

Mapeamento de corte seletivo na floresta amazônica utilizando dados do sensor ASTER e análise de correlação

Luiz Eduardo Vicente¹
Édson Luis Bolfe^{1,2}
Carlos Roberto de Souza Filho¹
Gustavo Manzon Nunes³

¹Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/IG
6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
{vicente; bolfe, beto}@ige.unicamp.br

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA/CPATC
Caixa Postal 44 - 49025-040 - Aracaju - SE, Brasil
Cbolfe@cpatc.embrapa.br

³Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção a Amazônia – CENSIPAM
CTO-Porto Velho/RO – Av. Lauro Sodré,6500 – 78903-711– Porto Velho-RO, Brasil
gustavo.nunes@sipam.gov.br

Abstract. Selective logging is often considered a sustainable exploration model to the Amazon rain forest. It comprises a practice of removing a small tract of forest, leaving behind some trees and remnants of vegetation that function as soil protection. The monitoring of selective logging areas represents an important issue for remote sensing, because involves small targets with heterogeneous characteristics (mixture of soil and vegetation) in large terrains. In this view, this work introduces a mapping method of selective logging areas through multispectral remote sensing and geostatistical techniques. This was accomplished using a spectral index with emphasis in the ASTER Short Wave Infrared (SWIR) bands (1.60 to 2.43 μm) and correlation analysis. The approach allowed the mapping of selective logging areas by the presence of non-photosynthetic vegetation (NPV) over the soil.

Palavras-chave: remote sensing, Amazon deforestation, ASTER, short wave infrared, correlation analysis, selective logging, sensoriamento remoto, desflorestamento da floresta amazônica, infravermelho de ondas curtas, análise de correlação, corte seletivo.

1. Introdução

Desde a década de 70, levantamentos baseados em sensoriamento remoto têm sido realizados para se avaliar o processo de uso e ocupação humana na Amazônia. O INPE iniciou o primeiro levantamento das áreas desflorestadas no período de 1973 a 1978 e, desde 1988, vem produzindo estimativas anuais das taxas de desflorestamento da Amazônia Legal por meio do Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia/Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite – PRODES (INPE, 2007). Como resultado desses estudos, tem sido possível estimar a extensão e taxas de desflorestamento da Amazônia Legal (inclusive por Estado), subsidiando inúmeros outros estudos relacionados ao desflorestamento e sua correlação com núcleos urbanos com infra-estrutura, proximidades de áreas pioneiras de desflorestamento e das principais estradas e rodovias.

A Amazônia Legal, com mais de 710.000 Km² de áreas desflorestadas ao longo de seus nove estados em 2007 (INPE, 2007) (18 % da área total de floresta), apresenta padrões distintos de ocupação agrária, principalmente em função da grande escala de abrangência. A contribuição de pequenos agricultores e de grandes latifundiários mudou continuamente com a economia e pressão demográfica (Fearnside, 2005). A ocupação do território caracteriza-se por um padrão linear, ao longo dos eixos de circulação fluvial e rodoviária, separadas por grandes massas florestais com população dispersa, terras indígenas e unidades de conservação (Becker, 2001).

O alcance do desflorestamento, conforme diagnosticado por Alves et al. (1999), se dá principalmente até cerca de 50 km a cada lado da rodovia. Apesar da similaridade quanto as elevadas taxas de desflorestamento e uma intensa dinâmica do uso e cobertura das terras, essas regiões apresentam características distintas em seus históricos e evolução da ocupação (Godfrey e Browder, 1996; Becker, 1997 e 1998). Os levantamentos realizados sobre o uso e cobertura das terras e o desflorestamento na Amazônia Legal (INPE, 2007) apontam para regiões que apresentam uma forte e permanente dinâmica territorial, indicando que tais processos têm se concentrado em algumas áreas, principalmente nos estados do Acre, Rondônia, Maranhão e Mato Grosso e Pará.

Dentre esta dinâmica territorial, destaca-se o processo baseado no ciclo desflorestamento/extração da madeira/pecuária/agricultura, de tal sorte que a fronteira de exploração madeireira acompanha a expansão da fronteira agropecuária. Apesar da aparente diminuição do desflorestamento apontada por estudos do INPE em 2005/2006/2007, a atividade madeireira mais tecnificada se encontra em plena expansão, especialmente a exploração seletiva e predatória de espécies valorizadas.

