

Estimativa de volume de madeira explorada com imagens de satélite: aplicações para o monitoramento de planos de manejo florestal na Amazônia

André Monteiro¹
Carlos Souza Jr.¹
Márcio Sales¹

¹IMAZON – Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
Rua Domingos Marreiros, 2020 – Altos, Umarizal
Belém, Pará, 66.060-160, Brasil
{andreluiz, souzajr, marciosales}@amazon.org.br

Abstract The objective of this study was evaluate the correlation between the volume harvested from forest management plans and the fraction images (GV, NPV and soil)/spectral indexes (NDFI – *Normalized Difference Fraction Index* and NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) obtained from LANDSAT image to estimate the selective logging intensity and corroborate to distinguish managed from conventional logging in the eastern Amazon, Brazil. The results showed high correlation to managed logging between the volume and the NDFI ($R^2 = 0.89$), GV_{norm} ($R^2 = 0.87$), NPV ($R^2 = 0.86$) and soil ($R^2 = 0.82$), showing that the impacts due to managed logging are direct related to the logging intensity. While to conventional logging was observed low correlation between the volume and the fraction images and the spectral indexes, showing that the impacts due to conventional logging are not direct related to the logging intensity. Therefore, is possible to distinguish managed from conventional logging through the correlation between the volume and GV_{norm} , NPV, soil and NDFI. Also, is possible to estimate the volume harvested through these fraction images and spectral index when the area is logged with forest management practices.

Palavras chaves: exploração madeireira, Amazônia, LANDSAT, mistura espectral, índice espectral, selective logging, amazon, spectral mixture models, spectral index.

1. Introdução

A exploração seletiva de madeira na Amazônia com produção de 24 milhões de metros cúbicos e a geração de 379,6 mil empregos diretos e indiretos, é uma das principais atividades econômicas na região (Lentini, 2005). Entretanto, a madeira extraída de áreas “bem manejadas” representa apenas 3,4% da área total necessária para suprir sustentavelmente a demanda de madeira na Amazônia (Barreto et al, 2005).

O tipo de exploração de madeira predominante na região é a convencional (predatória), representando 90% do total extraído (MMA, 2004). Esta exploração gera mais impactos ambientais quando comparada a exploração que utiliza técnicas de manejo florestal. Estudos de campo têm sido usados para quantificar e distinguir os impactos causados por estas explorações (Johns et al, 1992; Pereira et al, 2002). Entretanto, a atividade madeireira ocorre em áreas extensas e longínquas espalhada por toda região amazônica, o que torna o seu monitoramento no campo dispendioso e demorado.

O uso de imagens de satélite tem sido uma ferramenta promissora na detecção e quantificação dos impactos causados pela exploração de madeira na Amazônia (Asner et al, 2002; Souza Jr et al, 2003; Souza Jr et al, 2005a). Além disso, estas imagens têm possibilitado monitorar a atividade madeireira em grande parte da região amazônica (Asner et al, 2005). Entretanto, ainda não há estudos para estimar a intensidade de exploração madeireira através de imagens de satélite.

Este estudo objetiva avaliar a correlação entre o volume explorado de planos de manejo florestal e as imagens de abundância/índices espectrais obtidos de imagem LANDSAT para estimar a intensidade explorada e corroborar para distinguir exploração convencional de exploração manejada na Amazônia Oriental.

2. Área de estudo

O estudo foi conduzido no nordeste do Estado do Pará, abrangendo os municípios de Ipixuna, Paragominas, Tailândia e Tomé-açu (Figura 1). A região é coberta 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, encontra-se também Plintossolos, Gleissolos e Neossolos; o clima caracteriza-se por uma estação seca no período de julho a novembro e uma chuvosa de dezembro a junho, com média anual pluviométrica variando entre 1800 a 2000 mm, e temperatura média anual variando entre 24° e 26° C (RADAMBRASIL, 1983). Foram selecionadas áreas de exploração convencional e exploração manejada de 2002 e 2003, com intensidades diferentes, para observar a dinâmica dos impactos da exploração ao longo do tempo.

