudia, Mato Grosso. O desempenho do mapeamento da atividade madeireira foi satisfatório, apresentando um Kappa condicional de 0,72. Esforços futuros para o aprimoramento de um sistema operacional automatizado utilizando esta técnica serão envidados

Palavras-chave: sensoriamento remoto; detecção de mudanças; rotação radiométrica; exploração madeireira.

1 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Av. André Araújo, 2936, 69011-970 - Manaus-AM, Brasil; e-mail: pmlag@inpa.gov.br

2 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Av. André Araújo, 2936, 69011-970 - Manaus-AM, Brasil; e-mail: maldonado@inpa.gov.br

3 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil; e-mail: jroberto@dsr.inpe.br

4 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil; e-mail: viane@dsr.inpe.br

Abstract

The purpose of this study was to develop a methodology for detecting selective logging in the Amazon. To achieve this objective we used a change detection technique based on radiometric rotation controlled by the no-change axis (RCEN) coupled with a probabilistic thematic classifier. The advantage of this technique that is dispenses with radiometric corrections prior to the images analysis. The results show that Claudia, in the state of Mato Grosso. The performance of the method of mapping for logging activity was satisfactory, with a conditional *Kappa* value of 0.72. Future efforts to develop a system for automated operational detection using this technique will be undertaken.

Key words: remote sensing; change detection; radiometric rotation; selective logging.

Introdução

O corte seletivo de madeira na Amazônia é uma atividade econômica que tem se expandido rapidamente nas últimas décadas, principalmente, como consequência da melhoria da infraestrutura viária e a demanda crescente por madeira no mercado interno (BARROS e VERÍSSIMO, 2002). O manejo inadequado dos recursos florestais pode levar à redução dos estoques de biomassa e de espécies de valor comercial, aumentar a susceptibilidade da floresta a incêndios, além de aumentar o risco de extinção local de espécies nativas de alto valor comercial (UHL e KAUFFMAN, 1990; JOHNS et al., 1996; JONHS, 1997; NEPSTAD et al., 1999). Além da exploração seletiva de madeira predatória levar ao empobrecimento das florestas amazônicas, esta atividade é considerada um vetor potencial ao corte raso da floresta.

O monitoramento da atividade madeireira por satélite na Amazônia é

uma peça central para a conservação dos recursos florestais permitindo detectar áreas onde esta atividade ocorre de forma ilegal e com alto impacto ambiental. A recente criação da Lei nº 11.284/06 de Gestão de Florestas Públicas, que regulamenta o manejo florestal em terras da União a partir de uma política de concessões de uso, também, reforça a necessidade de um monitoramento específico desta atividade para a prática de uma produção florestal sustentável. Porém, o mapeamento desta atividade por imagens de satélite é uma tarefa complexa, em consequência das alterações pouco perceptíveis causadas pela remoção parcial da cobertura do dossel florestal no processo de extração das árvores.

Recentemente, algumas técnicas de sensoriamento remoto têm sido desenvolvidas com objetivo de detectar florestas afetadas pela exploração madeireira na Amazônia. Dentre estas, incluem a interpretação visual das imagens, métodos semi-automáticos a partir da identificação

da infra-estrutura de exploração (pátios de estocagem e trilhas) e métodos automáticos baseados na análise espectral do *pixel* (WATRIN e ROCHA, 1992; SOUZA JR e BARRETO, 2000; ASNER et al. 2005; GRAÇA et al., 2005; SOUZA JR et al. 2005). Este trabalho teve por objetivo mapear a atividade de exploração madeireira a partir da técnica de detecção de mudanças baseada na rotação radiométrica do eixo de não mudança de imagens multitemporais (RCEN), que dispensa o uso prévio de correções radiométricas das imagens (MALDONADO et al., 2007), acoplada a um classificador temático probabilístico, utilizando dados dos sensores TM e ETM Landsat.