Nepstad et al. (1999) já destacava que as áreas de corte seletivo não são consideradas nas estatísticas de desflorestamento e que a exploração seletiva de espécies mais valorizadas tem a mesma consequência que a chegada dos posseiros, empobrecendo a floresta e a tornando mais suscetível ao fogo. Lentini et al. (2005) relatam que o setor madeireiro (exploração e o processamento industrial de madeira) estão entre as principais atividades econômicas da Amazônia – ao lado da mineração industrial e da agropecuária. Em 2004, o setor extraiu 24,5 milhões de m³ de madeira em tora (aproximadamente 6,2 milhões de árvores). O processamento da madeira ocorre em 82 pólos madeireiros situados principalmente no Pará, Mato Grosso e Rondônia. A matéria prima é destinada tanto ao mercado doméstico (64%), como ao externo (36%). Assim, essa região ocupa a posição de segunda maior produtora de madeira tropical do mundo, atrás apenas da Indonésia.

Apesar da crescente demanda nacional e internacional por madeira certificada, o processo de certificação se instalou timidamente na Amazônia (Becker, 2000). Pouco volume extraído provém de iniciativas que utilizam planos de manejo e corte seletivo de forma legal.

A metodologia para o cálculo da taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal baseada no fracionamento de imagens (Câmara, 2006) está amplamente consagrada no âmbito técnico-científico por meio do PRODES. Porém, é crescente a extração madeireira realizada ilegalmente por meio de cortes seletivos, sendo que esta se caracteriza, conforme Fernandez (2007), pela diminuição da biomassa e alteração das relações geométricas dentro do dossel. A diminuição da biomassa no dossel pode ser direta ou indireta, onde a diminuição direta se dá por extração do material explorado e a indireta por mudança de posição nos estratos verticais de porções de material vegetal que cai devido à derrubada das árvores maiores.

Assim, o grande desafio atual é o mapeamento e a mensuração dessas áreas, pois este sistema de exploração florestal provoca danos irreversíveis ao ecossistema (Asner et al., 2002) e o atual cenário sócio-econômico, legal e técnico-científico, demanda informações mais detalhadas sobre as áreas de corte seletivo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é contribuir com as pesquisas em desenvolvimento que visam identificar e quantificar áreas com corte seletivo por meio da utilização de imagens ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Um diferencial deste sensor encontra-se no conjunto de 5 bandas contíguas no infravermelho de ondas curtas (SWIR - 2.145-2.430 µm). Tradicionalmente, estas bandas vêm sendo utilizadas com sucesso para a detecção de componentes minerais (Souza Filho et al. 2003; Galvão et al 2005). Porém, a região do SWIR abrange também características relacionadas aos componentes bioquímicos da vegetação, conhecida como matéria seca (e.g. amido, celulose, lignina), as quais são fundamentais para o entendimento do conjunto solo/planta e seus estágios de senescência e pubescência. A detecção destes componentes para

o mapeamento de vegetação por sensores multiespectrais ainda é pouquíssimo estudada, sendo que trabalhos recentes indicam um real ganho informacional ao considerar-se o SWIR, conjuntamente com as bandas do visível (VIS – 0.52 – 0.69 μm) e infravermelho próximo (NIR – 0.78-0.86 μm), região do espectro tradicionalmente utilizada neste tipo de estudo (Almeida et al., 2007).

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A área da presente pesquisa compreende a região do município de Tomé-Açu, Pará, entre as coordenadas 2°25'00"/2°25'00" de latitude S e 48°09'09"/48°09'09" de longitude W. Tomé-Açu faz parte da Mesorregião Nordeste Paraense e à Microrregião (IBGE, 2008). Segundo Rodrigues (2001), o relevo é caracterizado por compartimento topográfico bastante simples, tais como, baixos platôs aplainados, terraços e várzeas. Os solos são representados pelos latossolos amarelo distrófico (com textura argilosa média), os solos concrecionários lateríticos, indiscriminados distróficos (com textura indiscriminada), os gleys pouco-úmidos entróficos/distróficos e os aluviais eutróficos/distróficos, em associação. A vegetação original representativa é a Floresta Ombrófila, Floresta Densa dos Baixos Platôs, a Densa de Platôs, atualmente bastante alteradas, ensejando o surgimento das florestas secundárias ou capoeiras. O clima é mesotérmico e úmido – Ami, segundo a classificação de Köppen. A temperatura média é 25°C com precipitação total anual em torno de 2.250mm.

