

Avaliação de imagens LANDSAT para o monitoramento do manejo florestal na Amazônia

Evaluation of LANDSAT images for monitoring forest management in the Amazon region, Brazil

André Luiz Silva Monteiro¹, Carlos Moreira de Souza Jr.² e Christel Lingnau³**Resumo**

Neste estudo avaliou-se o potencial de imagens LANDSAT ETM+ para monitorar a qualidade do manejo florestal através do impacto da exploração madeireira no dossel em floresta ombrófila densa e de transição da Amazônia. Analisou-se a dinâmica dos impactos no dossel com imagens de abundância de vegetação obtidas por modelo linear de mistura espectral em áreas de exploração convencional (EC) e de exploração manejada (EM) nos dois maiores pólos madeireiros da Amazônia: Paragominas (PA) e Sinop (MT). Fotografias hemisféricas do dossel foram tomadas do campo com uma lente hemisférica “olho de peixe” para quantificar a abertura no dossel e para validar os resultados das imagens de satélite. Os resultados mostraram que a abundância de vegetação em Paragominas foi 4% menor na EM (32 m³/ha extraído) e 12% menor na EC (33 m³/ha extraído) comparadas à floresta nativa. Em Sinop, essa abundância foi 14% menor na EM (35 m³/ha extraído) e 19% menor na EC (34 m³/ha extraído) em relação à floresta nativa. O método mostrou que a detecção dos impactos no dossel pode ser feita pelo menos um ano após a exploração madeireira. Por último, este método poderia ser utilizado para monitorar a atividade madeireira na Amazônia pelas agências ambientais e certificadoras.

Palavras-chave: Modelo de mistura espectral, LANDSAT, Exploração madeireira, Impacto no dossel, Amazônia

Abstract

In this study, it was evaluated the potential of LANDSAT ETM+ for detecting and monitoring the quality of forest management plans in the Brazilian Amazon based on the canopy disturbance in dense and transitional forests. The canopy disturbance dynamic was analyzed through vegetation fraction images obtained from spectral mixing analysis. These techniques were applied in areas of Conventional Logging (CL) and Managed Logging (ML) in two majors logging centers of the Amazon, Paragominas, in the northeastern Para State, and Sinop in northern Mato Grosso region. Hemispherical canopy photographs were taken at the management plots using “fish eyes” lens to quantify the canopy opening and to validate the satellites images measurements. The results showed that the vegetation fraction image was 4% less in ML (32 m³/ha extracted) and 12% less in CL (33 m³/ha extracted) relative to intact forest in the region of Paragominas; whereas in Sinop was 14% less in ML (35 m³/ha extracted) and 19% less in CL (34 m³/ha extracted). The method showed that canopy impacts can be detected at least one year after the logging activity. Therefore, this method can be an important tool for environmental agencies and institutes that provide forest certification to monitor the Brazilian Amazon forests undergoing logging activity.

Keywords: Spectral mixing models, LANDSAT, Selective logging, Canopy disturbance, Amazon

INTRODUÇÃO

A exploração madeireira é uma das principais atividades econômicas na Amazônia, com produção de 24,5 milhões de metros cúbicos de madeira em tora por ano e geração de mais de 300 mil empregos diretos e indiretos (LENTINI *et al.*, 2005).

Entretanto, estima-se que 62% da madeira produzida na região provém de exploração predatória ou convencional (LENTINI *et al.*, 2005). Este tipo de exploração causa impactos ecológicos severos na floresta, tais como redução de biomassa viva (GERWING, 2002), risco de extinção de espécies de alto valor econômico (MARTINI *et al.*, 1994),

¹Pesquisador Assistente do IMAZON - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – Rua Domingos Marreiros, 2020 – Altos - Bairro Umarizal - Belém, PA - 66060-160 - E-mail: andreluiz@amazon.org.br

²Pesquisador Sênior do IMAZON - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – Rua Domingos Marreiros, 2020 – Altos - Bairro Umarizal - Belém, PA - 66060-160 - E-mail: souzajr@amazon.org.br

³Professora Doutora do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná - Av. Lothário Meissner, 632 - Jardim Botânico - Curitiba, PR - 80210-170 - E-mail: lingnau@ufpr.br

aumento da susceptibilidade ao fogo (HOLDSWORTH e UHL, 1997) e aumento de cipós e espécies pioneiras (MONTEIRO *et al.*, 2004).

Há dois tipos de exploração madeireira (JOHNS *et al.*, 1996; PEREIRA *et al.*, 2002): a Exploração Convencional (EC) e a Exploração Manejada (EM). A EM caracteriza-se pelo planejamento das operações, isto é: as estradas, ramais de arraste e pátios de estocagem de toras são construídos com base na localização das árvores a serem derrubadas e arrastadas; os cipós que interligam as copas das árvores são cortados antes da exploração para reduzir os danos às árvores adjacentes; e as árvores são derrubadas utilizando técnicas de corte direcional, o que contribui para uma abertura menor no dossel (média de 116 m²) (JOHNS *et al.*, 1996). Na EC as operações não são planejadas. Como resultado, as estradas, ramais de arraste e pátios de estocagem ou esplanada seguem uma rota tortuosa e mais longa; muitas árvores adjacentes àquelas derrubadas são danificadas porque os cipós não são cortados antes da exploração; e a abertura média no dossel resultante da derrubada das árvores é em média 355 m² (JOHNS *et al.*, 1996), o dobro daquela da exploração manejada (PEREIRA *et al.*, 2002).

Atualmente, o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis) monitora a exploração madeireira e avalia a qualidade dos planos de manejo por meio de vistorias no campo (IBAMA, 2006). Entretanto, essa fiscalização e monitoramento são pouco confiáveis e transparentes (BARRETO e SOUZA JR., 2001). Isto porque a forma de fiscalização é amostral em virtude da limitação de tempo, recursos financeiros e humanos (IBAMA, 2006). Além disso, dependendo da época da vistoria, do tamanho da Área de Manejo Florestal (AMF) e do número de técnicos de campo, a vistoria poderá ser restrita a apenas algumas áreas do plano de manejo (IBAMA, 2006).