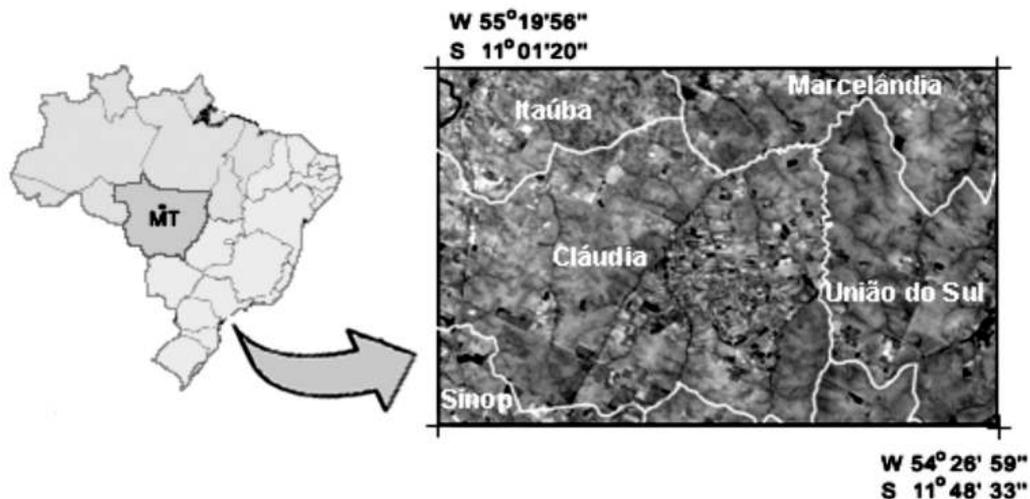
Material e Métodos

Descrição da área de estudo

A área de estudo está localizada no centro-norte do estado de Mato Grosso, abrangendo uma área de 7,8 mil km² que compreende as coordenadas geográficas

55° 19' 56" e 54° 26' 59" de longitude oeste 11° 01' 20" e 11° 48' 33" de latitude sul (Figura 1). A cobertura vegetal é composta por florestas de transição (zona de contato entre cerrado e floresta ombrófila aberta), com dominância da floresta estacional semidecidual, sobre relevo plano a levemente ondulado. O clima é tropical quente úmido com um curto período de seca, bem definido, de maio a agosto. A precipitação pluviométrica anual média é elevada, entre 1800 e 2200 mm. A temperatura média anual varia em torno de 24 °C (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 1980). A região de estudo está sob influência dos principais pólos madeireiros de Mato Grosso: Sinop, Cláudia e Marcelândia. A atividade madeireira nessa região é praticada de modo convencional, sem preocupação com a redução dos impactos ambientais, com intensidade de exploração em torno de 35 m³ha⁻¹, na qual são exploradas apenas as espécies de alto valor madeireiro, tais como, cedrinho (*Erismia sp.*), freijó (*Cordia sp.*),

Figura 1. Localização da área de estudo



e cupiúba (*Goupia glabra*) (GRAÇA, 2004). Além da atividade madeireira, esta região possui atividades agrícolas com predomínio de pastagens, milho, arroz, constituindo-se atualmente em uma fronteira de expansão da cultura de soja.

Dados de Sensoriamento Remoto

O presente estudo utilizou imagens dos sensores TM Landsat 5 e ETM Landsat 7 correspondentes às bandas 1 a 5 e 7, órbita ponto 226/68, referentes às datas de 29/06/2001 e 23/05/2002, respectivamente, com resolução espacial de 30m. As imagens foram fornecidas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Metodologia

Na etapa de pré-processamento, as imagens foram co-registradas (imagem-imagem) com o objetivo ajustá-las geometricamente para a técnica de detecção de mudança. A correção utilizou um polinômio de 1º grau para a transformação de coordenadas e uma amostragem dos *pixels* pelo vizinho mais próximo (RMS = 0,19). Posteriormente, a imagem resultante através da técnica de detecção de mudanças foi ajustada a um sistema de coordenadas geográficas.

