



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**O Uso do Modelo Linear de Mistura Espectral como Subsídio ao
Monitoramento de Corte Seletivo na Floresta Nacional do Trairão/PA**

ALINE LOPES DE OLIVEIRA

Monografia de Conclusão de
Curso de Especialização

Brasília – DF

2015



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**O Uso do Modelo Linear de Mistura Espectral como Subsídio ao
Monitoramento de Corte Seletivo na Floresta Nacional do Trairão/PA**

ALINE LOPES DE OLIVEIRA

Monografia de Conclusão de
Curso de Especialização

ORIENTADOR: Prof. Dr. Edson Eyji Sano

COMISSÃO JULGADORA

Msc. Adriana Panhol Bayma _____

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista _____

Brasília – DF

2015

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Francisco Oliveira e Edna Lopes, por toda à dedicação, carinho e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Aos meus chefes, Waldemar Dantas e Eliani Maciel (à época), pelo apoio irrestrito na realização da especialização.

À Adriana Azevedo e Divanete Durães, pela ajuda no aprendizado inicial do geoprocessamento.

Ao meu orientador, Dr. Edson Eyji Sano, pelo apoio, paciência e boa vontade em repassar conhecimento.

Às professoras Rejane Cicerelli e Tati de Almeida, pela ajuda nos momentos em que precisei.

Ao ICMBio pelo apoio e valorização do aperfeiçoamento profissional de seus servidores.

RESUMO

O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto tem contribuído para o monitoramento dos processos de ocupação, alterações da vegetação e mudanças no uso da terra na Amazônia. Entre os processamentos digitais de imagens ópticas, relacionados à identificação e à quantificação de mudanças na Amazônia, destaca-se o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), que permite separar as contribuições espectrais de cada objeto dentro de um pixel, a partir de um conjunto de componentes puros da imagem. O objetivo desta análise foi avaliar o desempenho do MLME aplicado às imagens dos satélites Landsat-5/TM (bandas 3, 4 e 5) e Landsat-8/OLI (bandas 4, 5 e 6), para identificar indícios de exploração seletiva de madeira na Floresta Nacional (FLONA) do Trairão/PA. Para o mapeamento do corte seletivo, foram utilizadas as imagens-fração solo derivadas do MLME referentes aos anos de 2006, 2009, 2011 e 2015. Para 2006 e 2009, houve poucas alterações na FLONA relacionadas com exploração seletiva de madeira, as imagens-fração solo e as composições coloridas RGB apresentaram capacidades semelhantes de identificação de ramais. Em 2011, houve um acréscimo de 4.175% no número de ramais identificados, em relação ao ano de 2009. Em 2015 houve um decréscimo de 56% no número de ramais mapeados, em relação a 2011. Para 2011 e 2015, as imagens-fração solo apresentaram maior potencial no mapeamento de áreas desflorestadas do que suas respectivas composições coloridas.

Palavras-chave: modelo linear de mistura espectral; Amazônia; corte seletivo; Landsat-5/TM, Landsat-8/OLI.

ABSTRACT

The advances in remote sensing technologies has contributed to the monitoring of land occupation processes, changes in vegetation and land use changes in the Brazilian Amazon. Among the optical, digital image processing techniques related to the identification and quantification of changes in Amazon, we can highlight the Linear Spectral Mixture Model (LSMM) which allows separating the spectral contributions of each target within a pixel from a set of pure components of an image. The objective of this study was to analyze the performance of LSMM applied to the Landsat-5/TM (bands 3, 4 and 5) and Landsat-8/OLI (bands 4, 5 and 6) satellite images to identify selective logging indicatives in the National Forest of Trairão/PA. We considered the soil image-fractions derived by LSMM from the years of 2006, 2009, 2011 and 2015. For 2006 and 2009, there was low changes related to selective logging in the study area and the soil image-fraction and the RGB color composites presented similar performances. In 2011, there was an increase of 4,175% in the number of roads, in relation to 2009. In 2015, there was a decrease of 56% in the number of roads, in relation to 2011. For 2011 and 2015, the soil image-fraction presented higher potential for deforestation mapping in relation to the color composites.

Keywords: spectral linear mixture model; Amazon; selective logging; Landsat-5/TM; Landsat-8/OLI.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
2.1 Área de Estudo.....	9
2.2 Materiais	10
2.3 Métodos	13
2.3.1 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)	13
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é um bioma importante para o futuro estratégico do Brasil. Além da sua área ocupar quase a metade do território brasileiro, a região é detentora da maior biodiversidade do mundo. Ela possui um potencial madeireiro estimado em 60 bilhões de metros cúbicos de madeira em tora, cujo valor econômico potencial pode alcançar quatro trilhões de reais em madeira serrada. A explosão da atividade madeireira na Amazônia teve início com a vinda de madeireiros de outras partes do Brasil, em busca da nova fronteira. Essa migração ocorreu devido à abertura de estradas pelo governo, a partir da década de 60 e à exaustão dos recursos madeireiros das regiões Sul e Sudeste do país (Veríssimo et al., 2002).

Apesar da importância, um dos principais problemas ambientais enfrentados pelo governo brasileiro atualmente é o desmatamento desta região. Desmata-se para “valorizar” a terra e obter ganhos na medida em que o seu preço aumente no futuro. Por sua vez, as grandes obras de infraestrutura como hidrelétricas, pavimentação de rodovias (BR-163, Rodovia Transamazônica) e construção de portos (Itaituba e Santarém), alteraram a dinâmica da região e podem ter contribuído, em parte, para o recente aumento da derrubada de florestas (IPAM, ISA & AMAZON, 2014).

A criação de novas unidades de conservação (UCs) na região foi um dos pilares da política que reduziu o desmatamento na Amazônia (Soares-Filho et al., 2010). Apesar de a criação das UCs ter avançado nos últimos 15 anos e apesar de sua importância, essa política de conservação vem sendo ameaçada (Araújo & Barreto, 2015). Cerca de 2,5 milhões de hectares foram desmatados dentro de UCs na Amazônia até 2013 (Martins et al., 2012).

O avanço das tecnologias na área de sensoriamento remoto tem contribuído para o monitoramento dos processos de ocupação desta região, bem como das alterações da vegetação e mudanças no uso da terra. Neste contexto, o monitoramento de corte raso na Amazônia vem sendo consolidado desde 1988, a partir da estimativa de índices anuais de desmatamento através do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES), implementado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Em 2004, a instituição lançou o Projeto Detecção do Desmatamento em Tempo Real (DETER), um sistema de alerta para suporte à fiscalização e controle de desmatamento. Como o DETER utiliza dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), do satélite Terra, com

resolução espacial de 250 metros é possível detectar apenas polígonos de desmatamento com áreas maiores que 25 hectares (Inpe, 2010).

No entanto, a região sofre outras degradações florestais progressivas, com diminutas aberturas da estrutura do dossel e de maior dificuldade na detecção das imagens de satélite. O mapeamento do corte seletivo em ecossistemas florestais com dados de sensoriamento remoto é mais complexo que o mapeamento do desmatamento do tipo corte raso, para o qual já existe metodologia consolidada, uma vez que o corte seletivo deixa para trás um mosaico de florestas primárias com clareiras de derrubadas de árvores, trilhas de arraste, estradas primárias e secundárias, pátios de estocagem de madeira e de maquinário e árvores danificadas (Veríssimo et al., 1995).

Asner et al., (2005) estimaram que o desmatamento na Amazônia se caracteriza por aproximadamente 50% de corte raso e 50% de corte seletivo e indicaram também sobre a incidência de extração seletiva de madeira em áreas de conservação como UCs e terras indígenas.

Como o sistema DETER não detecta corte seletivo, o Inpe lançou o Projeto de Detecção da Exploração Madeireira na Amazônia (DETEX), que tem como objetivo, produzir mapeamentos de ocorrência de exploração seletiva de madeira, dentro dos distritos florestais sustentáveis (Xavier et al., 2009).

A metodologia utilizada no DETEX, baseia-se na utilização do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para a localização tanto dos pátios de estocagem quanto das áreas exploradas (Shimabukuro et al,1997). O modelo consiste em uma ferramenta de processamento digital de imagens que permite separar as contribuições espectrais de cada objeto dentro de um pixel, a partir de um conjunto de componentes puros da imagem (*endmembers*).

Tendo em vista o relevante papel ecológico e econômico que as UCs desempenham, como a proteção de ecossistemas e todas as suas espécies constituintes (Nagendra, 2008), os serviços ambientais obtidos direta ou indiretamente da natureza e a proteção de culturas tradicionais (Beltran & Phillips, 2000; Redford & Fearn, 2007), uma importante ação de proteção destas áreas protegidas é o acompanhamento deste tipo de exploração.

