

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/7: 1303-1315
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MONITORAMENTO DA ABERTURA NO DOSSEL A PARTIR DE FOTOGRAFIAS HEMISFÉRICAS COM NDVI E MLME EM ÁREA DE CONCESSÃO FLORESTAL: MAMURU-ARAPIUNS/PA

Canopy Opening Monitoring by Hemispherical Photographs with NDVI and LSMM, in Forest Concession Area: Mamuru-Arapiuns/PA

**Iranilda Silva Moraes¹, Aline Maria Meiguins de Lima², Marcos Adami³
& Márcia Tatiana Vilhena Segtowich Andrade⁴**

¹Instituto de Desenvolvimento Florestal do Estado do Pará - IDEFLOR
Avenida João Paulo II, S/n°, Curió-Utinga. CEP: 66610-770. Belém - PA - Brasil
iranilda.ideflor@gmail.com

²Universidade Federal do Pará - UFPA
Instituto de Geociências - IG
Rua Augusto Correa s/n. Cidade Universitária, Profº José da Silveira Netto. CEP: 66075-110. Belém - PA - Brasil
ameiguins@ufpa.br

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Centro Regional da Amazônia - CRA
Av. Perimetral. Parque Tecnológico do Guamá. CEP: 66077-830. Belém - PA - Brasil
marcos.adami@inpe.br

⁴Universidade Federal do Pará - UFPA
Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa do Pará - FADESP
Rua Augusto Correa s/n. Cidade Universitária, Profº José da Silveira Netto. CEP: 66075-110. Belém - PA - Brasil
marcia.andrade@ufpa.br

Recebido em 27 de Maio, 2015/ Aceito em 20 de Julho, 2016
Received on May 27, 2015/ Accepted on July 20, 2016

RESUMO

As florestas tropicais da Amazônia historicamente foram alvo de práticas pouco sustentáveis de uso da terra, advindas da exploração madeireira predatória e do uso indiscriminado do fogo, ambos associados a altas taxas de desmatamento; o incentivo ao manejo florestal visa reduzir estes impactos gerando o menor passivo pela exploração. Com objetivo de quantificar tais efeitos, foram gerados produtos de sensoriamento remoto, a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e da estimativa da abertura de dossel por fotografias hemisféricas, para criar elementos de interpretação e análise da variável abertura de dossel em uma área sujeita a exploração florestal, na Unidade de Manejo Florestal I (UMF I) - Conjunto de Glebas Mamuru-Arapiuns (PA). Os resultados obtidos mostraram que é possível estabelecer um processo de monitoramento da cobertura da terra, uma vez que os dados de MLME, em especial a imagem-fração solo, apresentaram forte relação com os dados obtidos em campo através de fotos hemisféricas. Sendo possível emprega-lo como um índice para o monitoramento da exploração

de florestas na Amazônia, tornando a gestão florestal mais acessível ao poder público e às entidades não governamentais ou privadas, dando à população local a oportunidade e o incentivo à conservação florestal.

Palavras-chave: Manejo Florestal, Desmatamento, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Unsustainable land use practices have frequently been applied to rainforests located in the Amazon region, arising from predatory logging and the indiscriminate use of fire, both associated with high rates of deforestation. The forest management aims to reduce these impacts with the lowest damage. In order to quantify such effects it remote sensing data such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), those generated from the Linear Spectral Mixture Model (LSMM) and canopy openness estimated by hemispherical photographs. These data have been interpreted and analyzed to evaluate the canopy opening in a logging area located in the Forest Management Unit I (FMU I) - Glebas Set Mamuru-Arapiuns (PA). Results showed that it is possible to apply a monitoring process of land cover. The LSMM, especially image-soil fraction, showed strong relationship with the data obtained in the field through hemispheric photos. It can be used as an index to monitor the logging in the Amazon forests, making more accessible the monitoring of forest areas by government and non-governmental or private entities, giving to the local population the opportunity and incentive to forest conservation.

Keywords: Forest Management, Deforestation, Remote Sensing.

INTRODUÇÃO

O desmatamento e todos os impactos dele decorrentes não podem ser considerados como as únicas ameaças à integridade das florestas da Amazônia (FERREIRA *et al.*, 2005). Conforme Nepstad *et al.* (1999) e Santos *et al.* (2009) a partir da década de 1990, grandes porções de áreas florestais na Amazônia foram impactadas e empobrecidas por conta do processo de degradação advindo da atividade madeireira, das queimadas e da fragmentação das áreas de cobertura florestal.

O grau de degradação da floresta gerado pela exploração florestal pode variar de acordo com os fatores ligados as condições ambientais e ao manejo, tais como: intensidade e planejamento de exploração (ASNER *et al.*, 2005); práticas de exploração (NEPSTAD *et al.*, 2005); fatores físicos, como solo, clima e topografia (GRIGORYAN *et al.*, 2010), fatores biológicos (MONTEIRO *et al.*, 2004); tempo do ciclo de corte (KELLER *et al.*, 2005), dentre outros.

A exploração florestal, se praticada através de técnicas de manejo florestal, pode constituir em grande aliada ao combate do desmatamento (MONTEIRO *et al.*, 2004), além de permitir produção de madeira constante, preservação dos serviços ambientais como a garantia do suprimento de água nas bacias hidrográficas (SCHULZE *et al.*, 2008; LIU *et al.*, 2012) e oferta de madeira legal no mercado.

A abertura no dossel tem efeitos na fauna, no microclima e na qualidade de regeneração da floresta explorada (BALCH *et al.*, 2013), o que torna a quantificação desse impacto um bom estimador da degradação causada pela exploração florestal. Em função do caráter sinóptico e repetitivo de aquisição das imagens de sensores remotos, aliado aos indicadores ecológicos e aos parâmetros biofísicos da vegetação é possível, por meio destes instrumentos, realizar análises integradas e desenvolver modelos preditivos úteis aos tomadores de decisão (HAGEN *et al.*, 2012).