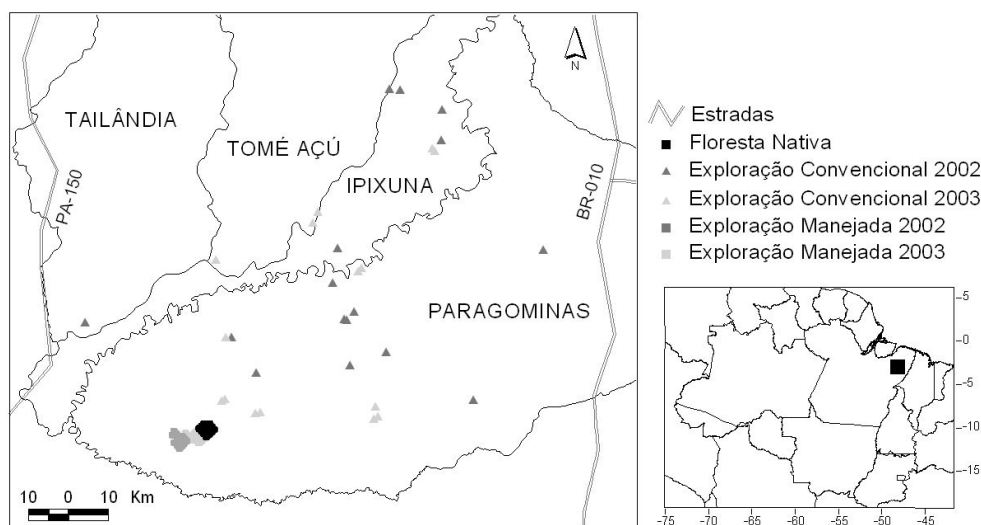


Figura 1. Localização da área de estudo.

3. Metodologia

3.1. Correção Geométrica e Atmosférica

Foram utilizadas imagens LANDSAT TM (223/62 e 223/63 de 16/07/2003). As imagens foram corrigidas geometricamente pelo método de reamostragem do vizinho mais próximo, através do programa ENVI[®] 4.0, utilizando como imagem base o mosaico MrSid (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>). Foi assumido um erro médio quadrático (RMS) menor que 1 pixel.

Foi aplicada nas imagens a correção atmosférica disponível no programa ACORN[®] 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 do modelo de correção atmosférica por uma análise de sensibilidade de tentativa e erro da reflectância de um objeto escuro. Os parâmetros foram de 40 milímetros para vapor d'água e de 50 quilômetros para visibilidade atmosférica da imagem.

Por último, foi aplicado o algoritmo *haze correction*, desenvolvido em IDL[®] (*Interactive Data Language*), para minimizar os efeitos ocasionados por neblina e fumaça nas imagens (Carlotto, 1999).

3.2. Modelo de Mistura Espectral

O modelo linear de mistura espectral foi aplicado, utilizando o ENVI[®] 4.0, nas imagens LANDSAT para estimar as abundâncias de sombra, solo, vegetação, NPV (vegetação seca) e erro RMS. Primeiramente, os pixels puros (*endmembers*) foram identificados na imagem referência com o algoritmo PPI (*Pixel Purity Index*) (Boardman et al, 1995). Os pixels puros finais foram selecionados na imagem de PPI, através do visualizador n-dimensional do ENVI, onde foi identificada a localização dos mesmos na imagem original e extraído as curvas espectrais destes pixels. Foram selecionadas como candidatas à pixel puro, as curvas que melhor representaram o comportamento espectral de sombra, solo, vegetação e NPV. A modelagem de mistura espectral foi determinada por:

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

para:

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

onde DN_b é o número digital da banda b ; F_i é a abundância do “endmember” i ; $DN_{i,b}$ é o número digital relativo do “endmember” i , na banda b ; e ε_b é o erro na banda b .