Entretanto, imagens de satélite têm sido usadas para detectar e mapear as aberturas de estradas e pátios de estocagem da exploração madeireira (SOUZA JR. e BARRETO, 2000; MONTEIRO *et al.*, 2003), bem como os impactos dessas aberturas e da derrubada de árvores no dossel (ASNER *et al.*, 2002; SOUZA JR. *et al.*, 2003a). Porém, esta é uma tarefa difícil, pois a atividade gera um ambiente complexo, composto por floresta remanescente e clareiras com solo exposto pela abertura de estradas e pátios de estocagem e com galhos secos resultante da derrubada de

árvores. Esta complexidade de ambientes dificulta a detecção por métodos tradicionais de interpretação e processamento de imagens de satélite, tornando-se necessária a utilização de técnicas mais avançadas, como por exemplo: modelo de mistura espectral (SOUZA JR. *et al.*, 2003b).

Os estudos de detecção dos impactos no dossel florestal pela exploração madeireira têm sido baseados em imagens LANDSAT, SPOT e IKONOS (ASNER *et al.*, 2002; SOUZA JR. *et al.*, 2003a; READ *et al.*, 2003). Entretanto, a imagem LANDSAT é a que apresenta a melhor série temporal (SOUZA JR. *et al.*, 2003b) e o menor custo de aquisição para monitorar essa atividade na Amazônia (MONTEIRO, 2005). Além disso, imagens LANDSAT já foram testadas com êxito para avaliar indicadores da qualidade do manejo florestal na região (MONTEIRO, 2005).

Neste estudo avaliou-se o potencial de imagens LANDSAT ETM+ para monitorar a qualidade do manejo florestal através dos danos no dossel em floresta ombrófila densa e de transição na Amazônia. Dessa forma, aplicou-se a técnica do modelo de mistura espectral nas imagens para analisar a dinâmica dos impactos no dossel em áreas de exploração convencional (EC) e exploração manejada (EM) de madeira nos dois maiores pólos madeireiros da Amazônia.

MATERIAL E MÉTODOS

Áreas de estudo

O estudo foi conduzido em Paragominas, no Pará, e Sinop, no Mato Grosso. O primeiro sítio é coberto por floresta tropical densa, de terra firme, em terreno moderadamente ondulado de um planalto residual terciário. Seus solos são do tipo latossolo amarelo argiloso, sendo também encontrados plintossolos, gleissolos e neossolos. O clima nessa área caracteriza-se por uma estação seca no período de julho a novembro e uma estação chuvosa de dezembro a junho, com média anual pluviométrica variando entre 1.800 mm e 2.000 mm, e temperatura média anual variando entre 24° C e 26° C (CIKEL, 2001; Figura 1). A área e a intensidade exploradas deste sítio foram 1.749 ha e 33 m³/ha na exploração convencional e 238 ha e 32 m³/ha na exploração manejada.

O segundo sítio é coberto por floresta tropical de transição (entre cerrado e floresta ombrófila aberta) sobre relevo plano a suavemente ondulado, no qual predominam solos do tipo latossolo vermelho-amarelo bem drenados. Seu

clima é tropical quente úmido, com quatro meses de estação seca (maio a agosto), pluviosidade média anual em torno de 2000 mm e temperatura anual variando entre 15° C e 35° C (RADAMBRASIL, 1981; Figura 1). A área e a intensidade exploradas deste sítio foram 2.000 ha e 34 m³/ha na exploração convencional e 426 ha e 35 m³/ha na exploração manejada.

Pré-processamento das imagens

Foram utilizadas imagens LANDSAT ETM+ (bandas 1-5 e 7), órbita/ponto 223/62, de 7 de setembro de 2002, 15 de julho de 2003 e 16 de maio de 2004, e órbita/ponto 226/68, de 10 de julho de 2002, 6 de agosto de 2003 e 5 de junho de 2004, adquiridas através do TRFIC (*Tropical Forest Information Center*). As datas de aquisição das imagens correspondem ao período seco na região, quando é possível se obter imagens livres de nuvens.

As imagens LANDSAT ETM+ de 2002 foram georreferenciadas pelo método de reamostragem do vizinho mais próximo, utilizando o programa ENVI® (*Environment for Visualizing Images*) 4.0, com pontos de controle disponíveis

em mapa e pontos adquiridos por GPS no campo. As demais imagens LANDSAT ETM+ foram registradas com base na imagem referência georreferenciada com erro médio quadrático RMS menor que um pixel.

Correção atmosférica

Aplicaram-se correções atmosféricas nas imagens LANDSAT ETM+ utilizando o programa ACORN® (*Atmospheric Correction Now*) 4.1. Primeiramente, foram extraídos dos meta-arquivos das imagens os parâmetros de calibração radiométrica e da geometria de aquisição ("gains" e "offset"). Em seguida, foram determinados os parâmetros de visibilidade e vapor d'água por uma análise de sensibilidade de tentativa e erro da reflectância de um objeto escuro. Os parâmetros finais foram de 40 milímetros para vapor d'água e de 25 quilômetros para visibilidade atmosférica da imagem. Finalmente, foi aplicado o algoritmo *haze correction*, implementado em IDL® (*Interactive Data Language*) para minimizar os efeitos ocasionados por neblina e fumaça nas imagens (CARLOTTO, 1999).