A hipótese desse estudo é a de que o processamento de imagens de satélite por meio da técnica do MLME permite realçar e identificar áreas de exploração seletiva de madeira na Amazônia.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do MLME aplicado às imagens dos satélites Landsat-5/TM e Landsat-8/OLI da FLONA do Trairão/PA para detectar indícios de corte seletivo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A FLONA do Trairão é uma UC federal de uso sustentável, localizada no sudoeste do Estado do Pará e está inserida na área de abrangência do Distrito Florestal Sustentável (DFS) da BR-163. A FLONA foi criada através do Decreto Federal s/n de 13 de fevereiro de 2006, possui uma área aproximada de 257.482 ha e abrange os municípios de Trairão, Itaituba e Rurópolis (Figura 1).

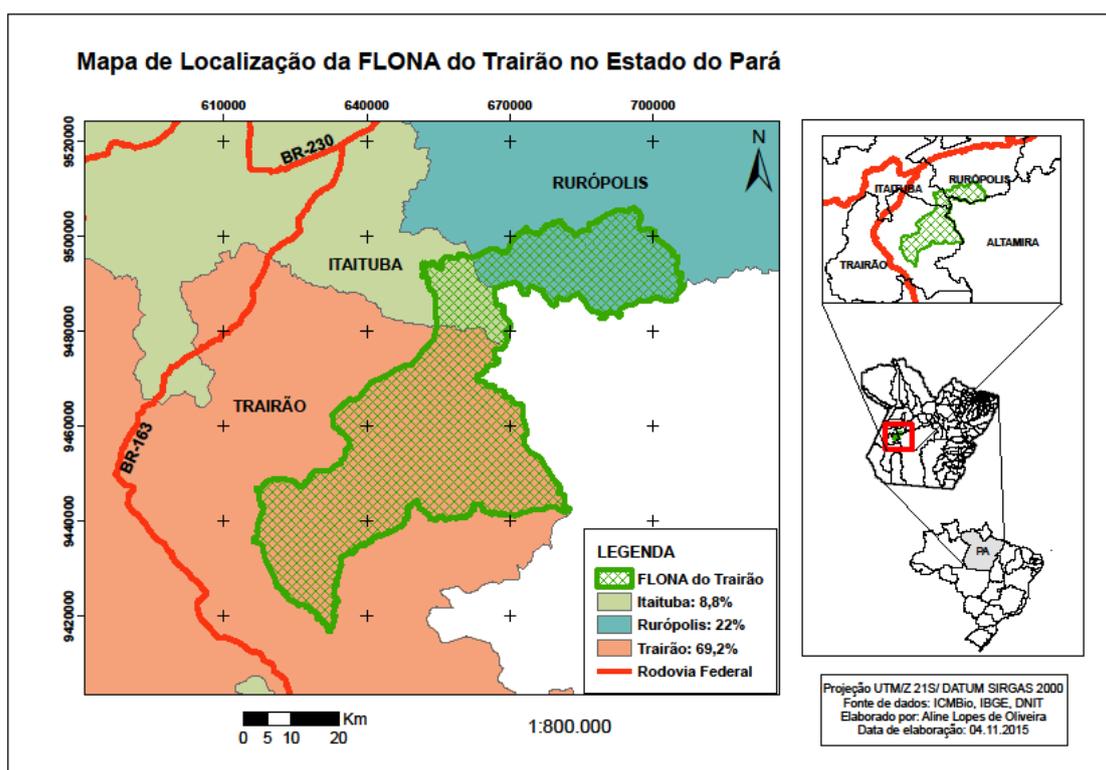


Figura 1 - Localização da FLONA do Trairão no Estado do Pará.

A FLONA do Trairão possui como objetivos básicos, a promoção do manejo de uso múltiplo sustentável dos recursos florestais, a manutenção e a proteção dos recursos hídricos e da biodiversidade, bem como o apoio ao desenvolvimento de métodos de exploração sustentável dos recursos naturais (BRASIL, 2006). Ela se situa entre a

confluência das rodovias BR-230 (Transamazônica) e BR-163 (Cuiabá-Santarém) e, encontra-se em uma zona de intensa pressão antrópica. Ferreira et al., (2005) afirmaram que decisões para construir ou pavimentar rodovias têm consequências de longo alcance, condenando a floresta circunvizinha ao desmatamento.

Desta forma, a criação desta UC constitui uma importante estratégia de conservação para conter o avanço do desmatamento no sudoeste do Pará, bem como a minimização da perda da biodiversidade decorrente de práticas econômicas não sustentáveis (exploração de madeira, monocultura, grilagem e pecuária).

Segundo o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), órgão responsável pela gestão das UCs federais, por meio da Coordenação Geral de Proteção Ambiental (CGPRO), as atividades de fiscalização ambiental na FLONA do Trairão são voltadas especialmente ao combate do crime ambiental mediante a averiguação das recorrentes denúncias delatadas a equipe de gestores quanto à retirada ilegal de madeira em diferentes localidades da UC.

2.2 Materiais

Para a análise desse estudo, foram utilizadas as imagens do sensor TM (Thematic Mapper), do satélite Landsat-5 e do sensor OLI (Operation Land Imager), do satélite Landsat-8. As imagens foram obtidas de forma gratuita no site do USGS, já georreferenciadas.

Apesar das cenas Landsat utilizadas nesse estudo (órbita 228; ponto 63), abrangerem os três municípios da FLONA, a área de recorte analisada está localizada no município de Trairão. Tal seleção foi devido à disponibilidade de imagens na página eletrônica do Serviço Geológico Americano (USGS) e a maior abrangência da FLONA em termos de extensão de área estar localizada neste município (Figura 2). Para o estudo foram selecionadas imagens Landsat do período de 2006-2015 (Tabela 1).

Devido à região Amazônica possuir alta nebulosidade, levou-se como critério de escolha a série temporal que apresentava a menor cobertura de nuvens, alusivas ao período denominado de “verão amazônico”, onde a quantidade de chuvas tende a ser menor que o restante do ano.

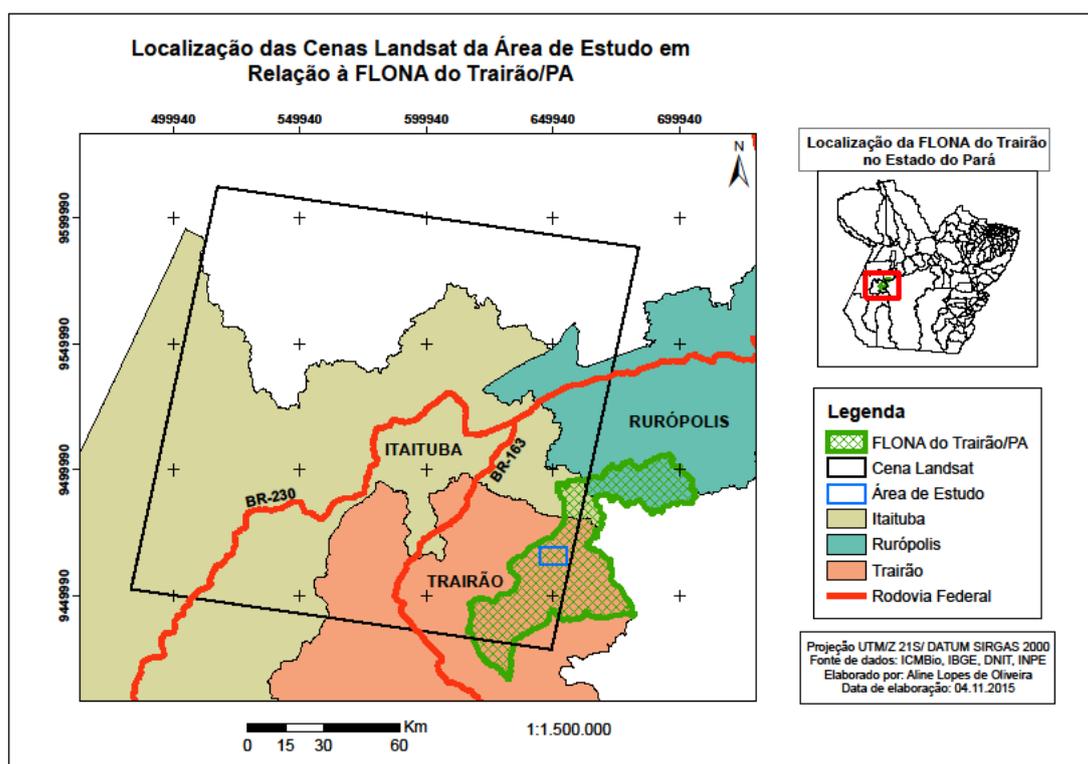


Figura 2 - Localização das cenas Landsat da área de estudo em relação à FLONA do Trairão/PA.

Tabela 1 – Dados das imagens dos satélites Landsat-5/TM e Landsat-8/OLI utilizadas na área de estudo.