A técnica de rotação controlada por eixo de não mudança (RCEN) baseia-se na regressão linear radiométrica de valores de números digitais (ND) entre o par de imagens de uma mesma banda espectral de datas distintas (data inicial e final), utilizando-se amostras (*pixels*) de não mudança, a partir de observações de campo de áreas com mesmo tipo de cobertura entre as datas

analisadas (MALDONADO et al. 2007). A imagem detecção de mudança foi gerada utilizando a seguinte expressão:

$$X_{Det} = -X_1 \text{ sen } \alpha + X_2 \text{ cos } \alpha$$

onde:

X_{Det} : imagem detecção de mudanças;

X_1 : banda primeira data;

X_2 : banda segunda data e,

$\text{cos } \alpha$: co-seno do ângulo de rotação

O ângulo de rotação (α) responsável pela inclinação do eixo radiométrico de não mudança foi obtido pela regressão linear radiométrica dos valores (ND) das imagens. Para a obtenção do ângulo de rotação (α) utilizou-se a equação:

Ângulo de rotação (α) = \arctg de a ; sendo que a representa o coeficiente angular da equação de regressão dos valores radiométricos de não mudança.

A imagem detecção obtida pela RCEN, foi fatiada e rotulada com o objetivo de obter um mapa de mudanças. O fatiamento e a rotulação foram feitos adotando-se cinco classes de mudanças, de acordo com a Tabela 1. Estas classes foram estabelecidas por limiares de mudança baseados no desvio padrão (σ) obtidos pela análise estatística dos dados da imagem detecção, supondo-se que a curva de distribuição da frequência dos *pixels* seja normal e possua limiares simétricos (MALDONADO et al., 2007). A classe de degradação está relacionada à perda de cobertura vegetal, associada ao processo de exploração madeira. Os limiares de 1σ e 2σ tiveram por finalidade separar a degradação em duas intensidades, forte e moderada. A degradação pode ser considerada forte quando áreas florestais são convertidas

Tabela 1. Classes e limiares utilizados na rotulação e fatiamento das imagens detecção

Rotulação	Limiar de fatiamento (desvio padrão)	Classe numérica	Cor temática na imagem detecção
Degradação forte	$ND > 2\sigma$	5	Vermelho
Degradação moderada	$1\sigma < ND \leq 2\sigma$	4	Amarelo
Não mudança	$-1\sigma \leq ND \leq 1\sigma$	3	Cinza
Recuperação moderada	$-1\sigma \leq ND \leq -2\sigma$	2	Verde
Recuperação forte	$ND < -2\sigma$	1	Azul

em corte raso. A degradação pode ser considerada moderada quando a perda da cobertura vegetal ocorre de forma parcial, isto é, quando a vegetação é reduzida sem que o solo fique totalmente exposto.

As classes de recuperação se referem ao ganho de cobertura vegetal. Estas foram rotuladas, também quanto a sua intensidade, em moderada e forte. A recuperação moderada foi caracterizada pela recomposição da cobertura florestal através do processo de regeneração após a exploração madeireira. A recuperação forte pode ser caracterizada por florestas em processo de regeneração que foram submetidas a um alto grau de degradação (incêndios e exploração).

O mapeamento do corte seletivo de madeira foi realizado a partir de um modelo computacional envolvendo uma série de rotinas operacionais, desenvolvida em linguagem de programação computacional do aplicativo MATLAB. Este modelo associou as informações resultantes do mapa de mudanças (bandas 3 e 4) obtidos pela RCEN, para delimitar as áreas de exploração recente (ocorrida no intervalo de 2001 a 2002), utilizando um algoritmo de classificação temática probabilística. As bandas 3 e 4 foram utilizadas separadamente para a obtenção de mapas de mudanças. A banda 3, por realçar nas imagens o brilho do solo,

foi utilizada com o objetivo principal de detectar as pequenas áreas de solo exposto, em consequência da abertura de pátios de estocagem de madeira. Por sua vez, a banda 4 foi mais sensível a resposta da vegetação, e teve por objetivo detectar as mudanças ocorridas na floresta sob o raio de alcance da exploração madeireira, entorno dos pátios de estocagem.