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 através de:

$$VEG_{norm} = VEG / (100 - SOMBRA) * 100 \quad (3)$$

onde VEG é a abundância de vegetação; e SOMBRA é a abundância de sombra.

3.3. Índices espectrais

Foram aplicadas nas imagens LANDSAT os índices espectrais NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*; Rouse et al, 1974) e NDFI (*Normalized Difference Fraction Index*; Souza Jr. et al, 2005a). O NDVI foi utilizado para obter uma imagem para realçar a vegetação e distinguir áreas de floresta nativa de floresta explorada. Este índice foi obtido da razão entre a diferença e a adição das bandas 4 e 3 do LANDSAT, sendo:

$$NDVI = (b_4 - b_3) / (b_4 + b_3) \quad (4)$$

O NDFI foi utilizado para realçar as cicatrizes da exploração madeireira (Souza Jr. et al, 2005a). Este índice foi obtido da razão entre a diferença e a adição das abundâncias de VEG, NPV e SOLO, sendo:

$$NDFI = (VEG_{norm} - (NPV + SOLO)) / (VEG_{norm} + NPV + SOLO) \quad (5)$$

onde VEG_{norm} é a abundância de vegetação normalizada; NPV é a abundância de NPV (vegetação seca); e SOLO é a abundância de solo.

3.4. Análise estatística

Foram selecionadas 15 amostras aleatórias (63 pixels cada) representativas de exploração convencional (EC), exploração manejada (EM) e floresta nativa (Flor. Nativa), nas imagens de abundância (VEG, VEG_{norm} , NPV e SOLO) e de índices espectrais (NDVI e NDFI). A seleção das amostras foi feita em áreas de exploração executadas em 2002 e 2003 (Tabela 1).

Foram geradas regressões destas amostras vs. o volume explorado para exploração convencional e exploração manejada para determinar o grau de correlação entre o volume e as imagens de abundância (VEG, VEG_{norm} , NPV e SOLO) e os índices espectrais (NDVI e NDFI). As informações de volume foram obtidas através das empresas madeireiras e da base de dados do Ibama/Sisprof.

Foi aplicado o teste de comparação múltipla de Duncan com taxa de erro de 0,05% para testar a variação temporal entre as ECs e entre as EMs. Além disso, foi avaliada a ocorrência de diferença significativa entre exploração convencional, exploração manejada e floresta nativa. Finalizando, foram determinadas as curvas de densidade cumulativa com intervalos de confiança de 95% para floresta nativa, exploração convencional e manejada, de maneira a criar um modelo empírico para avaliar a qualidade do manejo florestal quanto ao impacto da exploração no dossel.

4. Resultados e Discussão

4.1. Correlação entre volume e imagens de abundância/índices espectrais

Os resultados mostraram alta correlação para exploração manejada entre o volume explorado e as imagens NDFI ($R^2 = 0,89$), VEG_{norm} ($R^2 = 0,87$), NPV ($R^2 = 0,86$) e SOLO ($R^2 = 0,82$) (Figuras 2 e 3). Por outro lado, observamos baixa correlação para exploração convencional entre o volume explorado e as imagens de abundância (VEG, VEG_{norm} , NPV e SOLO) e os índices espectrais (NDFI e NDVI) (Figura 4). A avaliação mostrou que o volume explorado é diretamente proporcional as imagens NPV, SOLO e NDVI, e inversamente proporcional as imagens VEG, VEG_{norm} e NDFI (Figura 3).

A alta correlação na exploração manejada pode ser explicada pela abertura homogênea de clareiras (densidade e tamanho) referentes a pátios, estradas e derrubada de árvore. Neste caso, os impactos causados pela exploração manejada estão diretamente relacionados com a intensidade explorada. Assim como, a baixa correlação na exploração convencional pode ser devido à abertura excessiva e heterogênea de clareiras, ou seja, os impactos causados por esta exploração independem da intensidade explorada.