SATÉLITE	SENSOR	ÓRBITA/PONTO	DATA
Landsat-5	TM (Thematic Mapper)	228/63	25/06/2006
			04/08/2009
			10/08/2011
Landsat-8	OLI (Operation Land Imager)	228/63	05/08/2015

O programa norte-americano Landsat provavelmente é o programa de sensoriamento remoto mais conhecido e difundido em todo o mundo. Com início em 1972, marcado com o lançamento do Landsat-1, este programa tem como principal característica o grande acervo de imagens da superfície do globo terrestre (Rudorff et al., 2009). Os dados Landsat constituem-se no mais longo e complexo registro das superfícies continentais do planeta Terra a partir do espaço, de grande valor para os estudos sobre mudanças globais (Novo, 2008).

O sensor Thematic Mapper (TM), a bordo do satélite Landsat - 5 representou um avanço nos sistemas de varredura multiespectral na época do seu lançamento. Foi

concebido para proporcionar resolução espacial mais fina, melhor discriminação espectral entre os objetos da superfície terrestre, maior fidelidade geométrica e melhor precisão radiométrica em relação ao seu antecessor, o Multispectral Scanner System (MSS) (Pinagé, 2013). As principais características de imageamento dos satélites supracitados, são mostrados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Características de imageamento do satélite Landsat-5.

Sensores	TM (Thematic Mapper) MSS (Multispectral Scanner System) - inativo		
Faixa de Imageamento:	170 km (norte-sul) x 185 km (leste-oeste)		
Bandas Espectrais/ Comprimento de Onda/ Resolução Espacial	Banda 1 - Azul	(0,45 - 0,52 μm)	30 m
	Banda 2 - Verde	(0,52 - 0,60 μm)	30 m
	Banda 3 – Vermelho	(0,63 - 0,69 μm)	30 m
	Banda 4 – Infrav. próximo - NIR	(0,76 – 0,90 μm)	30 m
	Banda 5 – Infrav. médio – NIR	(1,55 – 1,75 μm)	30 m
	Banda 6 – Infravermelho termal	(10,4 – 12,5 μm)	120 m
	Banda 7 – Infravermelho médio	(2,08 - 2,35 μm)	30 m
Órbita:	Heliossíncrona (altitude aproximada de 705 km)		
Resolução Radiométrica	8 bits		
Resolução Espacial	30 e 120 m		
Tempo de revisita	16 dias		

Fonte: Adaptado de USGS (2015).

O Landsat-8 é o mais recente satélite da série, foi lançado em fevereiro de 2013 e possui imagens disponíveis a partir do segundo semestre daquele ano. Possui resolução espacial de 30 m nas bandas multiespectrais, de 15 m na banda pancromática e de 100 m nas bandas do termal. Sua resolução radiométrica é de 12 bits e seu período de revisita é de 16 dias. Teve um aumento de resolução espectral, em relação aos sensores anteriores, contando agora com 11 bandas. O tamanho aproximado da cena Landsat-8 é de 170 km ao norte-sul por 183 km a leste-oeste.

Tabela 3 – Características de imageamento do satélite Landsat-8

Sensores	Multiespectral - OLI (Operational Land Imager) nas bandas de 1 a 7 e 9, pancromática na banda 8 e Termal - TIRS (Thermal Infrared Sensor) nas bandas 10 e 11		
Largura da faixa:	170 km (norte-sul) x 183 km (leste-oeste)		
Bandas Espectrais/ Comprimento de Onda/ Resolução Espacial	Banda 1 - Aerossol, ultra-azul	(0,43 - 0,45 μm)	30 m
	Banda 2 - Azul	(0,45 - 0,51 μm)	30 m
	Banda 3 - Verde	(0,53 - 0,59 μm)	30 m
	Banda 4 - Vermelho	(0,64 - 0,67 μm)	30 m
	Banda 5 - Infrav. próximo - NIR	(0,85 - 0,88 μm)	30 m
	Banda 6 - SWIR 1	(1,57 - 1,65 μm)	30 m
	Banda 7 - SWIR 2	(2,11 - 2,29 μm)	30 m
	Banda 8 - Pancromática	(0,50 - 0,68 μm)	15 m
	Banda 9 - Cirrus	(1,36 - 1,38 μm)	30 m
	Banda 10 - Infrav. termal - TIRS 1	(10,60 - 11,19 μm)	100 m
	Banda 11 - Infrav. termal - TIRS 2	(11,50 - 12,51 μm)	100 m
Órbita:	Heliossíncrona (altitude aproximada de 705 km)		
Resolução Radiométrica	12 bits		
Resolução Espacial	15, 30 e 100 m		
Tempo de revisita	16 dias		

Fonte: Adaptado de USGS (2015).

A plataforma Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores: Operacional Land Imager (OLI), com as bandas multiespectrais de 1 a 7 e 9, com a banda 8 pancromática e Thermal Infrared Sensor (TIRS) nas bandas 10 e 11. Em relação as plataformas anteriores, novas bandas foram criadas, tais como a nova banda 1 (coastal aerosol) que é útil para estudos costeiros, de água e aerossol e a nova banda 9 (cirrus) é útil para detecção de nuvens (USGS, 2015).

2.3 Métodos

2.3.1 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

A mistura espectral dos alvos pode ser modelada através de várias técnicas. Entre os processamentos digitais para tratamento das imagens ópticas, relacionados à identificação e à quantificação de mudanças na Amazônia, destaca-se o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (Shimabukuro et al., 1998). Esse modelo, além de permitir a extração repetitiva e quantitativa de informação ao nível do subpixel (Roberts et al., 1998), origina imagens-fração, com significado físico dos alvos e da cobertura terrestre. Atualmente, várias aplicações no monitoramento do desmatamento de áreas

degradadas e na classificação do uso e cobertura da terra na Amazônia brasileira têm incluído o MLME na metodologia de extração de informações dos alvos (Inpe, 2008). O modelo tem como ideia principal estimar a proporção dos diferentes elementos presentes na composição espectral de um pixel da imagem. Ele utiliza a informação do comportamento espectral dos chamados “pixels puros” (*endmembers*), de cada um desses elementos, gerando imagens-fração vegetação, solo e sombra (Figura 3).

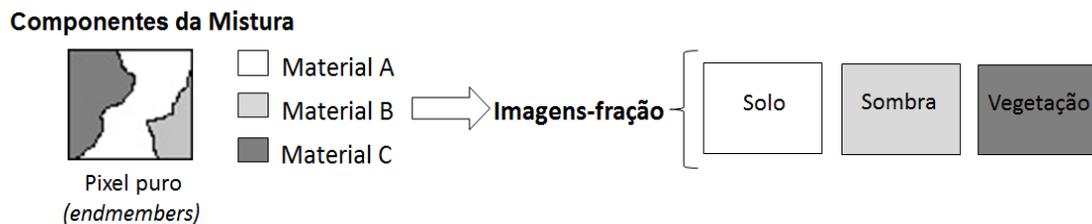


Figura 3. Representação esquemática de mistura espectral.

Com o uso do modelo, é possível estimar a proporção de cada um dos *endmembers*, a partir da aplicação da técnica de otimização dos mínimos quadrados, cuja finalidade é estimar as proporções minimizando a soma dos quadrados dos erros. Shimabukuro e Smith (1991) indicaram os componentes vegetação, solo e sombra como constituintes básicos de cenas florestadas, e descreveram o modelo de mistura espectral, em cada pixel da cena, pela seguinte equação:

$$r_i = a \text{veg}_i + b \text{solo}_i + c \text{sombra}_i + e_i \quad (1)$$

Onde:

r_i = resposta do pixel na banda $_i$;

a , b e c = proporções de vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente;

veg_i , solo_i e sombra_i = respostas espectrais das componentes da vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente;

e_i = erro na banda $_i$, (porções do espectro que não foram modeladas);

i = banda a ser utilizada.

Para o estudo, foram selecionadas três bandas nas faixas espectrais do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio (bandas 3, 4 e 5 do sensor TM e bandas 4, 5 e 6 do sensor OLI, respectivamente). Nas bandas 3 e 4, a vegetação sadia apresenta, respectivamente, forte absorção da radiação solar incidente devido a processos fotossintéticos e forte reflexão da radiação incidente devido à estrutura interna

(carotenos) das folhas. As bandas supracitadas eram selecionadas pela grande maioria dos usuários na década de 1980 e 90, quando as imagens Landsat eram comerciais e o número de bandas era um fator a ser considerado no preço final, além de apresentarem um bom contraste nas composições coloridas RGB.

Embora atualmente não haja restrições sérias quanto a utilização de todas as bandas multiespectrais em termos de custos ou capacidade computacional de processamento, optou-se, nesse estudo, pela análise do desempenho do MLME somente com as três bandas mencionadas por motivos históricos e porque ainda há cientistas que utilizam apenas essas três bandas para aplicações ambientais. Para o cálculo de desmatamento anual, o programa PRODES, do INPE utiliza em sua metodologia o MLME nas bandas 3, 4, 5 do Landsat/TM (Câmara et al., 2006).