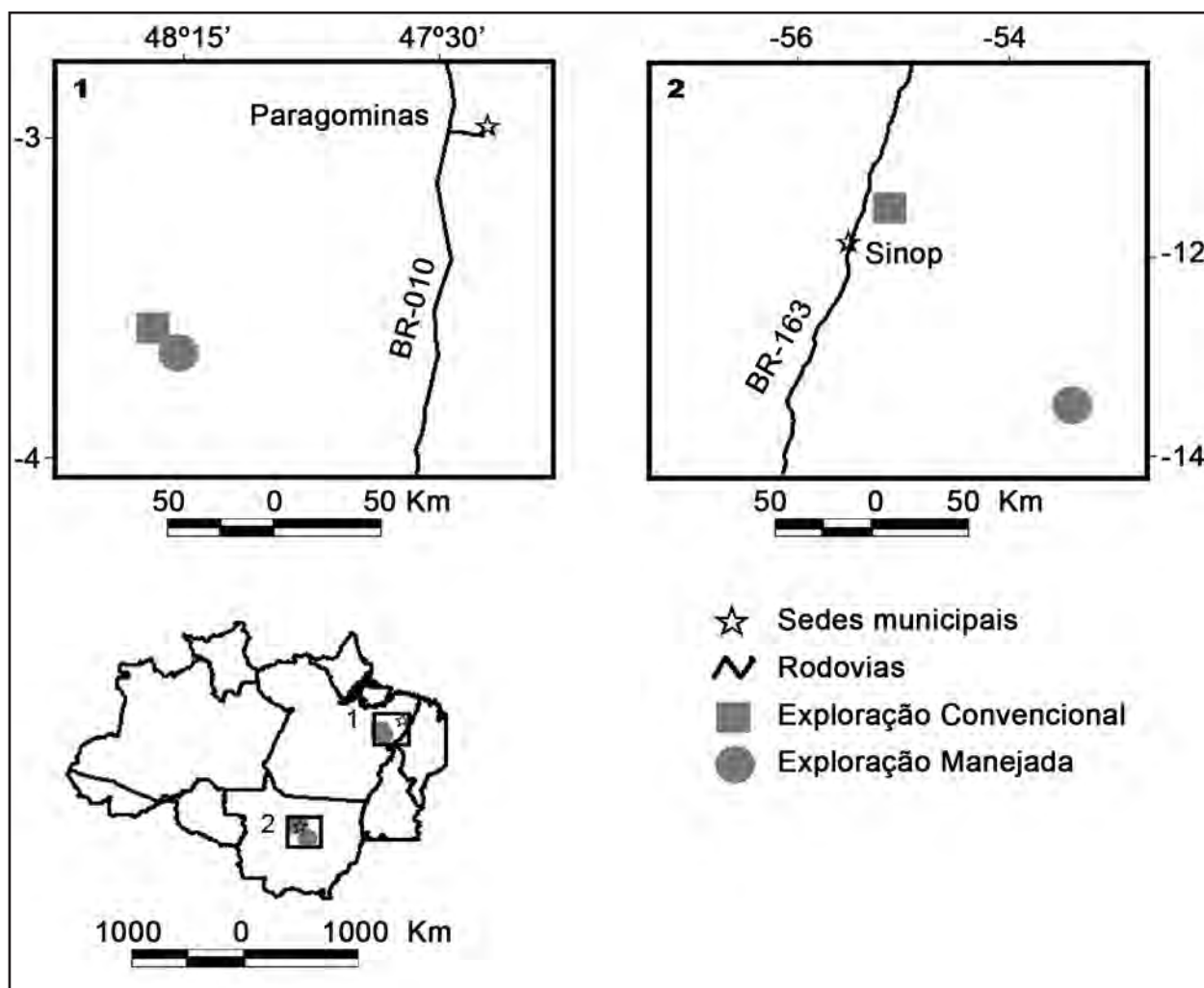


Figura 1. Localização das áreas de estudo.
Figure 2. Location of study sites.

Intercalibração radiométrica

As imagens LANDSAT ETM+ foram intercalibradas para as duas áreas de estudo, a partir da imagem referência de 2000, usando o método de calibração radiométrica relativa (ROBERTS *et al.*, 1998). A imagem de 2000 foi selecionada como referência por ser a melhor imagem de uma série temporal (livre de nuvem e fumaça). O método de calibração radiométrica consiste em selecionar alvos terrestres invariantes em imagens adquiridas em diferentes datas. Para cada par de imagens (imagem referência e imagem não calibrada) foram selecionados alvos invariantes, representativos de floresta, vegetação secundária, pasto verde, solo exposto e água. De uma área de 3 x 3 pixels, foi realizada uma regressão linear usando o valor médio do pixel, para cada banda, dos alvos invariantes. Por último, os coeficientes de inclinação intercept e correlação, obtidos da regressão, foram usados para normalizar a imagem não calibrada com base na imagem referência através da conversão dos níveis de cinza (DN) da imagem não calibrada para reflectância (Tabela 1).

Modelo Linear de Mistura Espectral

O modelo linear de mistura espectral foi computado através do programa ENVI® 4.0 nas imagens LANDSAT ETM+ de 2002, 2003 e 2004 para estimar as abundâncias de sombra, solo, vegetação, NPV (vegetação seca) e erro RMS. Primeiramente, pixels puros (*endmembers*) foram identificados na imagem referência com o algoritmo PPI (*Pixel Purity Index*) (BOARDMAN *et al.*, 1995). Para isso, foram usadas cinco subamostras de imagens (500 x 500 pixels), representando a variedade dos tipos de cobertura do solo encontrada na imagem. Os pixels puros finais foram selecionados na imagem de PPI, através de gráficos de dispersão N-dimensionais, sendo identificada a localização dos mesmos na imagem original e extraídas as curvas espectrais destes pixels. Foram selecionados como candidatos a pixel puro

de sombra, solo, vegetação e NPV, aqueles localizados nos extremos do conjunto de dados do espaço espectral da imagem. A modelagem de mistura espectral foi determinada por:

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

para:

$$\sum F_i = 1 \quad (2)$$

sendo:

DN_b 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 o erro na banda b.

O modelo de mistura espectral foi aplicado para as imagens LANDSAT ETM+ de 2002, 2003 e 2004 usando os pixels puros da imagem intercalibrada. Os resultados do modelo de mistura espectral foram avaliados inspecionando-se os erros médios quadráticos (RMS) das imagens, e foram aceitos na análise apenas aqueles com valores de RMS maiores que 95%. Em seguida, as imagens de abundância foram inspecionadas através dos histogramas e interpretadas em termos do contexto de campo e distribuição espacial. Apenas modelos com pelo menos 98% dos valores do pixel localizados entre 0% e 100% e valores médios de abundância consistentes ao longo do tempo foram aceitos na análise. Para modelos que não preencheram esses requisitos, novos alvos invariantes foram coletados para melhorar os coeficientes da imagem de intercalibração, seguido da aplicação de um novo modelo.