Portanto, é possível estimar o volume explorado em áreas exploradas com técnicas de manejo florestal utilizando as imagens NDFI, VEG_{norm} , NPV e SOLO. Além disso, é possível distinguir se a área foi explorada de forma convencional ou manejada.

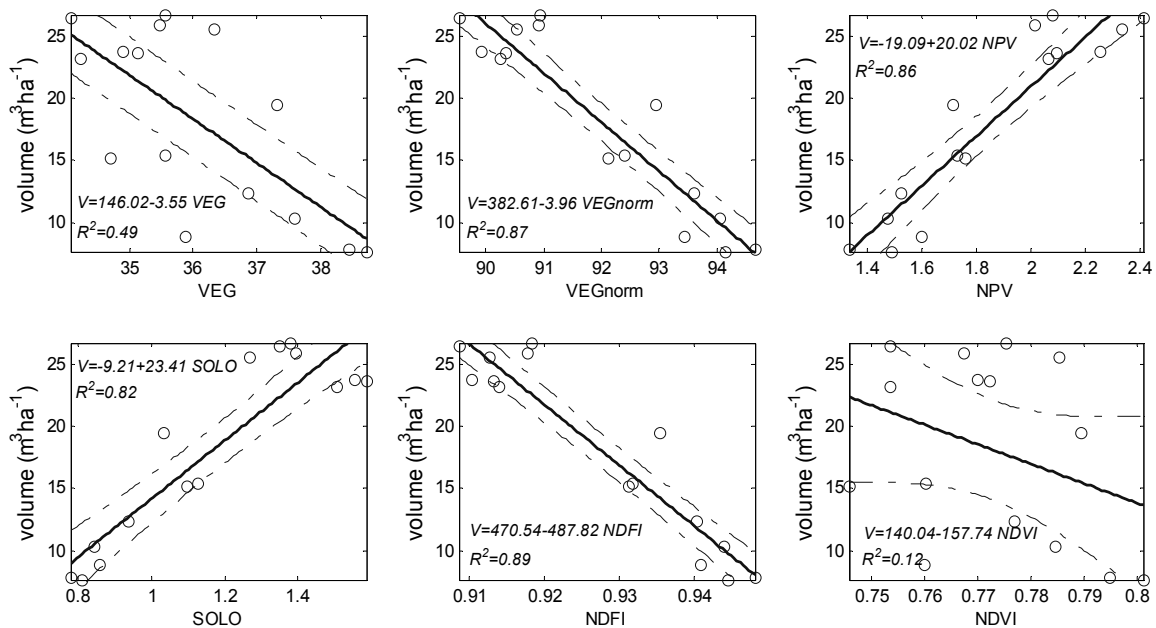


Figura 3. Correlação entre o volume e as imagens VEG, VEG_{norm}, NPV, SOLO, NDFI e NDVI para exploração manejada de 2003.