As quatro imagens referentes aos anos de 2006, 2009, 2011 e 2015 foram recortadas de acordo com a área de interesse, utilizando o software ENVI 5.0.1 seguindo a própria metodologia do programa (menu e sub menus: “Spectral” – “Spectral Unmixing” - “Linear Spectral Unmixing”), bem como o software ArcGIS 10.2.2 para a digitalização dos ramais, pátios de estocagem e produção de mapas.

A seleção dos *endmembers* dos componentes solo, sombra e vegetação foram realizadas de forma visual, através da coleta dos pixels nas áreas de interesse (ROI). Ao todo foram coletados 12 pixels, ou seja, 3 pixels para cada ano analisado.

Para a fração solo priorizou-se por uma área onde nitidamente o solo apresentava-se exposto. Na coleta da fração sombra é recomendável que sejam adquiridos pixels em regiões que possuam sombras de relevo ou de nuvens e corpos d’água, a fim de garantir maior precisão da componente sombra. Para tal foram utilizados pixels gerados por sombreamento da topografia.

Para a vegetação optou-se por áreas de floresta com uma cobertura vegetal mais homogênea. Portanto, como resultado da aplicabilidade do modelo de mistura, foram geradas três imagens-fração representando as proporções de solo, sombra e vegetação existente em cada pixel da imagem, em níveis de cinza.

Após as cenas Landsat serem processadas pela técnica do MLME, utilizou-se o *software* ArcGIS 10.2.2 para a vetorização e digitalização dos ramais de exploração e/ou pátios de estocagem de madeira, identificados pelo observador de forma visual.

As imagens-fração solo foram utilizadas nesta análise, devido ao maior realce que os pixels com alta porcentagem de solo proporcionam, indicando assim a ocorrência da

exploração madeireira. Em alguns momentos de imprecisão na identificação visual, o auxílio da composição colorida foi utilizada para a ratificação das áreas de exploração.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o recorte das cenas Landsat-5/TM e Landsat-8/OLI nas áreas de interesse do estudo e com a aplicação do MLME, foram obtidas como produto final, três imagens-fração relacionadas a solo, sombra e vegetação. Cada imagem-fração representa a quantidade do elemento em questão, contida em cada pixel da imagem original.

A fim de facilitar a interpretação visual dos resultados foram gerados mosaicos referentes à composição colorida (Figura 4), como também mosaicos das imagens-fração solo combinadas à imagem-fração solo mais ramais identificados, respectivamente, de cada um dos anos estudados (2006, 2009, 2011 e 2015).

A área de recorte das cenas Landsat-5/TM e Landsat-8/OLI deste estudo, apresentou uma área aproximada de 98,64 km².

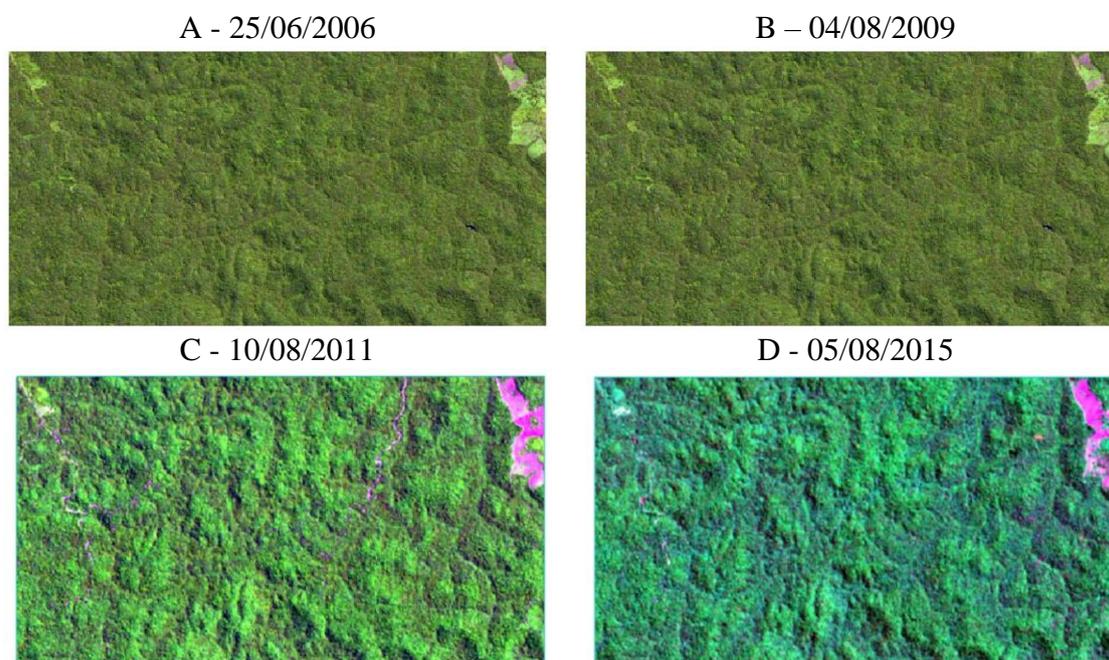


Figura 4 – Composições coloridas da área de recorte da cena 228/63, referentes às imagens Landsat-5/TM (R5G4B3/A, B e C) e Landsat-8/OLI (R6G5B4/D).

Na Figura 5, em escala aproximada de 1:178.000 e referente ao ano de 2006 é possível identificar, tanto na composição colorida quanto na imagem-fração solo, o início da

exploração florestal da cena. Estas características demonstram que as imagens possuem um potencial semelhante quanto à identificação dos ramais de exploração.

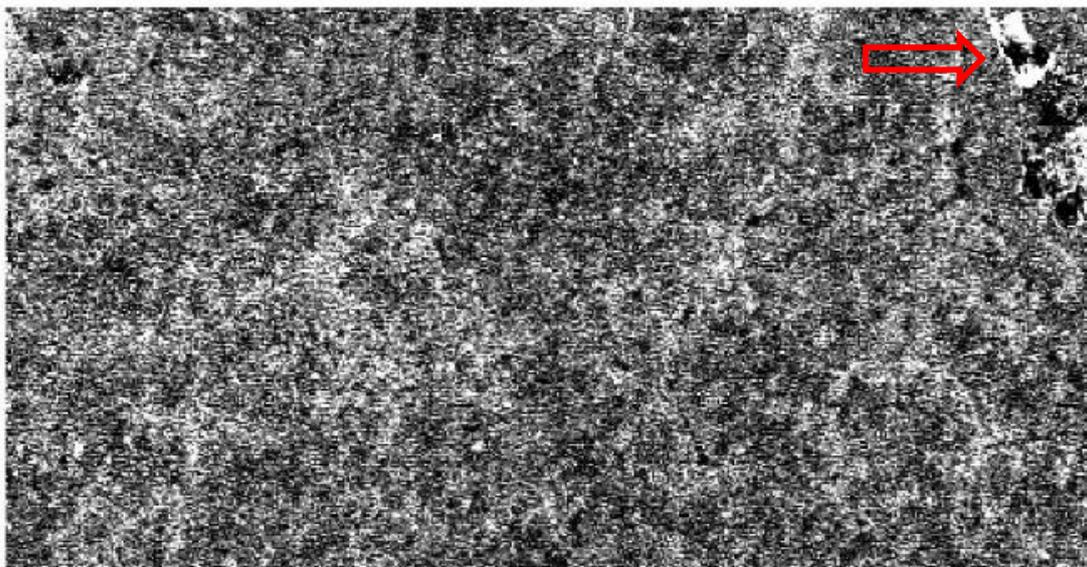
Ressalta-se que, na imagem-fração solo onde a cobertura vegetal encontra-se ausente, o comportamento da resposta espectral dos pixels é alta, realçando a presença de solo exposto através do agrupamento de pixels na cor branca ou em tons de cinza-claro.

Nas áreas onde há o predomínio de pixels escuros, presume-se o indício de uma área em regeneração vegetacional, tendo em vista a baixa resposta espectral dos pixels (indicada pela seta na Figura 5a).

Kawakubo et al., (2013) ao mapearem o avanço do desmatamento no município de São Félix do Xingu/PA, a partir do processamento digital de imagens Landsat-5 através da técnica do MLME, confirmaram que na imagem-fração solo as áreas cobertas por florestas apresentavam tonalidade escura, indicando pouca ou nenhuma interação da radiação com o solo. As áreas desmatadas (que incluem predominantemente as classes de campo/pastagem e solo exposto) possuem proporções bem maiores de solo em sua mistura, apresentando tonalidades que variam do branco ao cinza.

No ano de 2006, verifica-se que a cena possui quatro ramais com exploração florestal identificável, perfazendo um total de 8.030 m desflorestados.