Para eliminar o efeito de sombra devido às diferenças de iluminação no momento da aquisição das imagens, a imagem de abundância de vegetação foi normalizada (MONTEIRO, 2005) através de:

$$VEG_n = VEG / (100 - SOMBRA) * 100 \quad (3)$$

sendo:

VEG é a imagem de abundância de vegetação;

SOMBRA é a imagem de abundância de sombra.

Tabela 1. Valores de inclinação, intercept e R² obtidos para intercalibrar as imagens LANDSAT ETM+ de 2002, 2003 e 2004 com base na imagem referência de 2000.

Table 1. Values of slope, intercept and R² obtained to intercalibrate the LANDSAT ETM+ images of 2002, 2003 e 2004 based in the reference image of 2000.

Banda	2002 para 2000			2003 para 2000			2004 para 2000		
	Inclinação	Intercept	R ²	Inclinação	Intercept	R ²	Inclinação	Intercept	R ²
1	0,08	63,33	0,98	0,05	46,82	0,99	0,06	51,73	0,98
2	0,07	31,75	0,98	0,02	13,92	0,98	0,03	14,10	0,99
3	0,09	26,54	0,99	0,03	11,66	0,99	0,03	12,94	0,99
4	0,02	20,47	0,99	0,02	6,73	0,98	0,02	3,43	0,98
5	0,05	5,17	0,98	0,03	8,98	0,99	0,03	5,58	0,99
7	0,05	6,16	0,99	0,02	1,95	0,99	0,02	3,02	0,99

Análise estatística das imagens

A avaliação temporal foi realizada selecionando-se aleatoriamente amostras de 41 pixels nas imagens de abundância de vegetação para áreas (36 ha) de exploração manejada e exploração convencional. Em seguida, extraíram-se os valores desses pixels das imagens adquiridas meses após a exploração, um ano antes (representando a condição de floresta nativa) e um ano depois de ocorrer (representando a regeneração). As amostras eram compostas por um mosaico de ambientes (floresta, estradas, ramais de arraste, pátios de estocagem e clareiras de derrubada de árvores). Por último, foram computadas as estatísticas dessas 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.

Medição dos impactos no dossel no campo

Para validar os resultados das imagens, os impactos da exploração foram quantificados, no campo, medindo-se a abertura no dossel em áreas de EC e EM. O trabalho de campo ocorreu de julho a agosto de 2004, aproximadamente um ano após a exploração. A abertura no dossel foi assumida como o complemento da abundância de vegetação obtida na imagem de satélite.

Essas medições consistiram de fotos hemisféricas, tomadas aproximadamente a 1,5 m do solo, nos centros das clareiras abertas na floresta pela derrubada de árvores e das aberturas de estradas,

ramais de arraste e pátios de estocagem nas áreas de EC e EM. Isto foi feito com uma câmera digital (Nikon Coolpix, 5.4 Mega pixel de resolução) acoplada a uma lente hemisférica "olho de peixe". Para comparação, também foram tomadas fotos hemisféricas da abertura do dossel de florestas nativas. A fim de evitar a incidência direta de iluminação na clareira, o que prejudicaria a análise computacional da abertura do dossel, as fotos hemisféricas foram tomadas 1 hora depois do amanhecer (das 6 às 7 horas) e 1 hora antes do pôr-do-sol (das 17 às 18 horas). A localização dos pontos de tomada das fotos hemisféricas foi registrada com GPS de navegação para identificar nas imagens a localização exata desses pontos. A abertura no dossel foi determinada utilizando o programa *Gap Light Analyzer*® 2.0.

RESULTADOS

Impactos no dossel através das imagens

As análises estatísticas da abundância de vegetação obtidas das imagens mostraram diferenças significativas entre os padrões de exploração em ambos os sítios. Em Paragominas, a abundância de vegetação foi 4% menor na EM e 12% menor na EC quando comparadas à floresta nativa. Entre os dois tipos de exploração neste sítio, verificou-se uma abundância de vegetação 8% maior na EM (Tabela 2). Por outro lado, em Sinop, a abundância de vegetação foi 14% menor na EM e 19% menor na EC comparadas à floresta nativa. A EM apresentou uma abundância de vegetação 5% maior (Tabela 2).

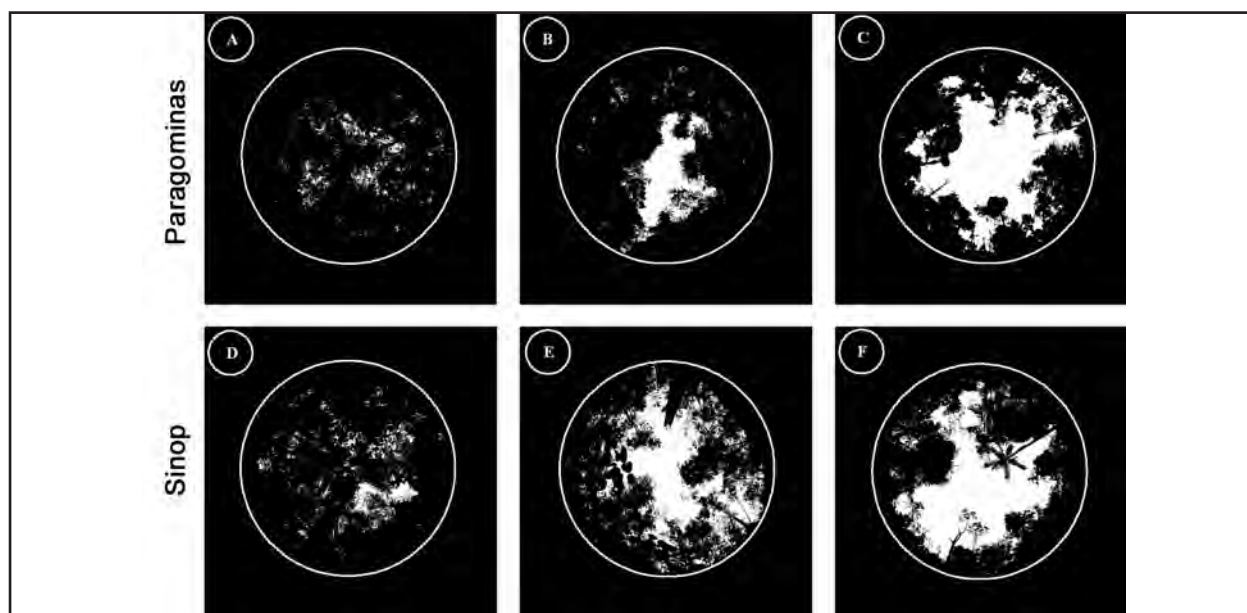


Figura 2. Aberturas no dossel em clareiras de derrubada de árvores, a partir de fotografias tomadas no campo com câmera digital acoplada à lente "olho de peixe", em área de floresta nativa (A e D), exploração manejada (B e E) e exploração convencional (C e F) na região de Paragominas - PA (A, B e C) e de Sinop - MT (D, E e F).