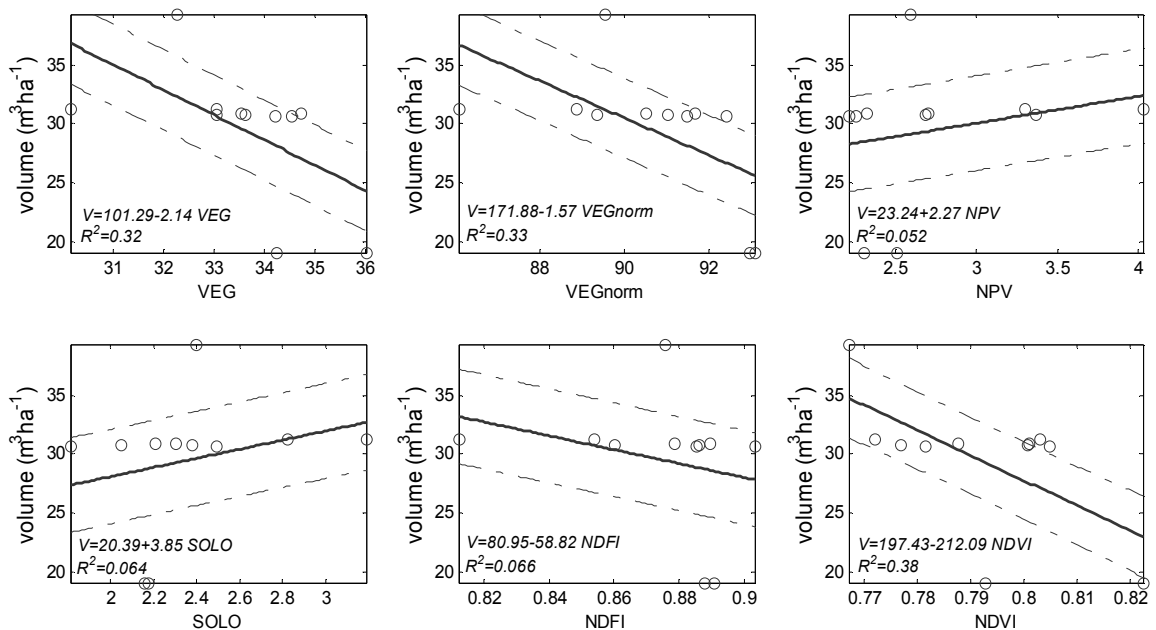


Figura 4. Correlação entre o volume e as imagens VEG, VEG_{norm}, NPV, SOLO, NDFI e NDVI para exploração convencional de 2003.

4.2. Variação temporal

Ao avaliar a exploração convencional e exploração manejada ocorridas em 2002 e 2003 na imagem de 2003, observamos a variação temporal (regeneração da floresta) nas imagens de abundância de VEG, VEG_{norm}, NPV e SOLO, e nos índices NDFI e NDVI. Ao considerar as baixas variações entre as intensidades de exploração de 2002 e 2003, podemos afirmar que os

altos valores de 2002, comparado a 2003, de VEG, VEG_{norm}, NDFI e NDVI, e baixos valores de NPV e SOLO são devidos à regeneração de ~1 ano da floresta (Tabela 1). Análises utilizando mistura espectral têm mostrado que 50% da abertura de copa, causada pela exploração seletiva de madeira, é fechada um ano após a extração (Asner et al, 2004).

A análise estatística mostrou diferença significativa entre 2002 e 2003 para todas as imagens de abundância e índices espectrais, exceto entre as imagens de abundância de SOLO em exploração manejada (Tabela 1). Valores maiores de VEG, NDVI e menores de NPV e SOLO para exploração convencional e manejada também foram observados um ano após a extração na região de Sinop – MT (Souza Jr. et al, 2005b).

As maiores diferenças nos valores de VEG, VEG_{norm}, NPV, SOLO e NDFI entre 2002 e 2003 foram observadas na exploração convencional. Isto se deve as maiores aberturas das clareiras (pátios, estradas e derrubada de árvore) nesta exploração, as quais favorecem a proliferação de espécies pioneiras e cipós devido à maior entrada de luz no interior da floresta.

Por outro lado, a maior diferença nos valores de NDVI entre 2002 e 2003 foi observada na exploração manejada. Isto é explicado por esta exploração apresentar menor influência de solo exposto, o qual apresenta maior reflectância no vermelho, quando comparado à exploração convencional. Souza Jr. et al (2005b) também encontrou valores maiores de NDVI um ano após a extração em exploração manejada.

Considerando a variação temporal nas imagens, podemos afirmar que a estimativa do volume explorado através das imagens NDFI, VEG_{norm}, NPV e SOLO pode ser feita em áreas exploradas recentes e com baixo impacto, ou seja, a imagem de satélite deve ter sido capturada aproximadamente no mesmo ano da execução da exploração.