2.1 Pré-processamento imagem ASTER

Foi utilizada uma cena ASTER com data de passagem de 31 de julho de 2000, nas bandas AST1 a AST9 no VNIR-SWIR, no nível 1B de processamento, com correções geométricas e radiométricas aplicadas na versão V003. As 9 bandas do VNIR foram submetidas à correção do efeito crosstalk, conforme descrito em Iwasaki e Tonooka (2005). Em seguida, os dados foram compensados para minimização dos efeitos atmosféricos e corrigidos para reflectância com base no modelo de transferência radiativa (MODTRAN) (ACORN, 2002), considerando parâmetros locais como: ângulo de inclinação terrestre sobre a área de estudo, características climáticas tropicais, coluna de vapor d'água e aerossóis. Isso permitiu a análise direta do comportamento espectral das feições diagnósticas inerentes à composição físico-química dos materiais sob investigação na área de estudo. Dada a forte influência de umidade local e a densa estrutura de dossel, foram aplicadas máscaras para a supressão das frações água e sombra, utilizando as bandas AST1 e AST4. Devido a diferença de resolução espacial entre as bandas do VNIR (15m) e do SWIR (30m), foi realizada uma re-amostragem espacial das bandas do SWIR, aumentando artificialmente sua resolução para 15m, permitindo, assim, a composição de um imagem com 9 bandas espectrais.

2.2 Estratégia de mapeamento de corte seletivo através de dados ASTER

O “corte raso” é um método que visa a supressão total da vegetação nativa com objetivo de implantar outro uso ao solo, como agricultura ou pastagem. O “corte seletivo”, por sua vez, visa a supressão de espécies de interesse comercial pré-selecionadas em meio a floresta. A retirada da árvore dá-se de forma a manter o entorno, seja a título de conservação ou mera camuflagem. Forma-se assim uma pequena clareira na qual sobram restos de vegetação derivada do corte, ou da queda sistemática proveniente da movimentação do dossel ao redor. Do ponto de vista do sensoriamento remoto, os pontos de corte formam um conjunto de difícil detecção, por dois motivos principais: (i) pequena dimensão dos pontos de retirada em meio

ao amplo conjunto de dossel; (ii) ausência de um padrão espectro-radiométrico definido que auxilie na discretização do corte seletivo para mapeamentos de grande escala, visto que solo exposto e vegetação representam um conjunto de dados com comportamento bem definido e razoavelmente bem decorrelacionado ao longo do espectro eletromagnético. Entretanto, as áreas de corte seletivo representam uma mistura entre solo exposto e vegetação devido aos restos de corte deixados no local. Isso gera uma tendência de confusão entre essas áreas, quanto a quantidade de solo exposto e vegetação presentes. Uma forma de abordagem deste problema seria a diferenciação entre vegetação fotossinteticamente ativa (VFA), solo exposto e vegetação não fotossinteticamente ativa (VNFA).

A (VFA) está associada as clorofilas a e b, carotenóides, xantofilas e antocianinas, os quais tem seu comportamento definido no VNIR e sofrem alteração em razão da senescência e morte da planta. Por outro lado, a VNFA está fortemente associada a componentes bioquímicos (CB), como lignina, açúcares e celulose, os quais são mais longevos nos restos vegetais deixados sobre o solo. Por sua vez, esse conjunto de características está associado a região espectral do SWIR (ligações OH) (Almeida & Souza Filho, 2006; Almeida et al., 2007; Perrota et al., 2008). Entretanto, não basta apenas determinar a presença de VNFA, mas sim determinar sua associação ao solo exposto.

3. Resultados e Discussão

Com base nas premissas discutidas anteriormente foram utilizadas operações entre as bandas VNIR/SWIR ASTER para a detecção da VNFA, as quais são descritas na tabela 1.