Além disto, a variação na resposta espectral entre uma área de solo e uma coberta por vegetação permite obter informações sobre as mudanças nas estruturas de seus dosséis (LIU *et al.*, 2004; DE KAUWE *et al.*, 2011). Dada esta variação na resposta espectral, criando então um contraste entre um objeto e os outros que o rodeiam, surge a possibilidade de determinar o tamanho e a forma do objeto (PETTORELLI *et al.*, 2011), isto logicamente associado a resolução espacial do sensor.

A quantificação das alterações na cobertura do dossel (ex. exploração não manejada, abertura de clareiras, estradas) é passível de ser avaliada empregando os índices de vegetação (VASCONCELOS; NOVO, 2004; NERY *et al.*, 2014) e os modelos de mistura espectral (ASNER *et al.*, 2002; ASNER *et al.*, 2004; MONTEIRO *et al.*, 2007).

Dentre os índices de vegetação, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) vem sendo utilizado para estudos de caracterização e de monitoramento da vegetação há mais de 30 anos (HUETE *et al.*, 2002; FERREIRA *et al.*, 2008). Este índice permite estimar o índice de área foliar, a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (ANDERSON *et al.*, 2005), bem como a biomassa e a percentagem da cobertura vegetal verde da superfície (PETTORELLI *et al.*, 2011).

O NDVI, assim como outros índices de vegetação, apresenta em geral, maior relacionamento com as variáveis estruturais do dossel (ACCIOLY *et al.*, 2002). O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) também pode ser utilizado nas análises de áreas que sofreram exploração florestal (ASNER *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2005). O MLME parte do princípio que um elemento de resolução espacial de uma imagem (pixel) pode ser constituído por componentes combinados linearmente, dado o campo de visada instantânea (Instantaneous Field Of View, IFOV) do sensor no momento de integrar a radiação oriunda da superfície em observação (SHIMABUKURO; SMITH, 1991; MONTEIRO *et al.*, 2007).

O MLME tem sido uma ferramenta importante no mapeamento da atividade madeireira na Amazônia, permitindo a detecção de pátios de estocagem em imagens fração solo (SOUZA; BARRETO, 2000). Monteiro *et al.* (2007) observaram que a imagem fração vegetação permite avaliar e comparar temporalmente os impactos da exploração de madeira e que a imagem fração solo permite extrair estradas e pátios de estocagem para avaliação dos indicadores relacionados a estas infraestruturas.

A quantificação de dano no dossel também pode ser realizada por meio de fotos hemisféricas obtidas sob o dossel impactado (SCHLIEMANN; BOCKHEIM, 2011). Mediante o emprego de fotos hemisféricas é possível estimar a fração de abertura de dossel, parâmetro que possui forte correlação com o índice de área foliar (IAF)

(MONTEIRO *et al.*, 2003; JONCKHEERE *et al.*, 2004).

As fotos hemisféricas capturam os padrões de obstrução e de penetração da luz no dossel, pela qual a arquitetura da copa e a área de folhagem podem ser quantificadas (SCHLIEMANN; BOCKHEIM, 2011). Seu uso fornece um registro permanente de importantes informações do dossel, como posição, tamanho, densidade e distribuição das aberturas (gap fraction) em diferentes ângulos zenitais e azimutais (ZHANG *et al.*, 2005).

Com o objetivo de testar mecanismos que possibilitem maior eficiência no monitoramento da exploração florestal, propôs-se verificar a relação entre a imagem NDVI, a imagem fração solo do MLME e a estimativa de fração de abertura de dossel, obtidas por fotos hemisféricas, na avaliação na área de concessão florestal da Unidade de Manejo Florestal - UMF I do lote de concessão florestal do Conjunto de Glebas Mamuru-Arapiuns/Pará.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área de aproximadamente 3.000 ha referente à área de manejo para a primeira Unidade de Produção Anual (UPA - subdivisão operacional da área de manejo, objeto de colheita durante um determinado ano do ciclo de produção florestal) da UMF I da Concessão Florestal no Conjunto de Glebas Mamuru-Arapiuns, localizada nos municípios de Juruti e Santarém, estado do Pará. A UPA I é composta por 34 Unidades de Trabalho (UT) e 201 pátios de estocagem, com Autorização de Exploração de Produtos Florestais (AUTEF) liberada para 76.799,7074 m³, respeitando o limite de exploração de 25,8 m³/ha disposto no contrato de concessão florestal (Figura 1).

Na caracterização da área antes da exploração florestal foi utilizada imagem Landsat 5 (Bandas TM3, TM4 e TM5; orbita-ponto 228/62; de 29/10/2011, cerca de 1 ano antes do início do processo de exploração - corte raso); a análise após este período (que ocorreu de julho-dezembro de 2012) empregou imagem Landsat 8 (Bandas OLI 4, OLI5 e OLI6; órbita-ponto 228/62, de passagem em 15/09/2013).