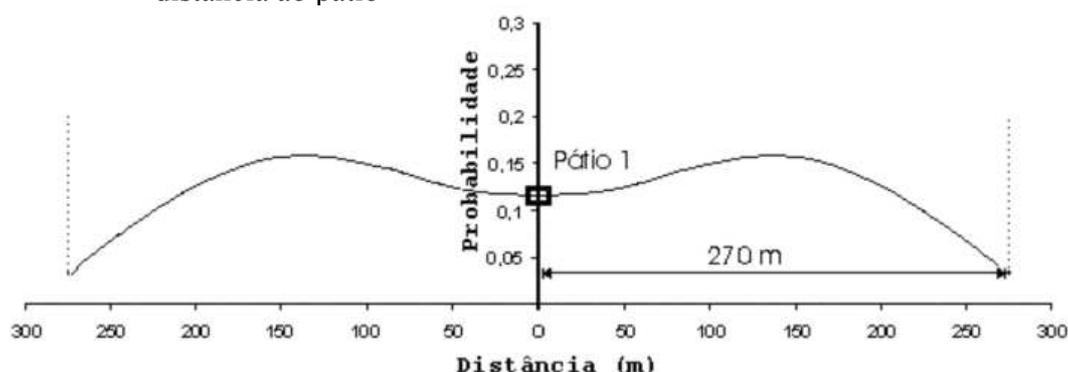
A primeira etapa do modelo consistiu em identificar os *pixels* isolados com potencial de serem pátios, representados por degradação forte no mapa de mudanças originado pelo par de imagens da banda 3. Este procedimento foi realizado após aplicação da máscara de “não-floresta” obtida a partir de uma classificação não supervisionada (Isodata), e teve por objetivo separar a cobertura florestal dos mais tipos de cobertura (pastagens, solo exposto, etc). Ao final desta análise foi gerada uma imagem binária contendo os *pixels* classificados como pátios em potencial. A segunda etapa gerou um plano numérico contínuo representando a probabilidade de um *pixel* pertencer a uma classe de degradação de acordo com a distância a um pátio de estocagem, identificado na etapa anterior. Assim, foram estabelecidos nove anéis (30m de largura) concêntricos aos *pixels* considerados como pátios, com pesos para probabilidade diferentes.

Os anéis foram dispostos utilizando uma probabilidade aditiva, aumentando até o quinto anel e depois decaindo com a distância ao pátio. Assim, *pixels* distantes localizados na borda da área afetada pela exploração tiveram pesos de probabilidade menores (Figura 2).

Quando os *pixels* encontravam-se entre dois pátios, aqueles que estavam na intersecção dos anéis receberam uma probabilidade maior. Considerou-se para cada pátio, um raio de abrangência de 210 metros, a partir de dados observados em campo. A suposição de uma probabilidade

cada classe de mudança resultante da banda 4 gerou um novo plano de informação de pesos de probabilidade, de acordo com a frequência de ocorrência de cada classe de mudança na abrangência de cada *pixel* (janela de 3x3 *pixels*), calculado como o número de ocorrência de uma classe dividido pelo número de casos possíveis. Em seguida, os pesos dos *pixels* gerados para o PI de probabilidade de ocorrência da classe de mudança 4 (degradação moderada) foram acrescidos com os pesos gerados para o PI de probabilidade de um *pixel*

Figura 2. Distribuição da probabilidade de degradação florestal em função da distância ao pátio



maior na área entre os pátios foi devido a esta região ser mais susceptível à degradação da vegetação, por efeito da sobreposição dos danos originados pela exploração madeireira dentro da abrangência do raio de alcance de ambos os pátios.

A etapa final cruzou as informações das cinco classes de mudança resultante da banda 4 obtidos pela RCEN com o plano de informação (PI) representando a probabilidade de um *pixel* pertencer à classe de degradação em função da distância ao pátio de estocagem. Assim,

pertencer à classe de degradação em função da distância ao pátio. Ao final dos procedimentos adotados para dar peso à probabilidade de ocorrência de uma determinada classe de mudança, os pesos dos *pixels* dos PI's de cada classe de mudança foram alterados em função da vizinhança (janela 3x3 *pixels*), somando-se a cada *pixel* o valor correspondente de cada um dos oito *pixels* vizinhos.