A – Imagem-fração solo 2006



B - Ramais identificados

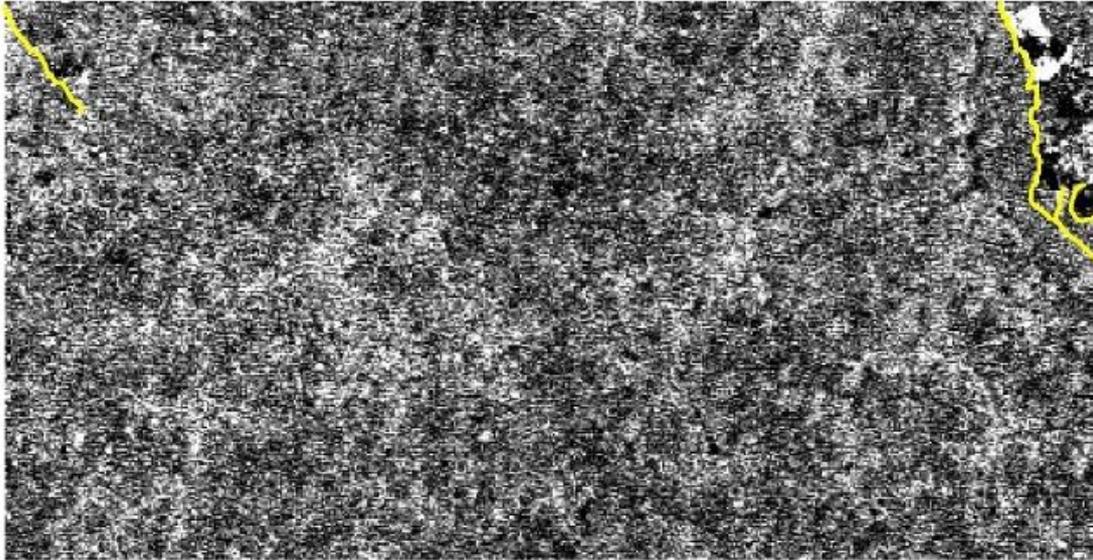
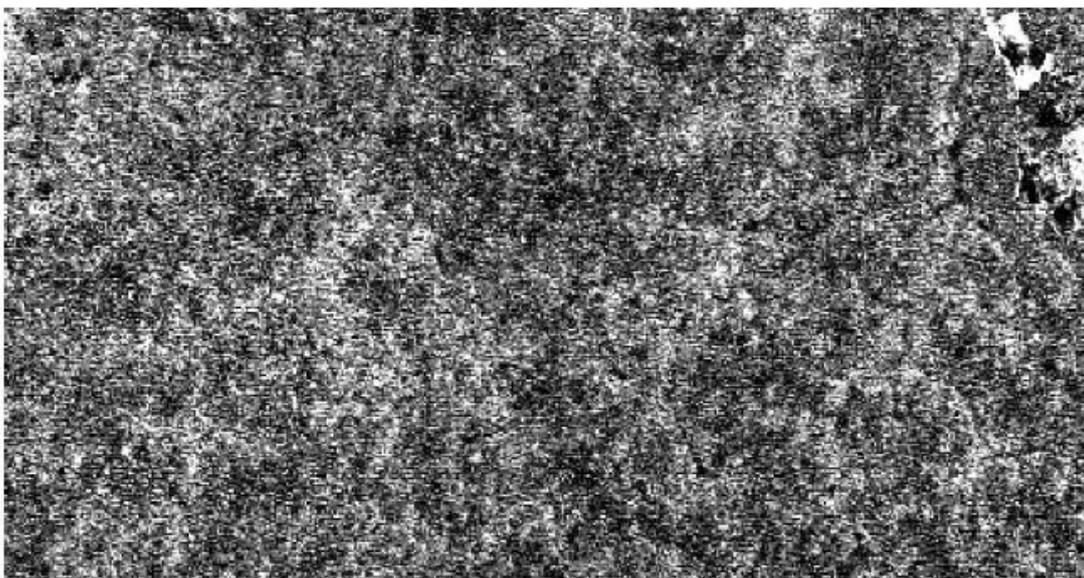


Figura 5– Imagem Landsat-5/TM, imagem-fração solo (A) e posterior identificação dos ramais de exploração da área de recorte (B).

No mosaico referente ao ano de 2009, em escala aproximada de 1:178.000, tem-se a percepção de que não houve alteração na cena, em relação a análise anterior (Figuras 6a e 6b). Para esse ano, a área coberta por essa cena continuou com quatro ramais madeireiros e uma extensão total de 9.300 m, ou seja, uma modificação pequena em relação ao ano precedente.

Observou-se novamente que, tanto a imagem da composição colorida quanto à imagem-fração solo apresentaram um potencial semelhantes na identificação de ramais.

A – Imagem-fração solo ano 2009



B - Ramais identificados

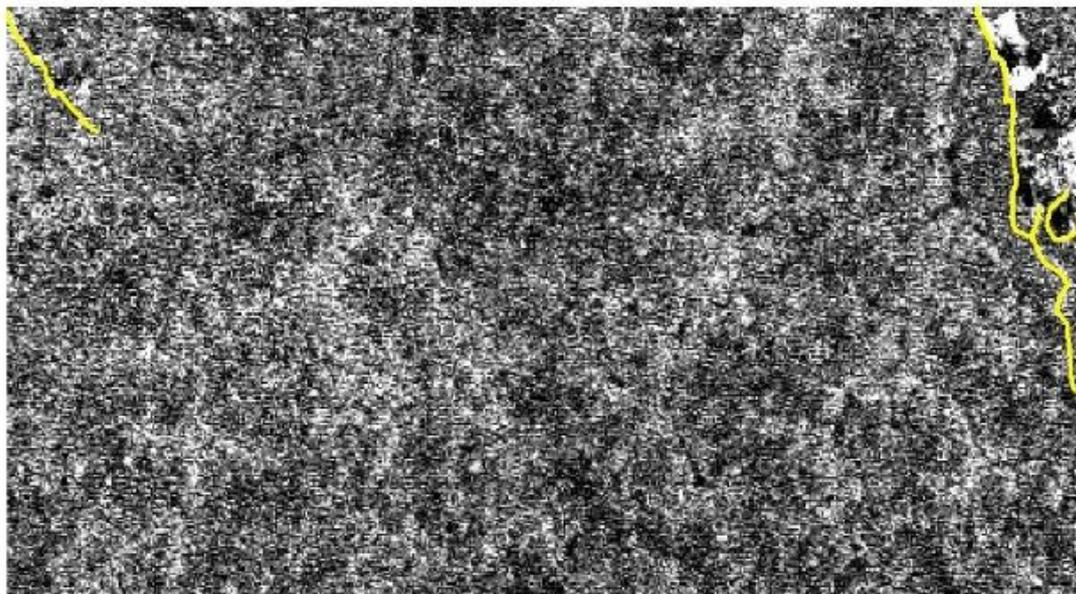


Figura 6 – Imagem Landsat-5/TM, imagem-fração solo (A) e posterior identificação dos ramais de exploração da área de recorte (B).

A partir do ano de 2011, nota-se grande alteração na área de estudo. Percebe-se no mosaico em escala aproximada de 1:178.000, um grande aumento tanto no número de ramais identificados, quanto na expansão de área dos mesmos.

Onde a cobertura vegetal está ausente, o comportamento da resposta espectral do solo é alta, possibilitando a percepção por meio do agrupamento de pixels na tonalidade branca ou cinza-claro, na imagem-fração solo, de um acentuado aumento na área de corte raso em relação ao ano de 2009 (indicada pela seta na Figura 7a).

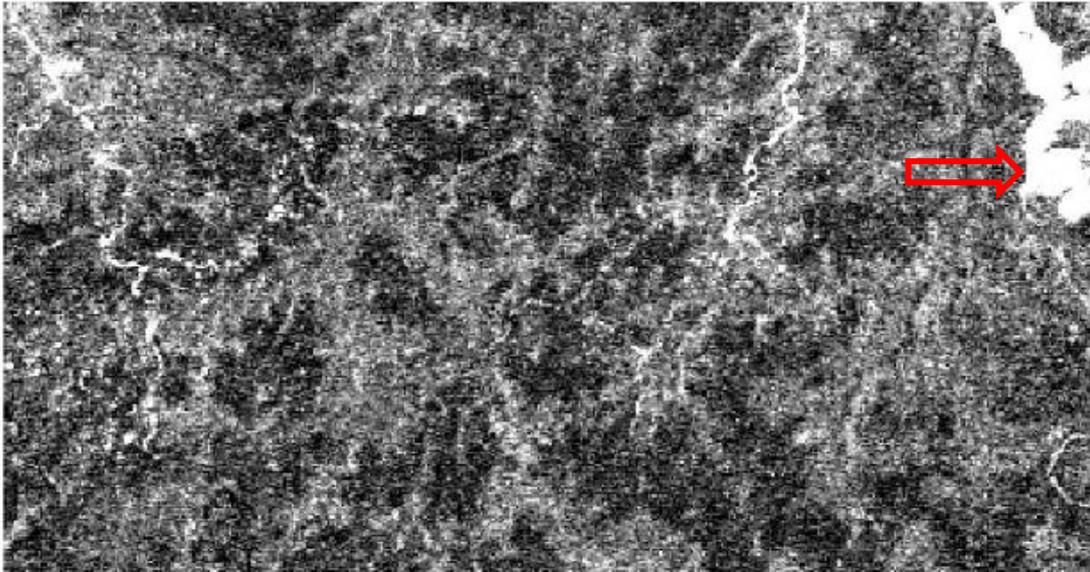
Destaca-se também que, nem todos os ramais identificados na imagem-fração solo foram possíveis de serem visualizados na composição colorida, logo entende-se que, para esta análise, a imagem-fração utilizada possui um potencial de identificação de ramais superior ao da composição colorida.