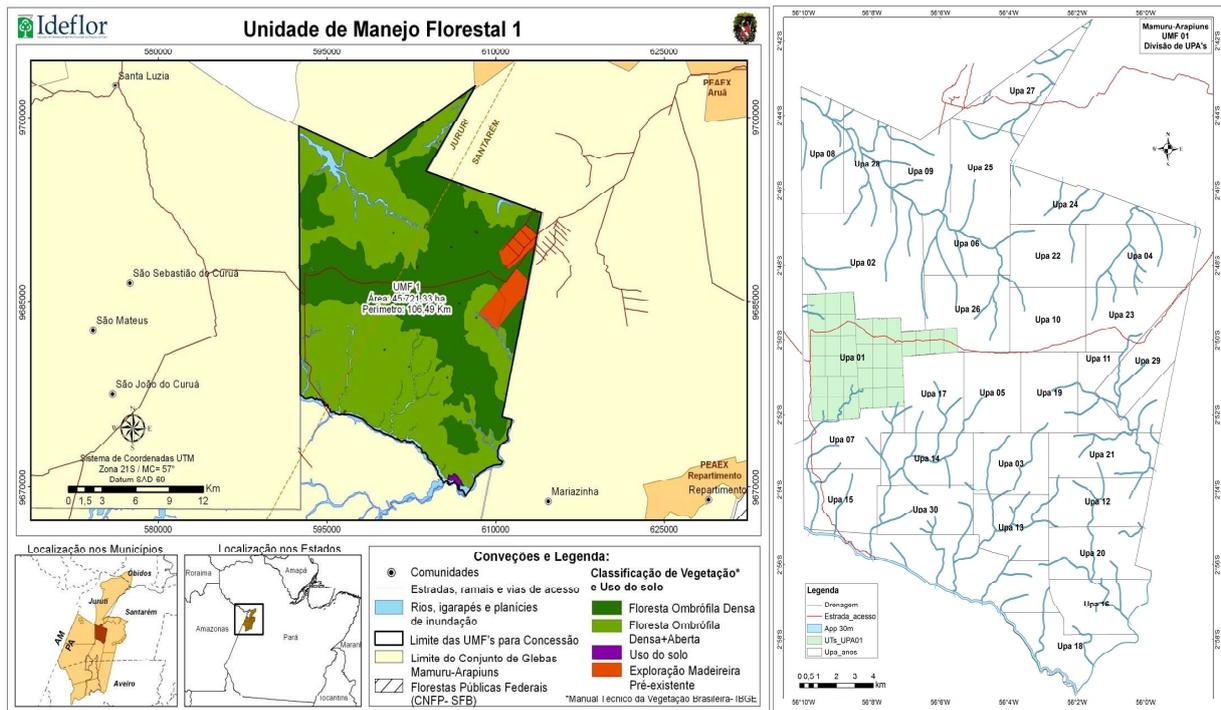


Fig. 1 - Configuração de Unidades de Produção Anual – UPAs da UMF I.

São exemplos de emprego de imagens Landsat 5, Landsat 7 e Landsat 8 na análise integrada de processos de uso e cobertura do solo os trabalhos de: Masek *et al.* (2001), Schneider (2012), Jia *et al.* (2014), Johnson (2015) e Souza-Filho *et al.* (2015).

As fotografias hemisféricas foram obtidas em visitas de campo a partir da acoplagem de uma câmara fotográfica a uma lente olho de peixe (fisheye), a qual foi posicionada abaixo do dossel e orientada para zênite. Foram respeitados os horários propícios de coleta, sendo eles 1 (uma) hora depois do amanhecer e 1 (uma) hora antes do entardecer para evitar a incidência direta de iluminação na clareira, o que poderia provocar a superestimação da abertura do dossel nas fotos.

O monitoramento da abertura no dossel considerou as seguintes classes (Tabelas 1 e 2): pátios de estocagem, estradas secundárias, trilhas de arraste, clareiras e em área não explorada (controle); tendo sido tratadas com o programa Gap Ligth Analyzer 1.0.

Conforme as definições e delineamentos para as coletas de amostras pelas medições

no solo das aberturas advindas da exploração florestal, foram realizadas as mensurações de largura das estradas secundárias e nas trilhas de arraste, largura e comprimento dos pátios de estocagem e semi-eixo maior e semi-eixo menor nas áreas de clareira. Os resultados obtidos a partir dos levantamentos de campo foram adotados na validação dos dados previamente identificados nas imagens.

O NDVI foi obtido considerando (JONCK-HEERE *et al.*, 2004):

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)} \quad (1)$$

onde: ρ_{IVP} = valor de reflectância no infravermelho próximo; ρ_V = valor de reflectância na banda do vermelho.

Pelo MLME (SHIMABUKURO; SMITH, 1991; FERREIRA *et al.*, 2008) obteve-se as respostas espectrais dos componentes “puros” (end members) diretamente das imagens, sendo que a proporção de cada componente dentro do pixel foi estimada linearmente, gerando a imagem-fração correspondente.

Tabela 1: Procedimento de adotados no levantamento com fotografias hemisféricas

Feição	Amostra	Procedimentos de medidas	
		Trena	Fotografia Hemisférica
Estradas Secundárias	10% do número total	1 transecto de 100 metros com medições da largura a cada 10 metros.	
Trilhas de Arraste	Mesmo número de estradas secundárias amostradas	1 transecto de 50 metros com medições da largura a cada 10 metros.	
Pátios de Estocagem	10% do número total	Largura e comprimento	
Clareiras de derruba	Aleatória	Largura e comprimento (elipse da clareira)	
Áreas não exploradas	---	1 transecto de 500 metros com medições da largura a cada 20 metros.	

Tabela 2: Detalhamento do quantitativo amostral levantado

Feição	Seção Amostral	Pontos de Coleta	Foto Hemisférica	Medição no Solo
Estrada Secundária	7	77	315	77
Trilha de Arraste	8	48	189	48
Pátio de Estocagem	24	24	98	24
Área não explorada	2	22	85	-
Total	45	175	704	153

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As aberturas médias no dossel medidas no campo (fotografias hemisféricas) foram estatisticamente diferentes para as categorias abordadas de: Pátio de Estocagem (P), Estradas secundárias (E), Trilhas de arraste (T), Área não explorada (NE) e Clareira (CL); conforme ilustra a Tabela 3. Onde os maiores percentuais

de abertura do dossel foram obtidos para as áreas de pátio de estocagem (61,94%) e os menores para as trilhas (19,54%), considerando que nas áreas não exploradas a média foi de 11,82%. O resultado obtido com o destaque para as feições de: estradas secundárias, clareiras e pátios de estocagem; foi semelhante ao obtido por Pinagé *et al.* (2014).

Tabela 3: Distribuição percentual dos valores de abertura de dossel coletados

Categorias (%)	NE	T	E	CL	P
Média	11,82	19,54	33,85	48,82	61,94
Mediana	11,22	19,02	28,86	48,20	62,32
Desvio padrão	3,47	5,36	14,79	5,45	10,14
Mínimo	6,39	12,45	16,59	43,94	39,68
Máximo	24,54	37,14	74,22	54,94	78,12
Quartil 25%	9,97	15,27	22,93	44,23	53,74
Quartil 75%	12,35	22,88	43,49	53,41	70,15

onde: Área não explorada (NE), Trilhas de arraste (T), Estradas secundárias (E), Clareira (CL), Pátio de Estocagem (P).