Tabela 1. Índices espectrais relativos ao sensor ASTER utilizados neste trabalho

Componentes vegetacionais e de solo	Relação de bandas ASTER utilizadas	Referência
Solo (Fe^{3+})	AST2/1	Rowan & Mars, 2003
Componentes bioquímicos genéricos	AST7*8*9	Proposto neste trabalho
Clorofilas (a, b) e carotenóides	AST3/2*1	Adaptação de Almeida et al. (2006).

O índice AST7*8*9 objetiva potencializar a informação relacionada aos componentes bioquímicos associados, principalmente aos comprimentos de onda entre 2.250 – 2350 μm (bandas ASTER 7-9). Neste caso tentou-se reduzir a influência de ligações OH relativas a argilo-minerais no solo, a qual possui forte absorção nas bandas 5 e 6 do ASTER (Galvão et al., 2005; Vicente et al., 2005). Mesmo assim, nota-se através do controle visual de algumas áreas conhecidas em campo que pode ocorrer classificação de pixels associados a solo exposto, sem ou com pouquíssima presença de VNFA. Já a razão AST2/1 visa segregar a informação relativa ao solo exposto por meio de sua relação com óxidos de ferro férrico (Fe^{3+} - hematita, goetita), considerando a feição de absorção na AST1 e maior reflexão na AST2 (Rowan et al., 2003). Neste intervalo de comprimento de onda, a maioria das feições espectrais é controlada por processos eletrônicos de transferência de carga resultantes de trocas de elétrons entre íons do mesmo retículo, e por mudanças de níveis de energia dos cinco orbitais 3d, resultantes da ação de forças eletrostáticas de campo cristalino (Meneses et al., 2001)

Para a determinação da correlação entre o conjunto de pixels associados as variações dos valores de CB e solo exposto foi utilizado um método de agrupamento estatístico simples através de dispersograma. Através da análise de correlação pôde-se segregar no canto superior esquerdo do gráfico os pixels com altos valores de solo exposto (eixo y) associados a presença de VNFA (eixo x) (Fig. 1f). Na imagem ASTER (composição colorida 231) (Fig.

1a), encontram-se pixels mapeados em amarelo utilizando o agrupamento de dados do dispersograma, os quais estão associados as áreas de corte seletivo (Figs. 1b, c, d). Ao longo das estradas próximas de mata fechada também foi detectada a presença de VNFA, provavelmente devido a proximidade e facilidade de deslocamento desse material. Pode-se diferenciar a presença de solo exposto não mapeado (destaque na Figura 1e) e característico de corte raso, ao longo de todo um quadrilátero sem vegetação, ou com cultivo, a partir do qual chega-se até as áreas de corte seletivo.