Vasconcelos e Novo (2004), ao mapearem o uso e cobertura da terra na região do reservatório de Tucuruí/PA, através da técnica do MLME aplicada a imagens Landsat-5, obtiveram como resultado imagens-fração solo na tonalidade branca, em áreas de pastagens e áreas de queimada, evidenciando a alta resposta espectral do solo, devido a escassa cobertura vegetal presente.

Outro ponto interessante na cena é o número significativo de pequenas áreas desflorestadas na porção sudoeste do recorte (indicada pela elipse na Figura 7b), que hipoteticamente poderiam ser classificadas como pátios de estocagem de madeira,

devido as aberturas pontuais isoladas que interceptam ou não os ramais de exploração e ao formato da abertura do dossel florestal. No entanto, para a constatação desta proposição, existe a necessidade da confirmação em campo.

A – Imagem-fração solo ano 2011



B - Ramais identificados

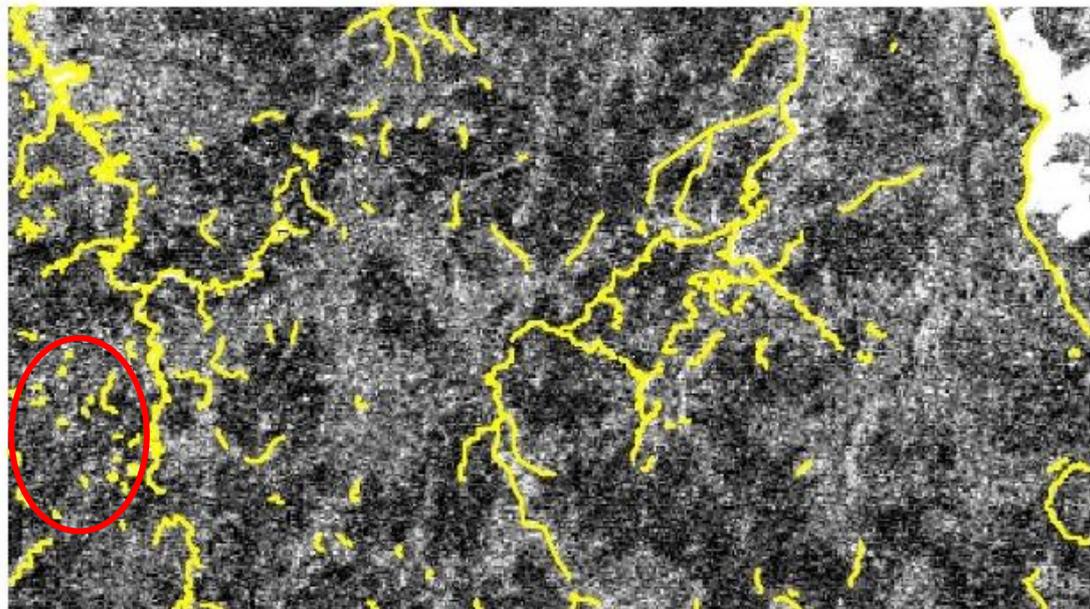
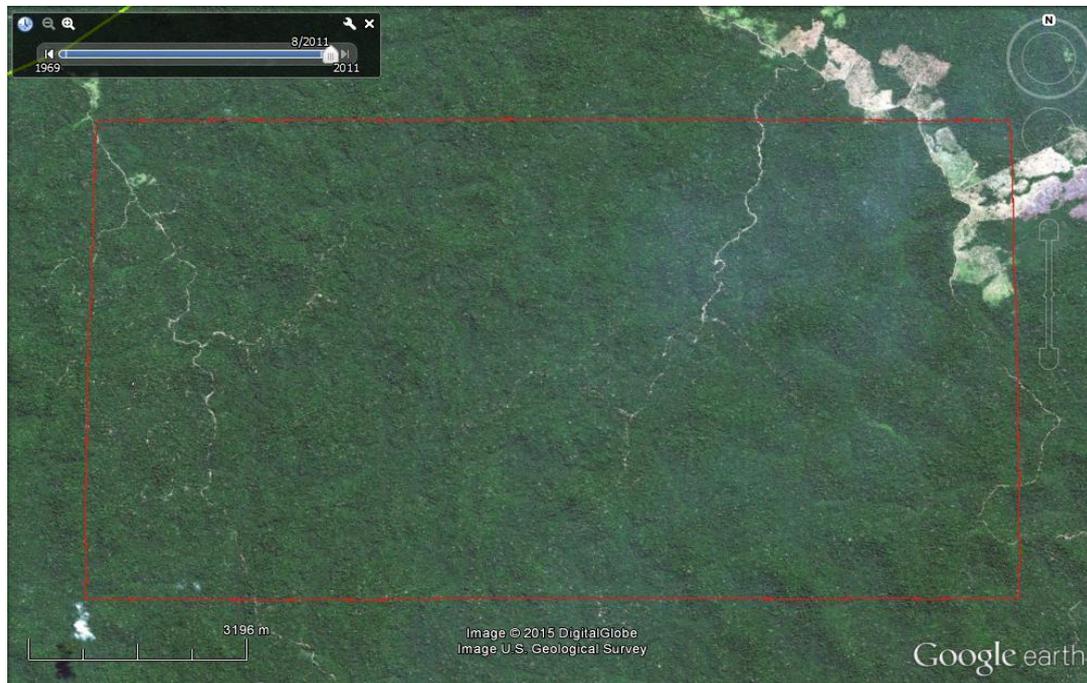


Figura 7 – Imagem Landsat-5/TM, imagem-fração solo (A) e posterior identificação dos ramais de exploração da área de recorte (B).

Como não houve a possibilidade da averiguação em campo, tais elementos foram computados como ramais de exploração. As Figuras 8a e 8b, provenientes do *software Google Earth* evidenciam as suposições identificadas na imagem-fração solo.

A



B

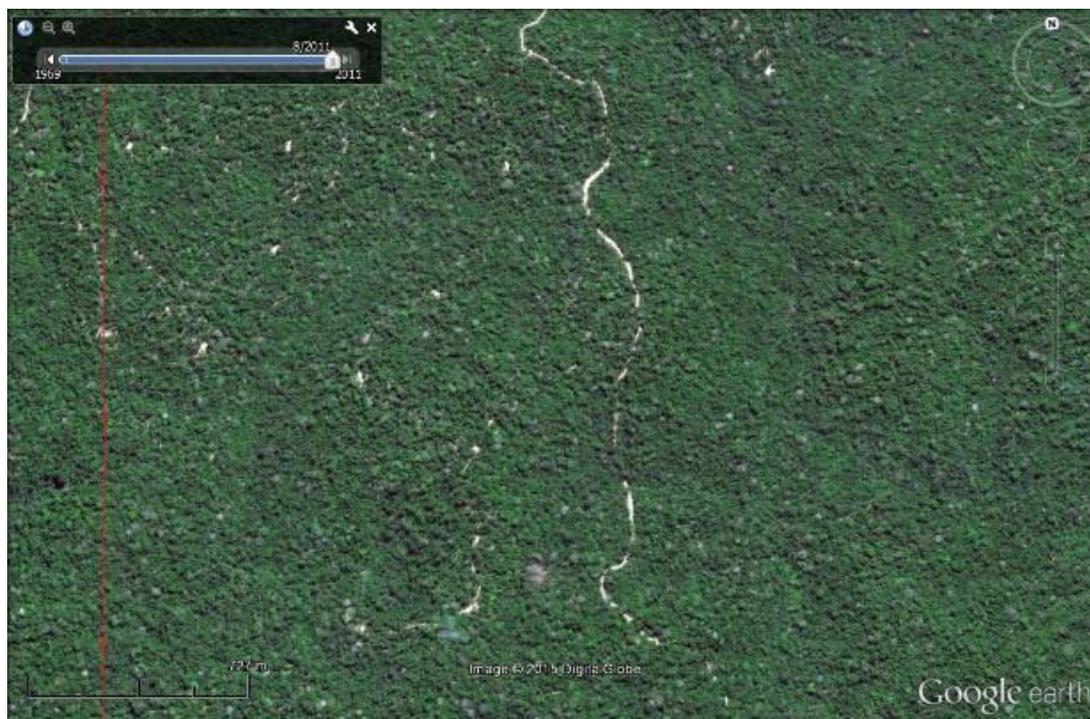


Figura 8 – Imagens disponibilizadas no programa *Google Earth* (ano 2011) e a visualização da exploração florestal na FLONA do Trairão/PA.