Segundo Verrissimo *et al.* (1992), Pereira *et al.* (2002) e Monteiro *et al.* (2007) na exploração manejada a infraestrutura necessária a operação (estradas, as trilhas de arraste e os pátios de estocagem) e o processo de derrubada das árvores devem causar o menor dano possível às árvores adjacentes, o que contribui para a menor abertura no dossel. Mesmo assim, são evidentes

nas imagens de satélite as marcas (estradas e pátios de estocagem) que a exploração madeireira deixa no terreno (SOUZA; BARRETO, 2000).

Os valores obtidos (Tabela 4) encontram-se mais próximos ao que Johns *et al.* (1996) classificaram para exploração convencional (média - 355 m²), do que para manejada (média - 116 m²).

Tabela 4: Valores médios das feições registradas obtidos por feição

Feição	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Estrada secundária (m)	4,04	3,30	5,00	0,33
Trilha de arraste (m)	3,88	3,00	4,80	0,40
Pátio de estocagem (m ²)	481,96	316,16	648,00	88,41
Clareira (m ²)	325,85	282,60	408,20	57,50

Os valores médios de NDVI obtidos para o ano de 2011 das áreas da UPA 01 (que sofreram alteração em 2012 pela atividade de exploração florestal) quando comparados com o ano de 2013 (ano posterior à exploração) demonstram perda de vegetação na UPA 01 (média de perdas de 9,7%),

como resultado da abertura no dossel decorrente da atividade de exploração florestal. Para o caso de 2013, a imagem NDVI realçou principalmente informações de estradas e pátios de estocagem da exploração florestal, que antes pareciam pouco ou nada perceptíveis (figuras 2 e 3).

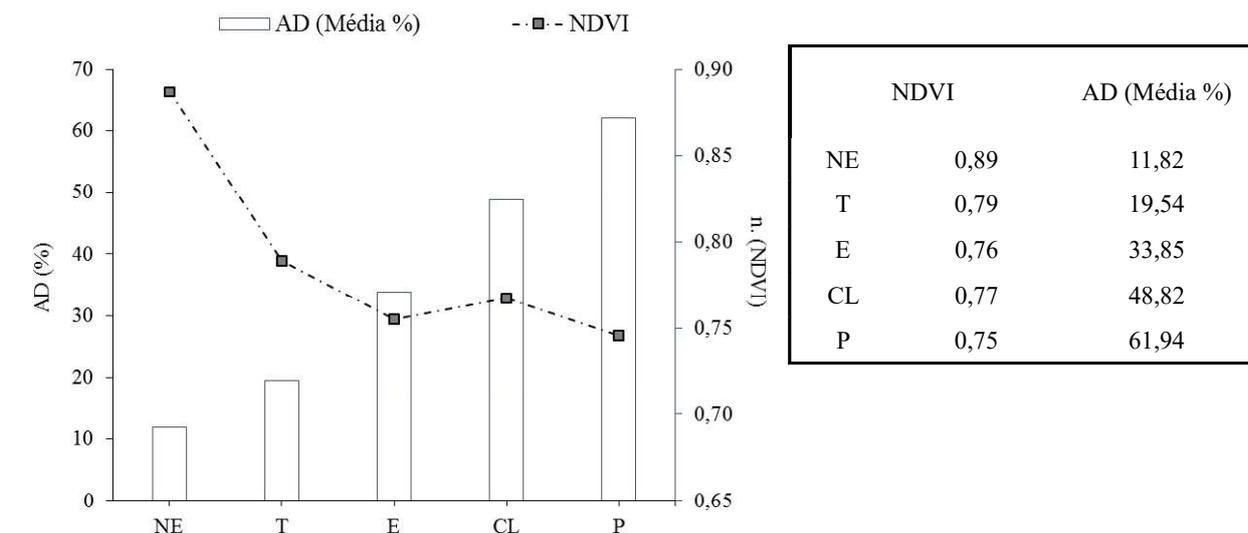


Fig. 2 - Fração de abertura do dossel (AD) para as áreas de Pátio de Estocagem (P), Estradas secundárias (E), Trilhas de arraste (T), Área não explorada (NE) e Clareira (CL); comparados com os resultados de Níveis digitais médios (ND's) da imagem NDVI para 2013.