A imagem classificada de detecção de mudanças foi obtida comparando-se os valores de cada *pixel* com mesmo

posicionamento em todos os PI de classe de mudança. O *pixel* de maior valor entre os cinco planos de informação contendo pesos de ocorrência para cada classe de mudança foi selecionado para gerar a imagem classificada de mudanças. A máscara de não floresta, também, foi aplicada à imagem classificada com objetivo de selecionar apenas classes de mudanças relacionadas à cobertura florestal. A seguir, para a obtenção do mapa temático de exploração madeireira recente, as classes de mudanças foram combinadas em duas classes temáticas: floresta (intacta e exploração antes do período analisado) e floresta explorada em 2001-2002. Após a classificação, um filtro (3×3 *pixels*) de “preenchimento” (*fill filter*) implementado no aplicativo Matlab foi utilizado para fechar as “lacunas” dentro da classe de floresta explorada recente, consideradas sob sua influência.

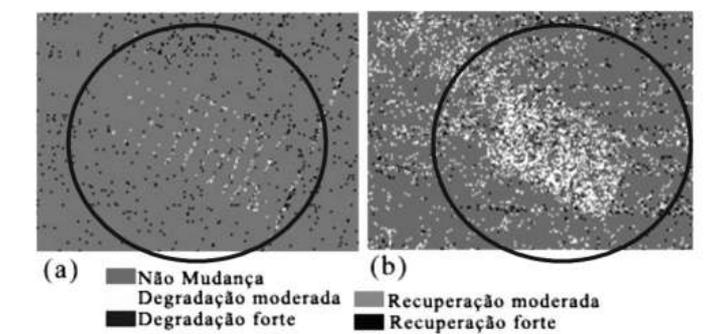
O desempenho obtido pela classificação foi direcionado para a classe de interesse do mapeamento (exploração madeireira recente), a partir da análise estatística *Kappa* condicional (CONGALTON E GREEN, 1999).

Resultados e Discussão

O modelo de regressão utilizado na técnica RCEN a partir de pontos de não mudança gerou um ângulo de rotação de 43,2 graus para a banda 4 e de 46,4 graus para a banda 3. Os ângulos de rotação encontrados neste estudo, próximos de 45 graus, denotam que os conjuntos de imagens TM e ETM possuíam escalas radiométricas muito próximas. O fato que as imagens em ambas as datas foram adquiridas sob condições de pouca interferência atmosférica, com ausência de nuvens ou névoa pode contribuir para este resultado.

As imagens obtidas pela técnica RCEN derivadas das bandas 3 e 4 evidenciaram, visualmente, respostas bastante distintas em relação à detecção de mudanças (Figura 3). A banda 3 foi mais sensível à degradação forte, em situações onde a exposição plena do solo foi pronunciada na imagem de data final. Por sua vez, a banda 4 foi mais sensível às alterações moderadas no dossel florestal, tais como aquelas que apresentam uma perda parcial da cobertura florestal durante a exploração florestal. Este fato motivou

Figura 3. Imagens de detecção de mudanças obtidas pela banda 3 (a) e banda 4 (b) mostrando em destaque (círculo vermelho) uma área de floresta recém explorada (2001-2002)



o desenvolvimento neste trabalho de uma metodologia de “classificação temática” do mapa de mudanças resultante da RCEN que utilizasse as informações de ambas as bandas (3 e 4), ampliando o espaço de atributos para a detecção de mudanças.