A Figura 9 demonstra o dinamismo ocorrido no ano de 2011. Para este ano, foram identificados 167 ramais, tendo o menor ramal 45 m e o maior ramal 8.190 m, perfazendo uma área explorada de aproximadamente 115.840 m.

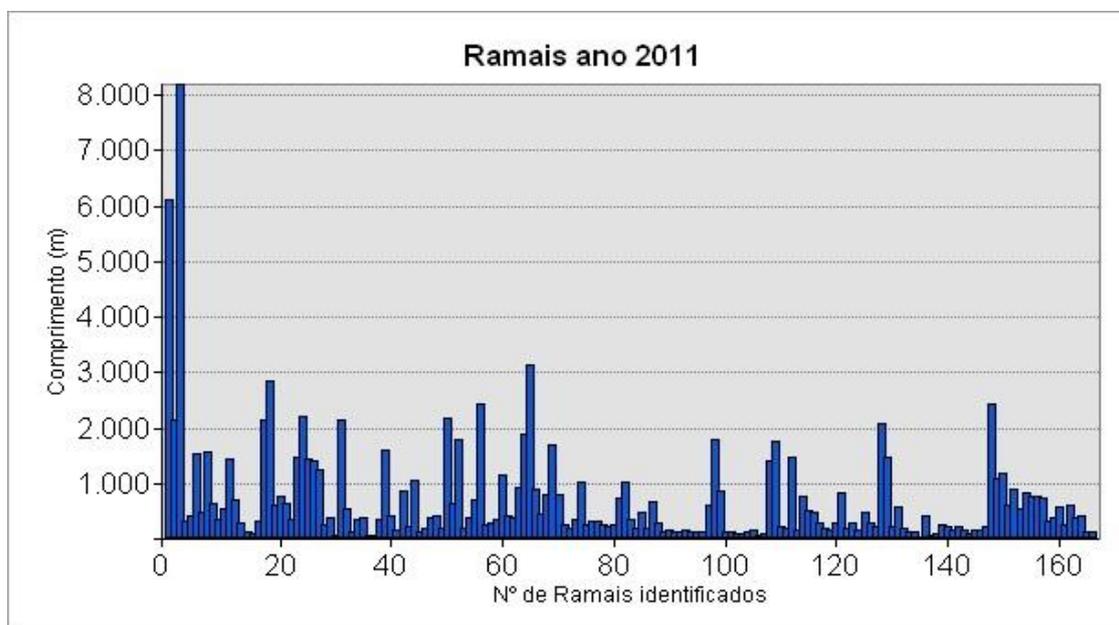


Figura 9 – Dinâmica da exploração florestal ocorrida na FLONA do Trairão, no ano de 2011.

É importante frisar que tais dados poderiam ser ainda mais elevados, levando em consideração que a análise temporal das imagens Landsat-5/TM, seria realizada de três em três anos. No entanto, não foi possível obter a cena relativa ao ano de 2012 da área, tendo em vista que o satélite Landsat-5/TM entrou em inatividade a partir de 22 de outubro de 2011 (Inpe, 2015).

Um fator organizacional também pode ter influenciado no aumento da exploração florestal entre os anos de 2009 e 2011. A criação do órgão gestor da FLONA do Trairão, o ICMBio, estava em processo de consolidação, visto que, a administração das áreas federais protegidas por lei foram repassadas do IBAMA para o ICMBio, no ano de 2007 e somente em meados de 2009 foram lotados servidores na região da rodovia BR-163, provenientes do primeiro concurso público do órgão.

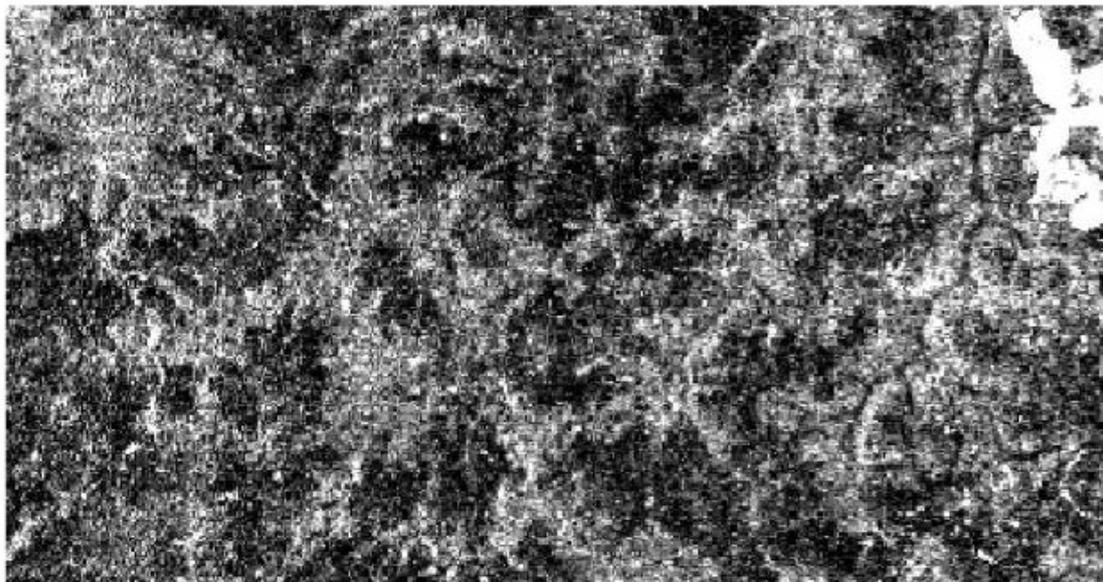
Tal fato pode ter contribuído devido ao baixo conhecimento da região por parte dos servidores e/ou pela inconstante presença do governo federal na região por meio de atividades de fiscalização ambiental na UC.

A partir de 2013, o satélite Landsat-8/OLI entrou em atividade, no entanto as imagens disponibilizadas para a área de estudo apresentavam intensa nebulosidade nos anos de 2013 e 2014, até mesmo no período denominado “verão amazônico”, fato que poderia prejudicar e/ou mascarar os resultados da análise. Desta forma, a cena do ano de 2015 foi utilizado para a continuidade da análise temporal.

Para 2015, nota-se novas alterações na cena analisada. A priori, a composição colorida aparenta demonstrar uma diminuição com maior expressividade, quanto à quantidade de ramais identificados em relação ao ano de 2011, do que a realidade. Na análise da imagem-fração solo gerada para esse ano, observa-se que a mesma possui uma capacidade de discriminação de ramais muito elevada em relação a da composição colorida.

A comparação das imagens-fração solo dos anos de 2011 e 2015, mostra redução no número de ramais identificados em 2015, com uma dispersão mais homogênea dos mesmos em toda a área do recorte, uma diminuição na quantidade de pequenas aberturas do dossel da floresta (identificados anteriormente como possíveis pátios de estocagem) e a manutenção da extensão da área identificada com solo exposto (Figuras 10a e 10b).

A – Imagem-fração solo ano 2015



B - Ramais identificados

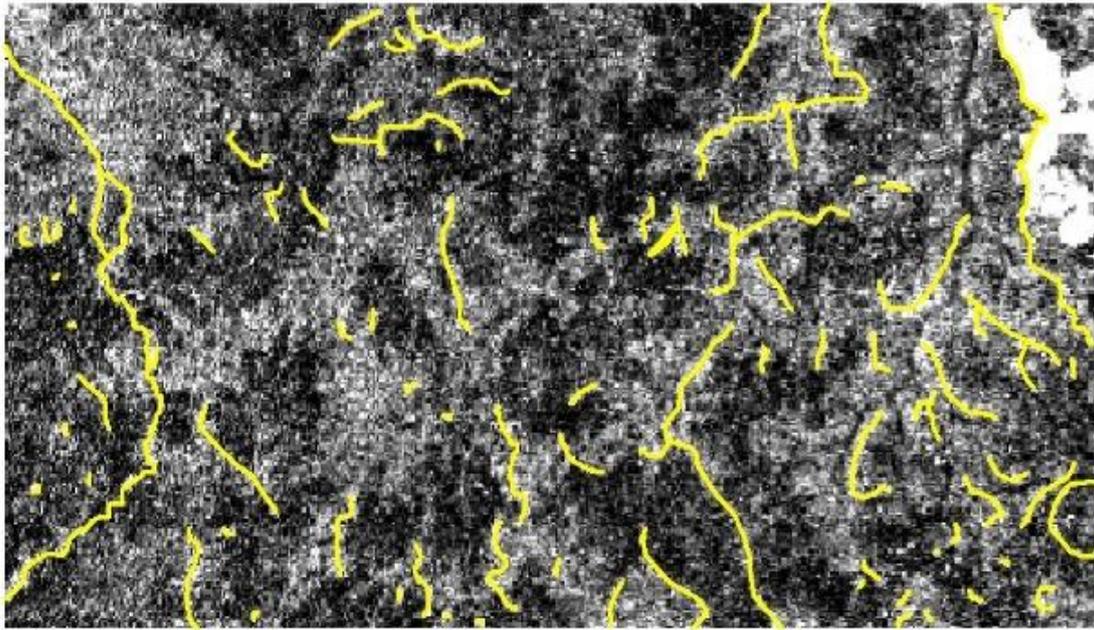


Figura 10 – Imagem Landsat-8/OLI, imagem-fração solo (A) e posterior identificação dos ramais de exploração da área de recorte (B).