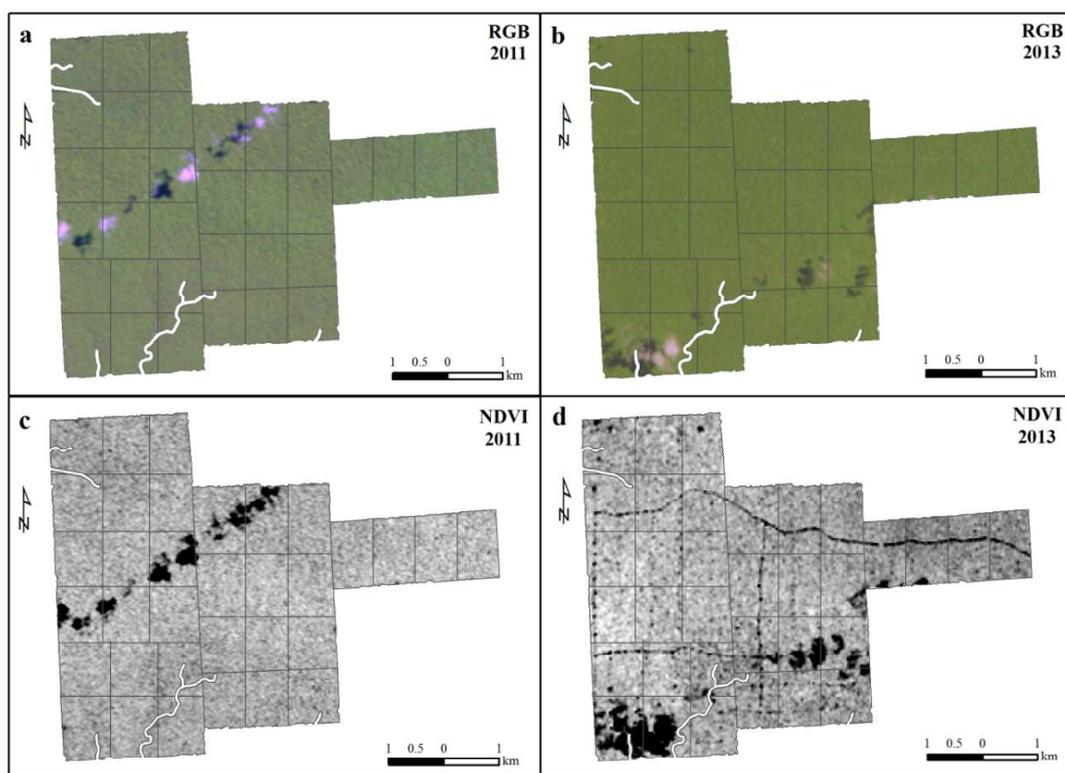


Fig. 3 - Imagens de satélite para a área da UPA 01, onde: (a) composição R5G4B3 para o ano de 2011; (b) composição R6G5B4 para o ano de 2013; (c) NDVI para o ano de 2011; e (d) NDVI para o ano de 2013.

Para as trilhas de arraste, os índices de vegetação mostraram-se maiores quando comparados com os das outras feições amostradas advindas da exploração florestal. As estradas secundárias e os pátios de estocagem apresentaram menores valores de NDVI, tal

fato certamente está associado a retirada da vegetação, inclusive as de grande porte, quando da construção destas infraestruturas.

As estradas secundárias apresentam característica espacial linear e sua detecção é favorecida pela abertura no dossel da floresta.

em decorrência da retirada de vegetação, esta abertura é necessária para o tráfego de máquinas e de caminhões da exploração florestal e também para permitir a entrada de luz com fins de evitar possíveis encharcamentos (saturação de água) no solo, o que dificultaria o tráfego dos veículos e provocaria maior compactação do solo.

Os pátios de estocagem são mais facilmente detectáveis por conta de sua forma poligonal, onde as aberturas de dossel tornam-se bem evidentes devido à exposição do solo que causa a redução dos valores de NDVI.

Anderson *et al.* (2005) avaliaram, a partir da análise intra-anual dos valores médios dos índices de vegetação, que este é susceptível às mudanças sazonais da vegetação ao longo do ano, com diferença (máximo-mínimo) de cerca de 10,5% no período chuvoso (maiores valores) e de 8,2% no menos chuvoso (menores valores). As imagens adotadas para as análises antes da exploração florestal e depois da exploração

correspondem ao período menos chuvoso na região.

A imagem-fração solo gerada pelo MLME apresentou os valores de abundância de solo, sendo que quanto maiores os valores obtidos, maior a exposição do solo à radiação solar e consequentemente, menor a cobertura florestal (MONTEIRO *et al.*, 2003). Para as amostras de áreas não exploradas os valores médios de abundância de solo foram os menores (refletindo na pouca contribuição do solo exposto na resposta espectral).

As áreas de pátio de estocagem apresentaram os maiores valores, sendo o resultado final mais concordante com o obtido a partir do monitoramento das fotos hemisféricas (Figura 4). A forma poligonal e a retirada de vegetação para sua construção tornam o pátio de estocagem a feição de mais fácil detecção remota da exploração florestal.

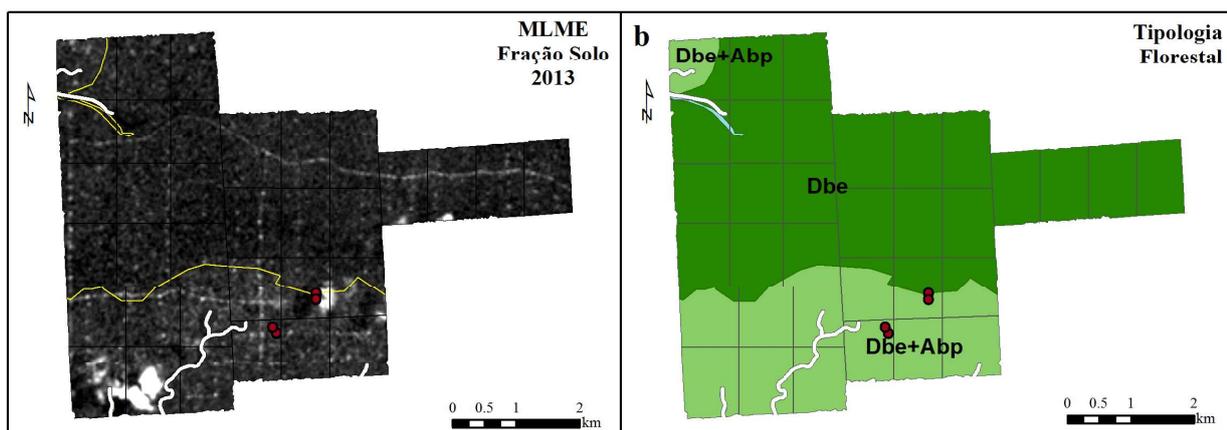


Fig. 4 - Localização das clareiras amostradas em campo em relação a imagem fração solo (a); e a tipologia florestal da UPA 01 (b): Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas dossel emergente (Dbe); Floresta Ombrófila Aberta com palmeiras (Abp).

As áreas de clareiras amostradas estavam unicamente localizadas em área de floresta do tipo Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas dossel emergente mais Floresta Ombrófila Aberta com palmeiras (Dbe+Abp). Esta tipologia é marcada por árvores de grande porte bastante dispersas, com frequentes agrupamentos de palmeiras e enorme quantidade de cipós. Henriques *et al.* (2008) citam, por exemplo, que a construção de estradas e o ressecamento das folhas e galhos do chão da floresta pela abertura do dossel, aumentam o risco de fogo nas florestas exploradas.