Tabela 1. Média (Desvio Padrão) de VEG, VEG_{norm}, NPV, SOLO, NDFI e NDVI para Exploração Manejada (EM) e Exploração Convencional (EC) obtidos na imagem de 2003. Os valores em negrito mostram diferença significativa entre as explorações manejadas e entre as explorações convencionais de 2002 e 2003, utilizando o teste de Duncan com P<0,05.

Ano da exploração	Idade da exploração (meses)	Tratamento	Volume (m ³ /ha)	VEG (%)	VEG _{norm} (%)	NPV (%)	SOLO (%)	NDFI	NDVI
2002	11	EM	23 (6)	38 (1)	95 (1)	1 (0)	1 (0)	0,95 (0,01)	0,79 (0,01)
		EC	31 (4)	40 (2)	96 (1)	1 (0)	1 (0)	0,86 (0,03)	0,82 (0,03)
2003	1,5	EM	18 (7)	29 (1)	80 (3)	5 (0)	3 (0)	0,93 (0,01)	0,74 (0,01)
		EC	29 (6)	26 (3)	68 (5)	6 (1)	6 (1)	0,68 (0,06)	0,80 (0,03)

4.3. Modelo empírico da qualidade do manejo florestal

A Figura 5 mostra as curvas de densidade acumulada das imagens VEG, VEG_{norm}, NPV, SOLO, NDFI e NDVI para floresta nativa (Flor. Nativa), exploração convencional (EC) e exploração manejada (EM). Observamos que estes ambientes são visualmente distintos nestas imagens.

As imagens VEG, VEG_{norm}, NPV, SOLO, NDFI e NDVI foram estatisticamente diferentes entre as explorações (manejada e convencional) e a floresta nativa (teste de Duncan; P<0,05%). Estas imagens também apresentaram diferenças significativas entre as explorações manejada e convencional; exceto para a imagem NPV que não apresentou diferença significativa. Portanto, é possível criar um modelo empírico para inferir a qualidade do manejo florestal através da avaliação das curvas de densidade acumulada das imagens VEG, VEG_{norm}, NPV, SOLO e NDFI extraídas de áreas submetidas a exploração madeireira.