O resultado da técnica RCEN acompanhada pelo processo de classificação temática demonstrou, visualmente, ser sensível à degradação moderada da cobertura florestal (Figura 4). No entanto, áreas próximas aos cursos d’água foram classificadas erroneamente como áreas de exploração madeireira. Este erro de classificação está associado à diferença do nível de água dos rios entre as datas analisadas. Assim, áreas vegetadas próximas aos cursos d’água expostas em 2001, mas inundadas em 2002 aparecem erroneamente como áreas de perda de vegetação na imagem RCEN para a banda 4. Estes erros de classificação foram corrigidos por

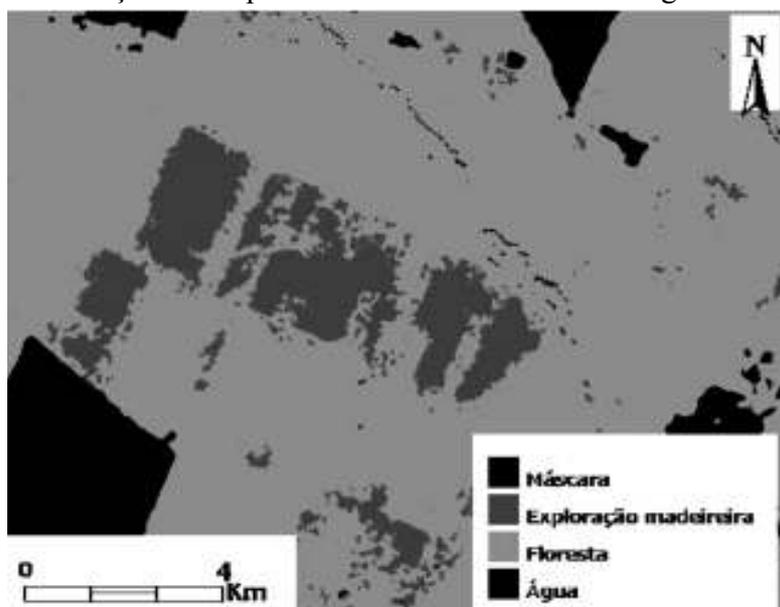
edição manual numa etapa de pós-classificação, juntamente com alguns *pixels* isolados, representando pequenas áreas sem expressão do ponto de vista de manejo florestal. Os *pixels* editados representaram menos do que 0,3% da totalidade dos *pixels* contidos na imagem.

O mapeamento da técnica RCEN acoplada ao classificador temático probabilístico obteve um coeficiente *Kappa condicional* de 0,72, em termos de exatidão do produtor, considerado como “muito bom”, alcançando uma exatidão do usuário de 0,78, considerado, também, “muito bom”.

Extensão das áreas afetadas pela exploração madeireira no período de 2001 a 2002

As áreas exploradas no período de 2001 a 2002 (162 km²) corresponderam a 2,1% da área total estudada (7.779 km²). Por conseguinte, a taxa bruta de desmatamento alcançou 110 km² ano

Figura 4. Classificação obtida pela técnica RCEN de uma sub-região da área de estudo



¹, no período de 2001 a 2002. Estes resultados revelam que as áreas de florestas afetadas pela extração madeireira podem ultrapassar a extensão das áreas de florestas convertidas ao corte raso para fins agrícolas em áreas ligadas a pólos madeireiros tradicionais na Amazônia. MONTEIRO et al. (2003) encontraram taxas de exploração madeireira maiores do que as taxas de desmatamento para o mesmo período de observação, em uma área localizada na região do município de Cláudia, confirmando os resultados deste estudo. É lógico, que essa tendência pode não ser observada em regiões nas quais os recursos florestais vêm sendo explorados há mais tempo e encontram-se próximo do esgotamento, ou fora do alcance do raio de influência dos pólos madeireiros.

A conversão de florestas exploradas ao corte raso para fins agrícolas foi de apenas 8,6% em relação ao total da área explorada entre 2001 e 2002 (162 km²). MONTEIRO et al. (2003), encontraram, também, o desmatamento associado principalmente às florestas não exploradas, em áreas de estudo localizadas em Sinop, Cláudia e Marcelândia. De acordo com esses autores, na região de Cláudia, o desmatamento em áreas de florestas exploradas contribuiu com apenas 18% (1.982 ha/10.922 ha) do total da área desmatada no período de 1992 a 1999.