Shimabukuro *et al.* (1998), Vasconcelos e Novo (2004), Lu *et al.* (2004) e Nery *et al.* (2014) são exemplos de trabalhos que aplicam os resultados do MLME na detecção das diferentes formas de cobertura do solo, podendo variar sua precisão conforme a natureza do sensor, o período de amostragem (chuvoso ou menos chuvoso) e a feição a ser mapeada.

A relação entre a fração de abertura de dossel e a imagem-fração solo do MLME possui natureza (relação linear) diretamente proporcional ($r^2 = 0,96$), pois quanto maior a abertura do dossel, maior a exposição do

solo. Diferente do que ocorre com relação ao NDVI, onde a relação (de natureza polinomial de segundo grau) é inversamente proporcional ($r^2 = 0,83$), quanto maior a abertura no dossel, menor o NDVI (Figura 5). Trishchenko *et al.* (2002), Heinzl *et al.* (2006) e Trishchenko (2009) ao testarem as respostas espectrais de diferentes sensores obtiveram bom desempenho com base em funções polinomiais quadráticas para o NDVI.

A análise via matriz de correlação considerando as variáveis de abertura do dossel

(AD, pelas fotografias hemisféricas), o MLME e o NDVI foi positiva para a relação AD x MLME (0,98); e negativa para NDVI x MLME (-0,82) e AD x NDVI (-0,78). A maior aderência dos valores de fração de abertura de dossel com a imagem-fração solo pode estar relacionada com a característica do processamento digital de MLME, que decompõem em imagens-fração os componentes misturados da paisagem (vegetação, solo e sombra) que dividem a resposta espectral para um mesmo pixel da imagem (SOUZA *et al.*, 2005; FERREIRA *et al.*, 2008).

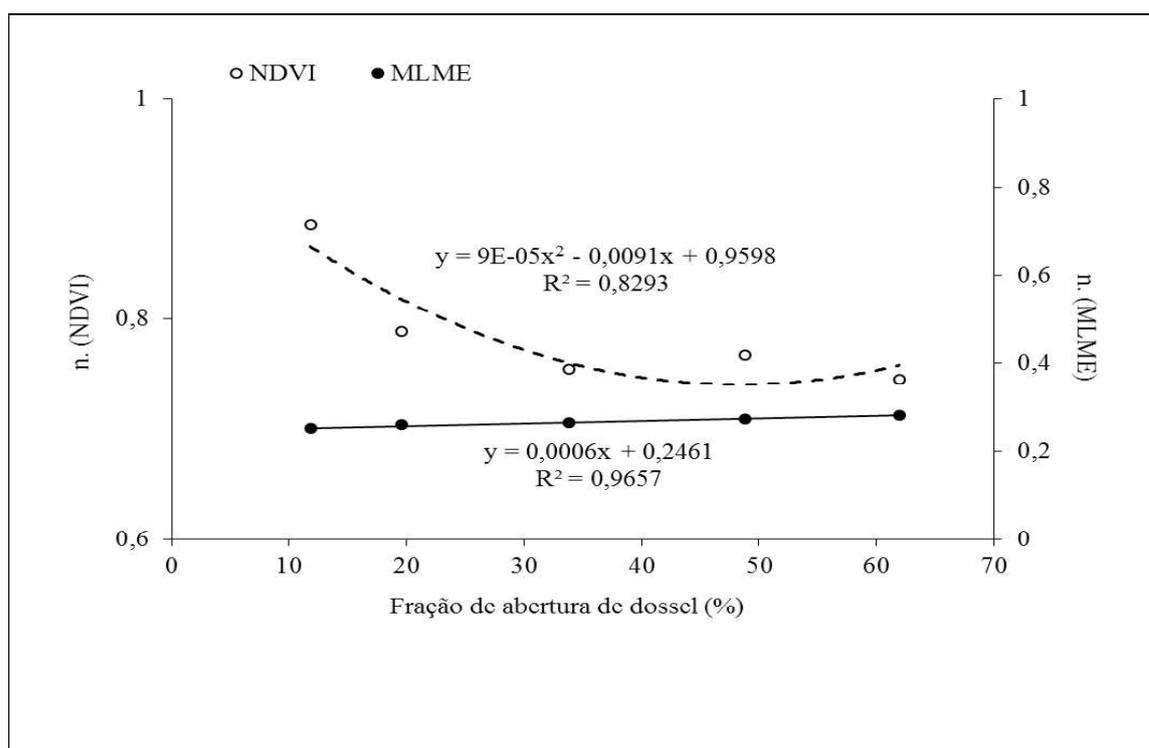


Fig. 5 - Curvas de tendência entre os valores médios obtidos, por categoria de feição mapeada, entre a Fração de abertura de dossel, NDVI e Fração Solo - MLME.

Shimabukuro *et al.* (1998) identificaram que apesar das diferenças na sensibilidade das imagens derivadas de modelo linear de mistura espectral e das imagens índice de vegetação, estas são variáveis altamente correlacionadas, tanto no período chuvoso ($r^2 = 0,945$) quanto no período seco ($r^2 = 0,856$).

O modelo linear de mistura espectral, em especial a imagem-fração solo, mostrou-se válido para detectar a exploração madeireira através de imagens de satélite com resolução espacial moderada (30 m), assim como possibilita obter uma melhor aproximação quanto aos impactos causados à floresta em decorrência da

atividade madeireira; além do acompanhamento dos processos de mudança de uso do solo na Amazônia (LU *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2009).

A exploração madeireira é um atrativo econômico (SCHULZE; ZWEEDE, 2006; TRANCOSO *et al.*, 2009) e na região Amazônica, segundo Santana *et al.* (2012) estima-se que em 30 anos, cada 25 m³/ha explorado corresponderá a um valor médio de R\$ 587,00/ha ou R\$ 19,56/ha/ano nas áreas sujeitas a planos de manejo de concessão florestal do Estado do Pará, o que seria superior ao gerado pelas atividades de pecuária extensiva (em torno de R\$ 180,00/

ha) e das lavouras de grãos (em torno dos R\$ 420,00/ha). Demandando assim por esforços do poder público no monitoramento da exploração florestal, a fim de reduzir os impactos tanto na exploração com manejo, quanto para reduzir a ação da forma convencional.