Figure 2. Canopy opening due to tree harvested, taking from the field in gaps with digital camera coupled to "fish eyes" lens, to intact forest (A and D), managed logging (B and E) and conventional logging (C and F) in the regions of Paragominas - PA (A, B and C) and Sinop - MT (D, E and F).

Tabela 2. Análise da abundância de vegetação obtida da imagem LANDSAT ETM+ e da abertura no dossel medida no campo em áreas de floresta nativa, exploração manejada (EM) e exploração convencional (EC) nas regiões de Paragominas - PA e Sinop - MT.

Table 2. Analysis of the vegetation fraction obtained from the image and canopy opening took from the field to intact forest, managed logging (EM) and conventional logging (EC) in the regions of Paragominas - PA and Sinop - MT.

Paragominas			
	Floresta nativa (n=28 ^a ; 6 ^b)	EM (n=34 ^a ; 3 ^b)	EC (n=30 ^a ; 3 ^b)
^a Abertura no dossel	0,04 (0,02)a	0,17 (0,05)b	0,30 (0,07)c
^b Abundância de vegetação	0,94 (0,02)a	0,90 (0,08)b	0,82 (0,11)c
Sinop			
	Floresta nativa (n=20 ^a ; 6 ^b)	EM (n=30 ^a ; 3 ^b)	EC (n=25 ^a ; 3 ^b)
^a Abertura no dossel	0,02 (0,02)a	0,24 (0,04)b	0,28 (0,05)c
^b Abundância de vegetação	0,93 (0,07)a	0,79 (0,06)b	0,74 (0,05)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.

Os histogramas normalizados para cada classe em Paragominas mostraram que a abundância média de vegetação foi de 94% na floresta nativa, 90% na EM e 82% na EC (Figura 3A). A abundância de vegetação foi estatisticamente diferente em relação à floresta nativa (Teste de Duncan, $p < 0,05$) na EM e na EC neste sítio. As variações da abundância de vegetação ocorreram largamente na EM (mínimo= 62% e máximo = 100%) e na EC (mínimo= 52% e máximo= 100%). Em Sinop, a abundância média de vegetação foi de 93% na floresta nativa, 79% na EM e 74% na EC (Figura 3B). A abundância de vegetação na EM e na EC foram estatisticamente diferentes em relação à floresta nativa (Teste de Duncan, $p < 0,05$). As variações mínima e máxima da abundância de vegetação em Sinop foram respectivamente 61% e 87% na EM e 61% e 81% na EC.

Análise temporal do impacto no dossel através das imagens

A análise temporal do impacto no dossel feita através das imagens de abundância de vegetação mostrou a dinâmica da exploração ao longo dos anos (Tabela 3). Em Paragominas, ocorreu

uma redução significativa da abundância de vegetação pela exploração de 4% na EM (32 m³/ha extraído) e de 10% na EC (33 m³/ha extraído). Um ano após a exploração, essa abundância se manteve estável na EM e aumentou significativamente em 4% na EC (Tabela 3 e Figura 4A). Por outro lado, em Sinop, a abundância de vegetação foi reduzida em 12% na EM (35 m³/ha extraído) e em 19% na EC (34 m³/ha extraído). Um ano após a exploração, a abundância de vegetação aumentou significativamente em 5% na EM e em 7% na EC (Tabela 3 e Figura 4B).

Impactos no dossel medidos no campo

As aberturas médias no dossel medidas no campo foram estatisticamente diferentes entre os tipos de exploração e a floresta nativa. Em Paragominas, essa abertura foi 13% maior na EM e 26% maior na EC comparando com a floresta nativa. Entre os tipos de exploração nesse sítio, a abertura foi 7% maior na EC em relação à EM (Tabela 2, Figura 2). Em Sinop, as aberturas no dossel foram 22% maior na EM e 26% maior na EC comparadas à floresta nativa, e 4% maior na EC em relação à EM (Tabela 2 e Figura 2).

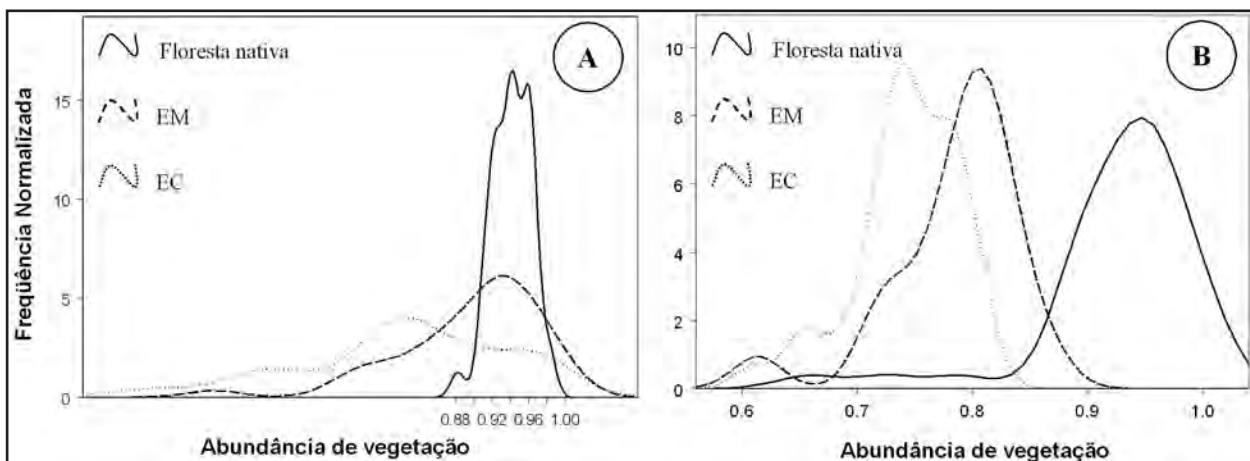


Figura 3. Histogramas das imagens de abundância de vegetação em áreas de floresta nativa, exploração manejada (EM) e exploração convencional (EC) em Paragominas - PA (A) e Sinop - MT (B).