Considerações Finais

A classificação originada da imagem detecção de mudanças pela técnica de detecção RCEN foi fundamentada na identificação dos pátios de estocagem, em menor ou maior grau, portanto, não

se aplicam em áreas onde os pátios de estocagem não fazem parte da estratégia de exploração florestal seletiva. Além disso, a metodologia utilizada neste estudo foi desenvolvida para florestas de transição localizadas no “arco do desmatamento” da região amazônica. Essas florestas possuem características estruturais e florística diversificadas, que sob o ponto de vista de exploração madeireira, apresentam uma intensidade de extração diferenciada daquelas de florestas densas localizadas na região central da Amazônia.

A técnica de detecção de mudanças com base na Rotação Controlada por Eixo de Não Mudança (RCEN) mostrou-se eficiente no mapeamento e análise da dinâmica das áreas florestais sob exploração madeireira. Esforços futuros para o aprimoramento de um sistema operacional automatizado utilizando esta técnica serão envidados, com objetivo de estabelecer um monitoramento de custo baixo.

Um monitoramento florestal contínuo, com base anual, pode ser uma ferramenta de suma importância ao controle ambiental e fiscalização da atividade madeireira na Amazônia, principalmente neste momento em que a lei de concessões florestais passou a vigorar, regulamentando a prática de manejo florestal em terras da União.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq (Universal No. 480108/2007-2 e PPG7 No. 557152/2005-4), a FINEP (Projeto Integrado MCT-EMBRAPA - PIME) e ao INPA (PPI PRJ 03.12) pelo apoio financeiro à realização deste trabalho.

Referências

- ASNER, G, et al. Selective Logging in the Brazilian Amazon. *Science*. n.310, n.4757, p. 480-482, 2005.
- BARROS, A.V.; VERÍSSIMO, A (Eds.). *A expansão madeireira na Amazônia: impactos e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Pará*. Belém: Imazon (2 ed.), 2002. 166p.
- CONGALTON, R.G.; GREEN, K. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999. 137p.
- GRAÇA, P.M.L.A. *Monitoramento e caracterização de áreas submetidas à exploração florestal na amazônia por técnicas de detecção de mudanças*. (INPE-13644-TDI/1046). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE, 2004. 275p.
- GRAÇA, P.M.L.A., et al. Desenvolvimento metodológico para detecção e mapeamento de áreas florestais sob exploração madeireira: estudo de caso, região norte de Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 16-21, 2005. Goiânia. *Anais...*, São José dos Campos: INPE, 2005, p. 1555-1562. *CD-ROM*.
- JOHNS, S.J. et al. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. *Forest Ecology and Management*, v.89, n.1-3, p. 59-77, 1996.
- JOHNS, G.A. *Timber production and biodiversity conservation in tropical rain forests*. London: Cambridge University Press, 1997. 222p.
- MALDONADO, F.D; SANTOS, J. R.; GRAÇA, P.M.L.A. Change Detection Technique based on the Radiometric Rotation Controlled by No-Change Axis, applied on Semi-arid Landscape. *International Journal of Remote Sensing*. v.28, n.8, p. 1789-1804, 2007.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. *Projeto RADAMBRASIL: Levantamento de Recursos Naturais*. Rio de Janeiro: MME/DNPM, 1980. v.20. 368p., 1980.
- MONTEIRO, A.L. et al. Detection of logging in Amazonian transition forests using spectral mixture models. *International Journal of Remote Sensing*, v.24, n.1, p.151-159, 2003.
- NEPSTAD, D.C. et al. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, v.398, n.6, p. 505-508, 1999.
- UHL, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. *Ecology*, v.71, n.2, p.437-449, 1990.
- SOUZA JR, 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 JR. et al. Mapping forest degradation in the eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, v.87, p.494-506, 2003.
- WATRIN, O.S.; ROCHA, A.M.A. *Levantamento da vegetação natural do uso da terra no município de Paragominas (PA) utilizando imagens TM/Landsat*. Belém: EMBRAPA-CPATU/PA, 1992. 40p. (EMBRAPA-CPATU/PA. Boletim de Pesquisa n.124).