4. CONCLUSÃO

A fração de abertura de dossel obtida a partir das fotografias hemisféricas foi considerada como variável controle na quantificação da abertura de dossel na área de concessão florestal da Unidade de Manejo Florestal I (UMF I) - Conjunto de Glebas Mamuru-Arapiuns (PA). Os valores obtidos pelo MLME apresentaram melhor relação, quando comparados com os valores de NDVI, com uma melhor aproximação da quantificação da abertura de dossel florestal decorrente da atividade madeireira.

A feição que apresentou menor abertura de dossel foi a trilha de arraste, ao passo que o pátio de estocagem foi a feição que apresentou maior abertura, revelada pela obtenção dos maiores índices em todos os métodos utilizados. A retirada da vegetação, inclusive a de grande porte, provoca uma maior abertura no dossel e a consequente exposição do solo, e não por acaso, o pátio de estocagem, junto com as estradas.

Os resultados indicam que o uso de tecnologias combinadas possibilitam uma maior eficiência no monitoramento da exploração florestal, especialmente na região Amazônica, onde sua extensão territorial e as dificuldade de acesso a estas áreas, torna o monitoramento in loco de custo alto para sua execução.

O processo de concessão florestal na Amazônia demanda por estudos que potencializem a avaliação quantitativa dos impactos da atividade madeireira e forneçam indicadores de desempenho aos planos de manejo e consequentemente subsídios para gestão destas áreas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, L. J. O.; PACHÊCO, A.; COSTA, T. C. C.; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. J. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/LANDSAT. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 492-498, 2002.

ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazônica**, v. 4, n. 35, p. 445-456, 2005.

ASNER, G. P.; KELLER, M.; PEREIRA R.; ZWEEDE J. C. Remote sensing of selective logging in Amazonia Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM + , and textural analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 3, p. 483-496, 2002.

ASNER, G. P.; KELLER, M.; SILVA, J. N. M. Spatial and temporal dynamics of forest canopy gaps following selective logging in the eastern Amazon. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 765-783, 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**, v. 5747, n. 310, p. 480-482, 2005.

BALCH, J. K.; MASSAD, T. J.; BRANDO, P. M.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L. M. Effects of high-frequency understorey fires on woody plant regeneration in southeastern Amazonian forests. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, p. 1-10, 2013.

DE KAUWE, M. G.; DISNEY, M. I.; QUAIFFE, T.; LEWIS, P.; WILLIAMS, M. An assessment of the MODIS 5 collection 5 leaf area index product for a region of mixed coniferous forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 767-780, 2011.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. **Acta Scientiarum**, v. 30, n. 4, p. 379-390, 2008.

GRIGORYAN, G. V.; CASPER, M. C.; GAUER, J.; VASCONCELOS, A. C.; REITER, P. P. Impact of climate change on water balance of forest sites in Rhineland-Palatinate, Germany. **Advances in Geosciences**, v. 27, p. 37-43, 2010.

HAGEN, S. C.; HEILMAN, P.; MARSETT, R.; TORBICK, N.; SALAS, W.; VANRAVENSWAY,

- J.; QI, J. Mapping total vegetation cover across western rangelands with moderate-resolution imaging spectroradiometer data. **Rangeland Ecology & Management**, v. 65, n. 5, p. 456-467, 2012.
- HEINZEL, V.; FRANKE, J.; MENZ, G. Assessment of cross-sensor NDVI-variations caused by spectral band characteristics. In: GAO, W.; USTIN, S. L. **Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability III**. San Diego, California, The International Society for Optical Engineering (SPIE), v. 6298, p. 62980Z9-10, 2006.
- HENRIQUES, L. M. P.; WUNDERLE JR., J. M.; OREN, D. C.; WILLIG, M. R. Efeitos da Exploração Madeireira de Baixo Impacto sobre uma Comunidade de Aves de Sub-bosque na Floresta Nacional do Tapajós, Pará, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 2, p. 267-290, 2008.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.
- JIA, K.; WEI, X.; GU, X.; YAO, Y.; XIE, X.; LI, B. Land cover classification using Landsat 8 Operational Land Imager data in Beijing, China. **Geocarto International**, v. 29, n. 8, p. 941-951, 2014.
- JOHNS, J. S.; BARRETO, P.; UHL, C. 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.
- JOHNSON, B. A. Scale Issues Related to the Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Maps Produced Using Multi-Resolution Data: Comments on "The Improvement of Land Cover Classification by Thermal Remote Sensing. **Remote Sensing**, v. 7, n. 7, p. 13436-13439, 2015.
- JONCKHEERE, I.; FLECK S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BARET, F. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, n. 1-2, p. 19-35, 2004.
- KELLER, M.; ASNER, G. P.; SILVA, N.; PALACE, M. A sustentabilidade da exploração seletiva de madeira nas florestas da Amazônia brasileira: os balanços de carbono e o sensoriamento remoto como ferramentas para avaliar os efeitos da exploração madeireira. In: ZARIN, D. J.; ZARIN, R. P.; SAMPAIO, P. D. **As Florestas produtivas nos neotrópicos: conservação por meio do manejo sustentável?**. Brasília-DF, IEB-Instituto de Educação do Brasil, p. 67-94, 2005.
- LIU, M.; TIAN, H.; LU, C.; XU, X.; CHEN, G.; REN, W. Effects of multiple environment stresses on evapotranspiration and runoff over eastern China. **Journal of Hydrology**, v. 426-427, p. 39-54, 2012.
- LU, D.; BATISTELLA, M.; MORAN, E. Multitemporal spectral mixture analysis for Amazonian land-cover change detection. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 1, p. 87-100, 2004.
- MASEK, J. G.; HONZAK, M.; GOWARD, S. N.; LIU, P.; PAK, E. Landsat-7 ETM+ as an observatory for land cover Initial radiometric and geometric comparisons with Landsat-5 Thematic Mapper. **Remote Sensing of Environment**, v. 78, p. 118-130, 2001.
- MONTEIRO, A. L. S.; SOUZA JR, C. M. de; BARRETO, P. G.; PANTOJA, F. L. de S.; GERWING, J. J. Impactos da exploração madeireira e do fogo em florestas de transição da Amazônia Legal. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 11-21, 2004.
- MONTEIRO, A. L. S.; SOUZA JR., C. M.; LINGNAU, C. Avaliação de imagens LANDSAT para o monitoramento do manejo florestal na Amazônia. **Scientia Forestalis**, n. 75, p. 95-104, 2007.
- MONTEIRO, A. L. S.; SOUZA, C. M.; BARRETO, P. Detection of logging in Amazonian transition forests using spectral mixture models. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 1, p. 151-159, 2003.
- NEPSTAD, D.; ALENCAR, A.; BARROS, A. C.; LIMA, E.; MENDONZA, E.; RAMOS, C.