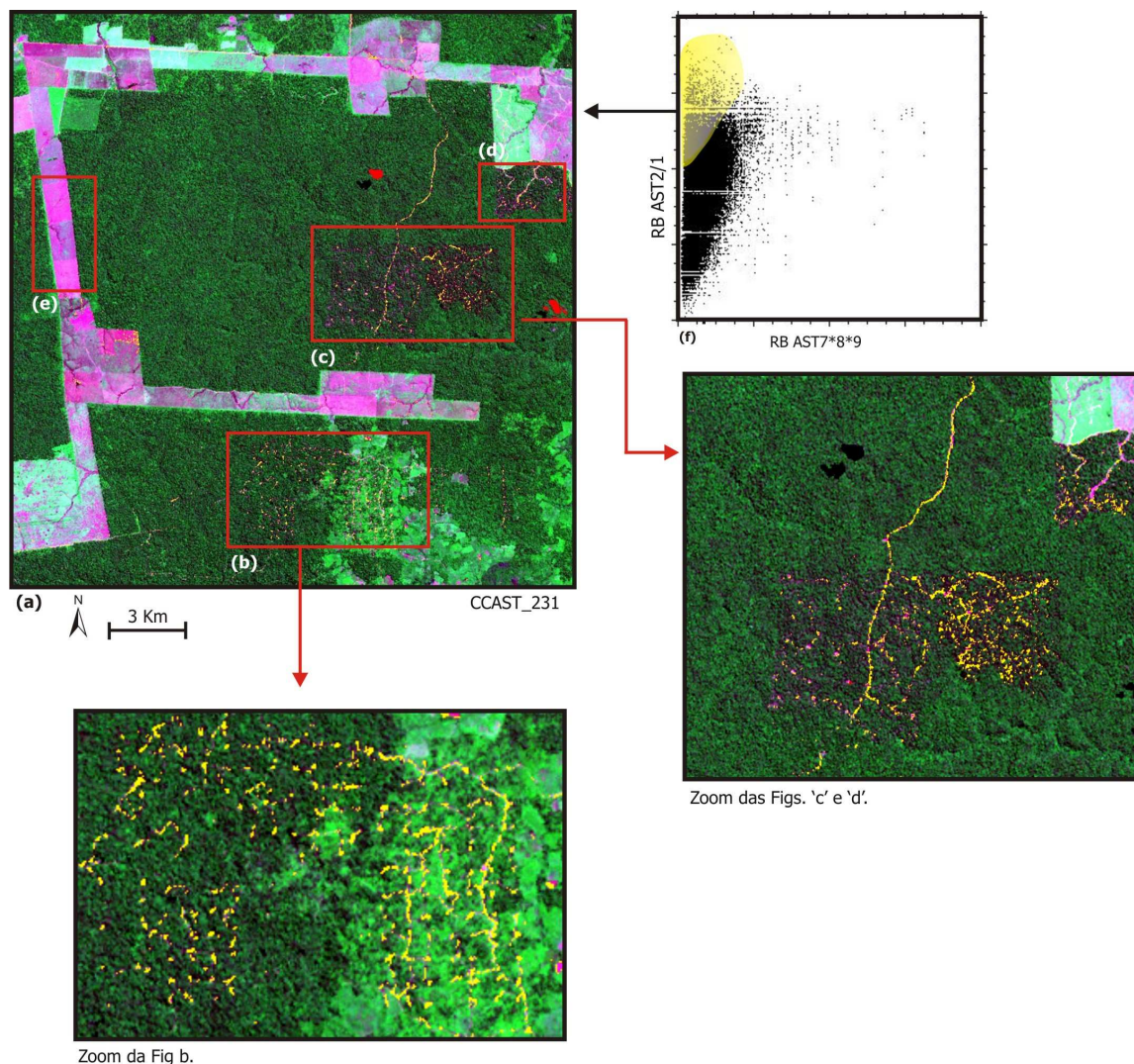


Figura 1. Classificação das áreas de corte seletivo resultado da análise de correlação (fig. 1f) entre os índices AST2/1 e AST7*8*9 (detalhe nas figs. 'b', 'c', 'd' e 'e'), sobre composição colorida ASTER 231 (fig. a).

O índice 3/2*1 objetiva estimar a relação entre VFA e VNFA em função do solo exposto. O denominador do índice potencializa a informação de solo entre as bandas AST1 e AST2 para separá-la do conjunto de dados relativos as clorofilas e carotenóides próprios da VFA, numa adaptação do índice proposto por Almeida et al. (2007). Através da contraposição com o índice aqui proposto, observa-se que os baixos valores de VFA estão associados aos baixos valores de VNFA, no início dos eixos do dispersograma. Esse procedimento reduz a sensibilidade do índice aos aspectos de sazonalidade, visto que os componentes vegetacionais estudados variam de forma diferente em função do tempo e do clima. Ao determinar-se o VNFA e o VFA, ambos com valores simultaneamente tão baixos, os motivos remetem ao provável corte da planta. Isso pode ser verificado na imagem ASTER (CC 231) onde, são

classificadas praticamente as mesmas áreas da Fig. 1a, com destaque para os pixels amarelos sobre as áreas de corte seletivo.