Figure 3. Histograms of the vegetation fraction images to intact forest, managed logging (EM) and conventional logging (EC) of Paragominas - PA (A) and Sinop - MT (B).

Tabela 3. Análise temporal da abundância de vegetação em áreas de exploração manejada (EM) e exploração convencional (EC) nas regiões de Paragominas - PA e Sinop - MT.

Table 3. Temporal analysis of vegetation fraction images to managed logging (EM) and conventional logging (EC) in the regions of Paragominas - PA and Sinop - MT.

Sítio	Tipo de exploração	Volume explorado (m ³ /ha)	Idade da exploração		
			1 ano antes (n=3)	Exploração (n=3)	1 ano depois (n=3)
Paragominas	Manejada	32	0,94 (0,01)a	0,90 (0,02)b	0,90 (0,02)b
	Convencional	33	0,93 (0,01)a	0,83 (0,01)b	0,87 (0,02)c
Sinop	Manejada	35	0,93 (0,01)a	0,79 (0,01)b	0,84 (0,01)c
	Convencional	34	0,93 (0,01)a	0,74 (0,01)b	0,81 (0,02)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.

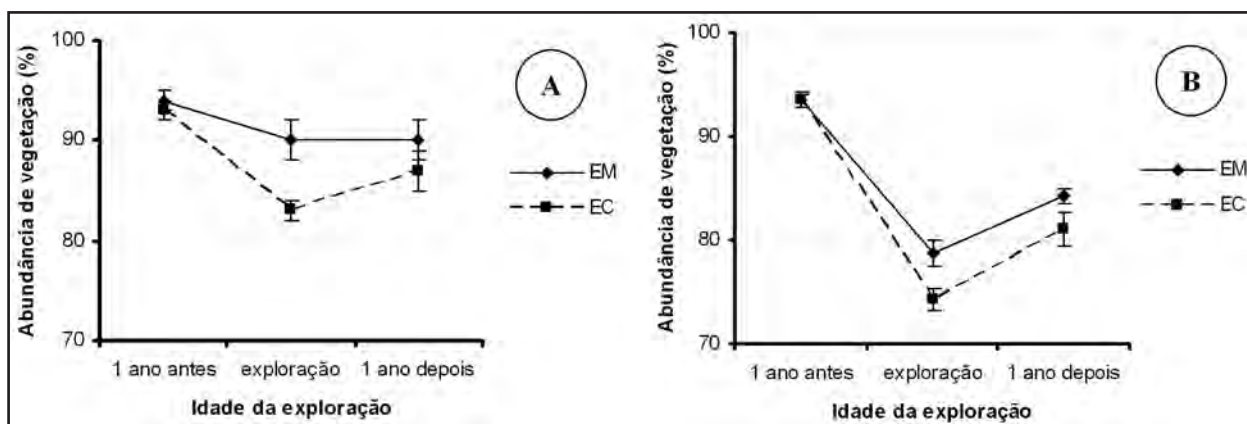


Figura 4. Análise temporal da abundância de vegetação normalizada em áreas de exploração manejada (EM) e exploração convencional (EC) em Paragominas - PA (A) e Sinop - MT (B).

Figure 4. Temporal analysis of the vegetation fraction image to managed logging (EM) and conventional logging (EC) of Paragominas - PA (A) and Sinop - MT (B).

DISCUSSÃO

As diferenças da abundância de vegetação e da abertura no dossel entre as EMs e as ECs observadas neste estudo mostram os distintos impactos dessas explorações na floresta. A redução maior da abundância de vegetação na EC é justificada pela maior perda do dossel em consequência das aberturas excessivas de estradas, pátios de estocagem e derrubada de árvores. Asner *et al.* (2002), analisando imagens de fração da abertura no dossel (canopy gap fraction) em ambiente de derrubada de árvores entre EC e EM na Amazônia Oriental, encontraram valores de duas a três vezes maiores na EC em relação à EM. Pereira *et al.* (2002), através de medições no campo, comprovaram que os danos na copa em exploração convencional chegam a ser o dobro daqueles da exploração manejada.

A análise temporal mostrou que as reduções da abundância de vegetação na EC e na EM, comparadas à floresta nativa, foram significativas mesmo um ano após a exploração. SOUZA JR. *et al.* (2005) comprovaram que a distinção entre ambientes de floresta nativa e floresta explorada convencionalmente através de imagem de abundância de vegetação pode ser feita até um ano após a extração. O maior incremento da abundância de vegetação na EC em relação à EM, observado um ano após as explorações, foi

devido, em grande parte, à regeneração de espécies pioneiras e cipós, favorecida pela entrada excessiva de luminosidade pela maior abertura no dossel na EC (MONTEIRO *et al.*, 2004). As diferentes intensidades de regeneração observadas um ano após a extração manejada entre Paragominas e Sinop podem ser explicadas pelo fato de a floresta do primeiro sítio ser mais densa do que a do segundo. Não se considerou na análise temporal a variação fenológica das espécies por causa da grande variabilidade intra e interespecífica da floração, frutificação e disseminação dessas espécies em relação à época, duração e frequência desses eventos (LEÃO *et al.*, 2001).

A redução significativa da abundância de vegetação na EC comparada à EM pode ser observada nas áreas exploradas em Paragominas (Figura 5A e 5B). Comparando as imagens de abundância de vegetação nos dois tipos de exploração, notaram-se tons de cinza mais claro na EC (Figura 5B), caracterizado pela maior perda do dossel. Nessa área, também foi possível distinguir os impactos da EM e da EC pela forma de suas cicatrizes. Na área explorada com manejo, essa cicatriz tinha uma forma regular (retilínea), que demonstra o planejamento da exploração (Figura 5A). Por outro lado, na área explorada sem manejo, o não planejamento das operações deixou uma cicatriz irregular (não retilínea) (Figura 5B).