- A.; LEFEBVRE, P. Governando a indústria madeireira na Amazônia. In: ZARIN, D. J.; ZARIN, R. P.; SAMPAIO, P. D. **As Florestas produtivas nos neotrópicos: conservação por meio do manejo sustentável?**. Brasília-DF, IEB-Instituto de Educação do Brasil, p. 481-511, 2005.
- NEPSTAD, D.; VERÍSSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER *et al.* Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6727, p. 505-508, 1999.
- NERY, C. V. M.; MOREIRA, A. A.; FERNANDES, F. H. S.; ALMEIDA, L. S.; ALMEIDA, R. P. Utilização do modelo linear de mistura espectral e NDVI para avaliação do comportamento de área desmatada no município de rio Pardo de Minas/ MG. **Caminhos de Geografia Uberlândia**, v. 15, n. 49, p. 104-112, 2014.
- 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**, v. 168, n., p. 77-89, 2002.
- PETTORELLI, N.; RYAN, S.; MUELLER, T.; BUNNEFELD, N.; JEDRZEJEWSKA, B.; LIMA, M.; KAUSRUD, K. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unforeseen successes in animal ecology. **Climate Research**, v. 46, n. 1, p. 15-27, 2011.
- PINAGÉ, E. R.; MATRICARDI, E.; OSAKO, L. S.; GOMES, A. R.; LEAL, F. A. Gap Fraction Estimates over Selectively Logged Forests in Western Amazon. **Natural Resources**, v. 5, n. 16, p. 969-980, 2014.
- SANTANA, A. C.; SANTOS, M. A. S.; SANTANA, A. L.; YARED, J. A. G. O valor econômico da extração manejada de madeira no baixo Amazonas, estado do Pará. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 527-536, 2012.
- SANTOS, N. T.; SILVA, K. E.; RIBEIRO, C. A. A. S.; MARTINS, S. V. Concessões de florestas públicas na Amazônia: desafios para o uso sustentável dos recursos florestais. **Bioikos**, v. 23, n. 2, p. 91-102, 2009.
- SCHLIEMANN, S. A.; BOCKHEIM, J. B. Methods for studying tree fall gaps: a review. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 7, p. 1143-1151, 2011.
- SCHULZE, M.; GROGAN, J.; VIDAL, E. O manejo florestal como estratégia de conservação e desenvolvimento socioeconômico na Amazônia: quanto separa os sistemas de exploração madeireira atuais do conceito de manejo florestal sustentável?. In: BENSUSAN, N.; ARMSTRONG, G. **O manejo da paisagem e a paisagem do manejo. Brasília, Instituto Internacional de Educação do Brasil**, p. 163-213, 2008.
- SCHULZE, M.; ZWEEDE, J. Canopy dynamics in unlogged and logged forest stands in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 236, p. 56-64, 2006.
- SCHNEIDER, A. Monitoring land cover change in urban and peri-urban areas using dense time stacks of Landsat satellite data and a data mining approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 689-704, 2012.
- SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. esp., p. 1729-1737, 1998.
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The Least-Squares Mixing Models to Generate Fraction Images Derived From Remote Sensing Multispectral Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p. 16-20, 1991.
- SOUZA-FILHO, P. W. M.; NASCIMENTO JR., W. R.; VERSIANI DE MENDONÇA, B. R.; SILVA JR., R. O.; GUIMARÃES, J. T. F.; DALL'AGNOL, R.; SIQUEIRA, J. O. Changes in the land cover and land use of the Itacaiúnas river watershed, arc of deforestation, Carajás, Southeastern Amazon. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-7/W3, p. 1491-1505, 2015.
- 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, C. M.; ROBERTS, D. A.; COCHRANE, M. A. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 2-3, p. 329-343, 2005.

TRANCOSO, R.; CARNEIRO FILHO, A.; TOMASELLA, J.; SCHIETTI, J.; FORSBERG, B. R.; MILLER, R. P. Deforestation and conservation in major watersheds of the Brazilian Amazon. **Environmental Conservation**, v. 36, n. 4, p. 277-288, 2009.

TRISHCHENKO, A. P. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors: Extension to AVHRR NOAA-17, 18 and METOP-A. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 2, p. 335-341, 2009.

TRISHCHENKO, A. P.; CIHLAR, J.; LI, Z. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate

resolution satellite sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 1, p. 1-18, 2002.

VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. M. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens – fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí - PA. **Acta Amazônica**, v. 3, n. 34, p. 487-493, 2004.

VERISSIMO, A.; BARRETO, P.; MATTOS, M.; TARIFA, R.; UHL, C. Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazonian frontier: The case of Paragominas. **Forest Ecology and Management**, v. 55, n. 1-4, p. 169-199, 1992.

ZHANG, Y.; CHEN, J. M.; MILLER, J. R. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 133, n. 1-4, p. 166-181, 2005.