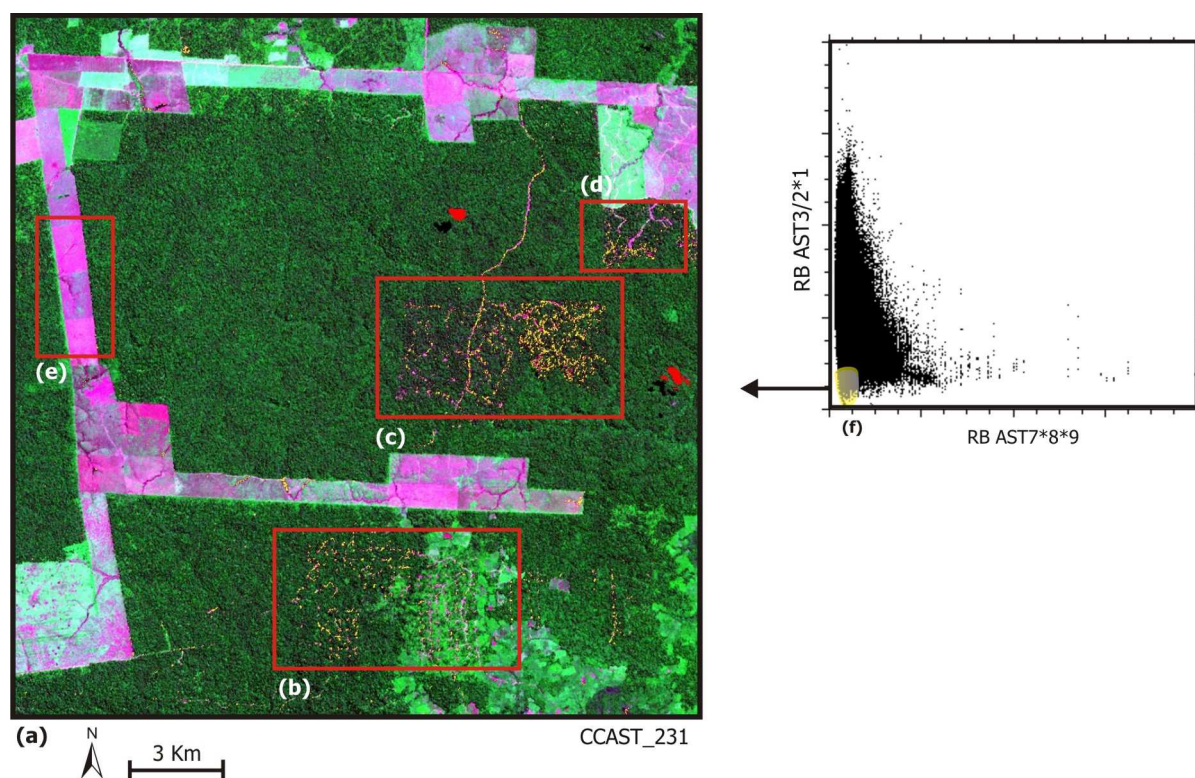


Figura 2. Classificação das áreas de corte seletivo resultado da análise de correlação (fig. 2f) entre os índices AST3/2*1 e AST7*8*9 (detalhe nas figs. 'b', 'c', 'd' e 'e'), sobre composição colorida ASTER 231 (fig. a).

4. Conclusões

O uso dos dados ASTER VNIR/SWIR mostrou-se eficiente para a detecção das áreas de corte seletivo, com destaque para a utilização das bandas do infravermelho de ondas curtas como incremento dos índices de bandas utilizados. Neste sentido, demonstrou-se a plena viabilidade deste tipo de abordagem no mapeamento da vegetação com o intuito de referenciar aplicações de larga escala associados a uma nova geração de sensores multi e hiperespectrais, do qual o ASTER foi um dos precursores.

5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo fomento direcionado a este trabalho e ao projeto de pós-doutoramento do qual ele faz parte.

6. Referências Bibliográficas

ACORN 2002. **ACORN 4.0 tutorial**. (2002). EUA, AGI-Colorado, 109p.

Almeida, T I. R.; SOUZA FILHO, C. R. (2006). ASTER and Landsat ETM+ images Applied to Sugarcane Yield Forecast. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, p. 4057-4069.

Almeida, T I. R; Perrota, M.; Souza Fiho, C. R. ; Santos, M. G. M. (2007). Geobotânica por sensoriamento remoto no mapeamento geológico de região recoberta por floresta amazônica de terra firme: uma avaliação

metodológica na região do Vale do Guaporé (RO). In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE. São José dos Campos : INPE, v. 1. p. 1951-1958.

Alves, D. S. **An analysis of the geographical patterns of deforestation in Brazilian Amazônia in the 1991-1996 period**. In: Wood, C. et al *Patterns and Processes of Land Use and Forest Change in the Amazon*, Gainesville, University of Florida Press.1999.