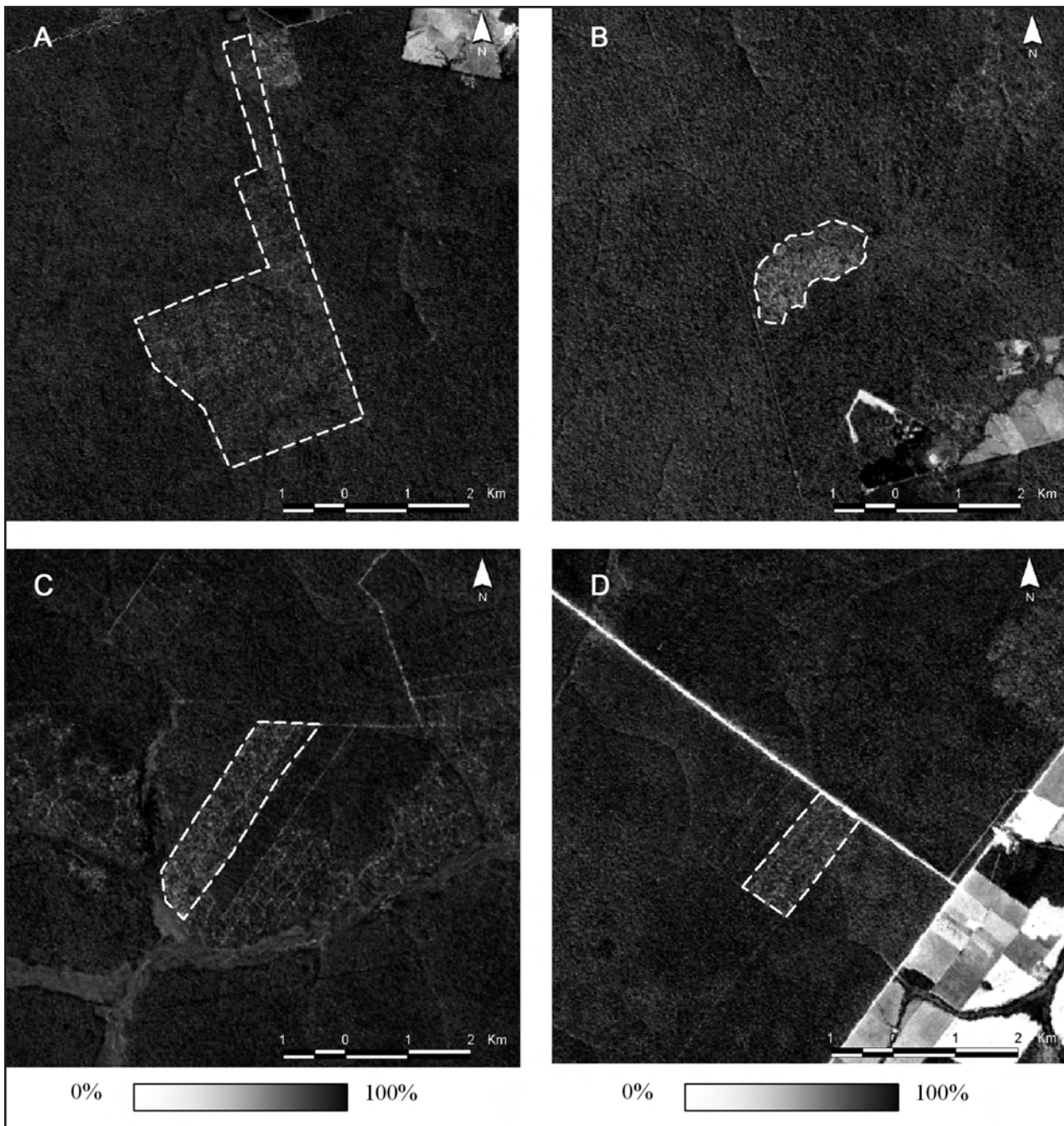


Figura 5. Comparação das imagens de abundância de vegetação entre áreas de exploração manejada (A e C) e exploração convencional (B e D) na região de Paragominas - PA (A e B) e Sinop - MT (C e D).

Figure 5. Comparison of vegetation fraction images to managed logging (A e C) and conventional logging (B e D) in the regions of Paragominas - PA (A and B) and Sinop - MT (C and D).

Em Sinop, embora a análise estatística tenha mostrado diferença significativa da abundância de vegetação entre a EC e a EM, não foi possível distinguir visualmente os impactos (Figura 5C e 5D) (Tabela 2). Isso pode estar associado ao fato de as áreas deste sítio serem cobertas por floresta de transição, uma floresta menos densa comparada à floresta ombrófila de Paragominas. Além disso, as diferenças da abundância de vegetação entre a EC e a EM foram menores em Sinop comparadas às de Paragominas, o que pode explicar a baixa distinção visual dos impactos. Em Sinop, particularmente, não foi possível distinguir os dois tipos de exploração apenas pela

forma de suas cicatrizes, pelo fato de elas terem sido semelhantes. Neste caso, devem-se considerar outros indicadores para avaliar a qualidade do planejamento da exploração madeireira, tais como: a densidade e a distância entre pátios de estocagem e entre estradas (Monteiro, 2005).

A foto hemisférica é uma ferramenta potencial para o monitoramento dos impactos no dossel pela exploração madeireira no campo, o que possibilita distinguir EM de EC. Dessa forma, as agências ambientais poderiam fazer a análise de fotos hemisféricas do dossel, tomadas em ambientes de estradas, pátios de estocagem, ramais de arraste e derrubada de árvores, para avaliar

a qualidade do manejo florestal. Em seguida, poderiam associar os resultados dessa análise àqueles obtidos nas imagens de abundância de vegetação.