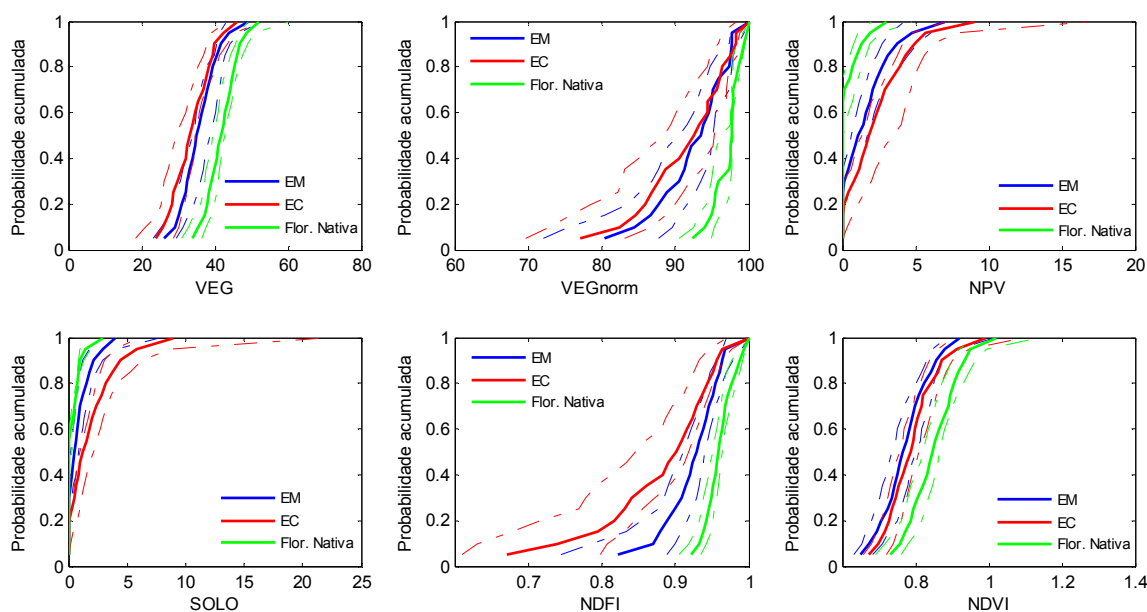


Figura 5. Curvas de densidade acumulada (linhas contínuas) das imagens VEG, VEG_{norm}, NPV, SOLO, NDFI e NDVI para floresta nativa (verde), exploração convencional (vermelho) e exploração manejada (azul) com os respectivos intervalos de confiança (linhas tracejadas).

5. Conclusão

O presente estudo mostrou que o volume explorado possui alta correlação com as imagens NDFI, VEG_{norm}, NPV e SOLO quando a exploração é conduzida com técnicas de manejo florestal (baixo impacto) e baixa correlação quando a exploração é realizada de forma convencional (alto impacto). Dessa forma seria possível estimar a intensidade da exploração com manejo através das imagens NDFI, VEG_{norm}, NPV e SOLO.

Além disso, este estudo corrobora com outros estudos para distinguir exploração manejada de exploração convencional através da avaliação das correlações entre o volume e as imagens NDFI, VEG_{norm}, NPV e SOLO, e através das curvas de densidade acumulada destas imagens.

Este método poderia ser utilizado como um dos critérios de seleção e amostragem dos planos de manejo florestal a serem vistoriados anualmente no campo pelos órgãos ambientais. Finalizando, o método poderia ser utilizado como uma ferramenta de monitoramento de áreas sob certificação e concessão florestal.

Agradecimentos

Agradecemos a Cikel Brasil Verde S.A. e ao Ibama por disponibilizarem informações de intensidade de exploração dos planos de manejo deste estudo, e ao apoio financeiro a pesquisa da Fundação Gordon & Betty Moore.

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.
- 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**, 14(4), 280-298, 2004.
- 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**, Report, 310, 480-482, 2005.
- Barreto, P., Souza Jr, C., Noguerón, R., Anderson, A., Salomão, R. **Pressão Humana na Floresta Amazônica Brasileira**. WRI Report. Belém: WRI; Imazon, 2005. 84p.
- 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.
- Carlotto, M. J. Reducing the effects of space varyin, wavelength dependent scattering in multispectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 20(17), 3333-3344, 1999.
- Johns, J. S., Barreto, P., Uhl, C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. **Forest Ecology Management**, 89(1-3):59-77, 1996.
- Lentini, M.; Pereira, D.; Celentano, D.; Pereira, R. **Fatos Florestais da Amazônia 2005**. Belém: Imazon. 140 p.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Amazônia Legal**. Brasília: MMA/SBF, 2004, 156p.
- Pereira, R., Zweede, J. C., Asner, G. P., Keller, M. M. 2002. Forest canopy damage and recovery in reduced impact and conventional selective logging in Eastern Para, Brazil, **Forest Ecology and Management**, 168, 77-89, 2002.
- Radambrasil. **Projeto RADAMBRASIL: 1973-1983, Levantamento de Recursos Naturais, Vol. 4**. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Rio de Janeiro, 1983.
- Rouse, J. W., R. H. Haas., J. A. Schell., D. W. Deering., J. C. Harlan. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**. NASA GSFC Type III Final Rep, Greenbelt, MD, 1974. 371p.
- Souza Jr., C., Monteiro, A. & Barreto, P. Exploração madeireira na Amazônia: é possível monitorar por satélite. **Ciência Hoje**, 197 (2003): 62-65.
- Souza Jr., C., Roberts, D., Cochrane, M. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. **Remote Sensing of Environment** 98 (2005a) 329-343.
- Souza Jr., C., Roberts, D., Monteiro, A. Multitemporal Analysis of Degraded Forests in the Southern Brazilian Amazon. **Earth Interactions**, v. 9, 19, 2005b.