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, p. 483-496, 2002.

Becker, B. K. **Amazônia**. São Paulo: Ática. 5ª Ed. 112 p.1997.

Becker, B. K. **A Especificidade do Urbano na Amazônia: Desafios para Políticas Públicas Conseqüentes**. Secretaria de Coordenação dos Assuntos da Amazônia Legal/MMA. 35 p. 1998.

Becker, B. Cenários de Curto Prazo para o Desenvolvimento da Amazônia. **Cadernos IPPUR**, Rio de Janeiro, Ano XIV, n.1, p. 53-85, Jan/Jul 2000.

Becker, B. K. **Síntese do processo de ocupação da Amazônia** - Lições do passado e desafio do presente. In: *Causas e Dinâmica no desmatamento da Amazônia*. Ministério do Meio Ambiente - Brasília: MMA, 2001.

Câmara, G.; Valeriano, D. de M.; Soares, J. V. **Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal**. São José dos Campos: INPE. 2006. 24p. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso em: 09 nov. 2008.

Fearnside, P. Deforestation in Brazilian Amazonia.: History, Rates, and Consequences. **Conservation Biology**. v. 19, n. 3, p. 680-688, 2005.

Fernandez. A. V. Taxa de correlação entre diferentes polarizações das bandas l e x de imagens sar adquiridas pelo r99-b do sipam visando mapeamento de corte seletivo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 7057-7062. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.20.24>>. Acesso em: 08 nov. 2008.

Galvão, L. S.; Almeida-Filho, R., & Ícaro, V. (2005). Spectral discrimination of hidrotermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: Evaluation in a tropical savannah environment. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. 7, 107-114.

Godfrey, B.; Browder, J. O. Disarticulated Urbanization in the Brazilian Amazon. **The Geographical Review**. v. 86, n. 3, p. 441-445 , 1996.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Municípios**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12. mar. de 2008.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**, Projeto PRODES, 2007. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso em: 07 nov. 2008.

Iwasaki, A., & Tonooka, H.. (2005). Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SIWR. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 43(12): 2747-2751.

Lentini, M.; Veríssimo, A.; Pereira, D. A Expansão Madeireira na Amazônia. **Amazon**. n. 21. maio 2005. Disponível em: <<http://www.imazon.org.br>>. Acesso em: 15. set. de 2008.

Meneses, P. R. & Ferreira Júnior, L. G. (2001). Comportamento espectral de Minerais e Rochas. In: Meneses, P. R.; Madeira Netto, J. S (org.). **Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos naturais**. Brasília, DF: UNB, 262 p.

Nepstad, D.C.; Veríssimo, A.; Alencar A.; Nobre, C.; Lima, E.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P.; Potter, C.; Moutinho, P.; Mendoza, E.; Cochrane, M.; Brooks, V. 1999. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**. v. 398, n.6727, p. 505-508, 1999.

Perrota, M.; Almeida, Teodoro Isnard Ribeiro de ; Souza Filho, C. R. (2008). Geobotânica por Sensoriamento Remoto e Aerogamaespectrometria Aplicados ao Mapeamento Geológico em Região Recoberta por Floresta Amazônica de Terra Firme: Um Estudo Comparativo no Vale do Guaporé (MT). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, p. 155-168.

Rodrigues, T. E. **Zoneamento agroecológico do Município de Tomé-Açu, Pará**. Belém: Embrapa, 2001. 81p.

Rowan, L. C., & MARS, J. C. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, Califórnia area using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment**, 84(3), 350-366.

Souza Filho, C. R., Tápia, C. H., Crósta, A. P., & XAVIER, R. P. (2003). Infrared spectroscopy and ASTER imagery analysis of hidrothermal alteration zones at the Quellaveco Porphyry-Cooper Deposit, Southern Peru. In: **Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)**, Annual Conference – “Technology: Converging at the Top of the World”, 1-12.

Vicente, L. E.; Souza Filho, C. R., & Perez Filho, A. (2005). Mapeamento de formações arenosas em fragmentos de Cerrado utilizando dados e produtos do sensor ASTER. In: **Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, INPE/SELASR. 12: 3419-3426. <http://www.ltid.inpe.br/sbsr2005>