A metodologia deste estudo apresenta grandes implicações para a fiscalização e monitoramento dos planos de manejo florestal em operação na Amazônia. Indicadores de manejo florestal monitorados em campo como a redução do impacto no dossel, juntamente com os indicadores relacionados à instalação da infra-estrutura (pátios e estradas), ao respeito às Áreas de Preservação Permanente (APPs), à exploração na Unidade de Produção Anual (UPA) e à proteção florestal contra incêndios, poderiam ser monitorados remotamente através de imagens de satélite LANDSAT (MONTEIRO, 2005). Esses indicadores poderiam revelar se o manejo florestal foi planejado de forma a minimizar os impactos da exploração. Além disso, este método tem potencial para diminuir os custos de fiscalização no campo pelas agências ambientais e certificadoras florestais.

CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que é possível monitorar o manejo florestal utilizando imagens LANDSAT ETM+ em floresta ombrófila densa e de transição na Amazônia. Esta imagem pode ser usada para avaliar o nível dos impactos no dossel como um indicador de manejo florestal, ou seja, se a exploração madeireira foi conduzida obedecendo às técnicas prescritas nos planos de manejo florestal.

O método mostrou que a detecção dos impactos no dossel pode ser feita pelo menos um ano após a exploração madeireira. Por último, esta técnica tem potencial para ser incorporada em programas de monitoramento da atividade madeireira pelas agências ambientais e certificadoras florestais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Cikel Brasil Verde S.A., à Maracaí Florestal e à Coimal – Comércio e Indústria de Madeira Ltda. pelo apoio logístico e operacional e por cederem áreas para este estudo. Agradecem também à Fundação Gordon & Betty Moore por seu apoio financeiro ao trabalho de campo e à Fundação FORD e à CAPES pelo apoio ao programa de mestrado de André Monteiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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*, New York, v.80, p. 483-496, 2002.
- BARRETO, P.; SOUZA JR., C.M. **Controle do desmatamento e da exploração madeireira na Amazônia: diagnósticos e sugestões: relatório técnico do Componente III, PPG-7 / Promanejo**. Belém: IBAMA, 2001. 32p.
- BOARDMAN, J.W.; KRUSE, F.A.; GREEN, R.O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. *JPL Publications*, Pasadena, v.1, p.23-26, 1995.
- CARLOTTO, M.J. Reducing the effects of space varying, wavelength dependent scattering in multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.20, n.17, p.3333-3344, 1999.
- 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: relatório técnico**. Ananindeua: Scientific Certification Systems, 2001. 39p.
- GERWING, J.J. Degradation of forests through logging and fire in the eastern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v.157, p.131-141, 2002.
- HOLDSWORTH, A.R.; UHL, C. Fire in Amazonian selective logged rain forest and the potential for fire reduction. *Ecological Applications*, Washington, v.7, n.2, p.713-725, 1997.
- IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Manual de vistoria de campo para planos de manejo florestal madeireiro na Amazônia**. Brasília: Embrapa Amazônia Oriental / Ibama ProManejo, 2006. 106p.
- JOHNS, J.S.; BARRETO, P.; UHL, C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v.89, n.1/3, p.59-77, 1996.

- LEÃO, N.V.M.; CARVALHO, J.O.P. Fenologia reprodutiva de 25 espécies arbóreas da Amazônia. In: SILVA, J.N.M.; CARVALHO, J.O.P.; YARED, J.A.G. **A silvicultura na Amazônia Oriental: contribuições do Projeto Embrapa/DFID**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental / DFID, 2001. 459p.
- LENTINI, M.; PEREIRA, D.; CELETANO, D.; PEREIRA, R. **Fatos florestais da Amazônia 2005**. Belém: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2005. 140p. Disponível em: <<http://www.imazon.org.br>> Acesso em: 16 ago. 2006.
- MARTINI, A.; ROSA, N.; UHL, C. An attempt to predict which Amazonian tree species may be threatened by logging activities. **Environmental Conservation**, Lausanne, v.21, n.2, p.152-162, 1994.
- MONTEIRO, A.L. **Monitoramento de indicadores de manejo florestal na Amazônia Legal utilizando sensoriamento remoto**. 2005. 105p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- MONTEIRO, A.L.; SOUZA JR, C.; BARRETO, P. Detection of logging in Amazonian transition forest using spectral mixture models. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.1, n.24, p.151-159, 2003.
- MONTEIRO, A.L.; SOUZA Jr, C.; BARRETO, P.; PANTOJA, F.; GERWING, J. Impactos da exploração madeireira e do fogo em florestas de transição da Amazônia Legal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.65, p.11-21, 2004.
- PEREIRA, R.; ZWEEDE, J.C.; ASNER, G.P.; KELLER, M.M. Forest canopy damage and recovery in reduced impact and conventional selective logging in Eastern Para, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.168, p.77-89. 2002.
- RADAMBRASIL. DEPARTAMENTO DE PRODUÇÃO MINERAL. PROJETO RADAMBRASIL, LEVANTAMENTO DE RECURSOS NATURAIS. **Folha SC.21 Juruena**. Rio de Janeiro, 1981. v.20, p.39-40.
- READ, J.; 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**, Oxford, v.40, p.592-600, 2003.
- ROBERTS, A.D.; BATISTA, G.T.; PEREIRA, J.L.G.; WALLER, E.K.; NELSON, B.W. Change identification using multitemporal spectral mixture analysis: applications in Eastern Amazonia. In: ELVIDGE, C.; LUNETTA, R. (Eds). **Remote sensing change detection: environmental monitoring applications and methods**. Chelsea: Ann Arbor Press, 1998. p.137-161.
- SOUZA JR., C.; BARRETO, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.21, 173-179, 2000.
- SOUZA JR., C.; BARRETO, P.; MONTEIRO, A.L. Exploração madeireira na Amazônia: é possível monitorar por satélite. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v.33, n.197, p.62-65, 2003b.
- 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**, New York, v.87, p.494-506, 2003a.
- SOUZA JR., C.; ROBERTS, D.A.; MONTEIRO, A.L. Multitemporal analysis of degraded forests in the Southern Brazilian Amazon. **Earth Interactions**, Madison, v.9, n.19, p.1-25, 2005.

Recebido em 01/12/2006
Aceito para publicação em 19/10/2007