A Figura 11 demonstra o dinamismo da cena ocorrida no ano de 2015. Neste ano, foram identificados 93 ramais, tendo o menor ramal 56 m e o maior ramal 8.940 m, perfazendo uma área explorada de aproximadamente 81.070 m.

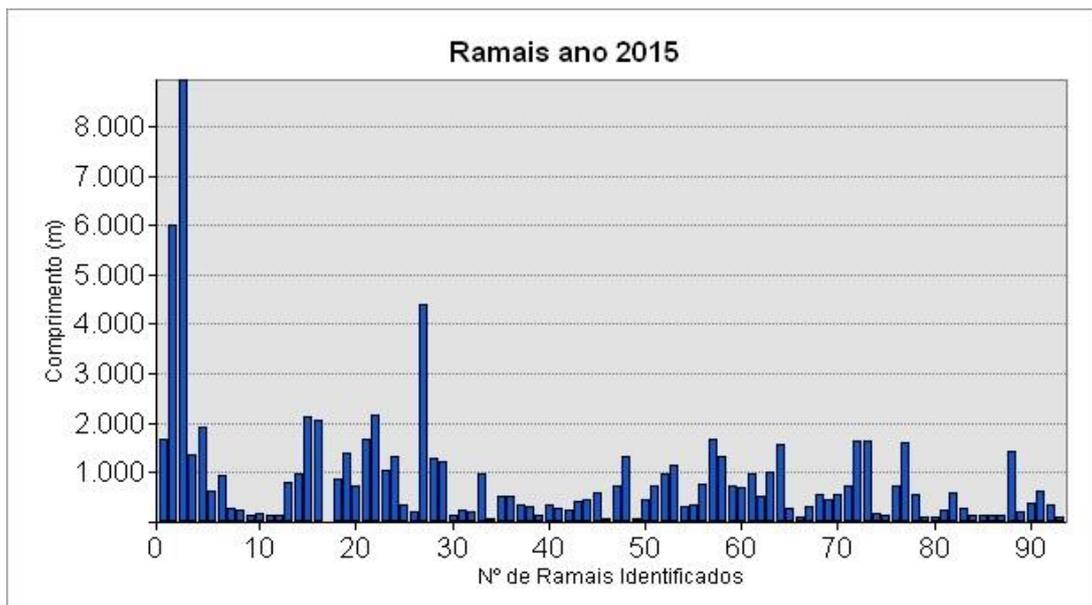


Figura 11 – Dinâmica da exploração florestal ocorrida na FLONA do Trairão, no ano de 2015.

Cabe salientar que a partir do ano de 2011, com o quadro de servidores melhor estabilizado, o ICMBio intensificou com veemência as atividades de fiscalização ambiental na UC, em especial no município de Trairão. Outro evento que pode ter contribuído para a diminuição das taxas de exploração florestal na área de estudo é o fator climático, tendo em vista que, entre os anos de 2012 a 2014 o município de Itaituba (cidade com estação pluviométrica distante 70 km), obteve chuva acumulada mensal acima da média para os meses de junho e agosto, em torno de 77mm/mês, enquanto que a média acumulada mensal para o período é de 45mm/mês (INMET, 2015).

Pinagé (2011) afirmou que vários fatores afetam o sucesso do mapeamento da exploração seletiva: o grau de umidade da estação (em secas prolongadas o dossel da floresta expõe maior quantidade de solo), o tempo decorrido desde a exploração, a intensidade de exploração, entre outros.

A alta precipitação pluviométrica atinge diretamente o escoamento de madeira ilegal da UC, levando em consideração que em períodos como este, o tráfego de caminhões “toreiros” é prejudicado devido à grande quantidade de atoleiros que são formados ao longo dos ramais de extração.

A Figura 12 demonstra didaticamente a análise temporal da exploração florestal ocorrida entre os anos de 2006 a 2015 no interior da FLONA do Trairão. Nele é possível constatar que entre os anos de 2006 e 2009, a cena encontrava-se estável tanto em relação ao número de ramais identificados, quanto na extensão da área explorada.

A Tabela 4, no entanto, evidencia grandes alterações na cena. A partir do ano de 2011 nota-se um incremento de 4.175% em relação ao número de ramais mapeados e de 1.245% em relação à área explorada, tendo como referência o ano de 2009. Já para o ano de 2015, verifica-se um decréscimo de 56% em relação ao número de ramais identificados e de aproximadamente 70% em relação a área de exploração florestal mapeada, em relação ao ano de 2011.

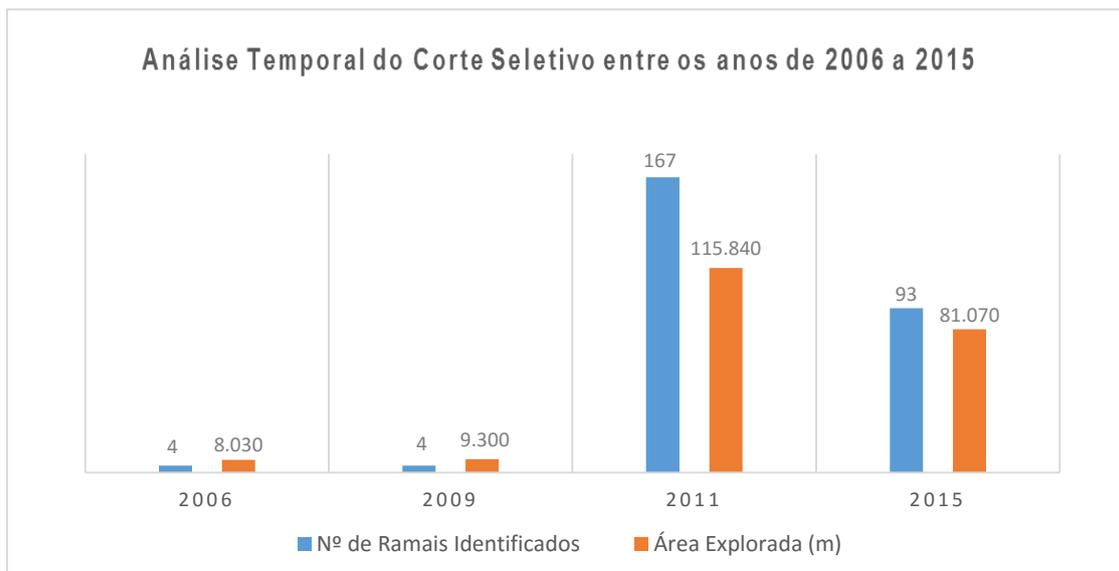


Figura 12 – Análise temporal do corte seletivo entre os anos de 2006 a 2015.

Tabela 4 – Análise temporal, em percentagem, do corte seletivo entre os anos de 2009 a 2015.

Ano	Nº de ramais identificados	Área explorada (m)	Ano	Nº de ramais identificados	Área explorada (m)
2009	4	9.300	2011	167	115.840
2011	167	115.840	2015	93	81.070
Incremento	4.175%	1.245%	Decréscimo	56%	70%

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos nesta análise, as imagens-fração solo derivadas do MLME, nas bandas 3, 4 e 5 do satélite Landsat-5/TM e nas bandas 4, 5 e 6 do satélite Landsat-8/OLI, demonstraram possuir a mesma capacidade de identificação de ramais, provavelmente por possuírem a mesma resolução espacial (30m).

O MLME aplicado as imagens dos satélites Landsat-5/TM e Landsat-8/OLI, mostraram-se eficientes quanto ao monitoramento do corte seletivo, já que, nos anos de intensa atividade ilegal, as imagens-fração solo geradas demonstraram grande capacidade no mapeamento da cena quando comparadas a composição colorida.

O MLME permitiu direcionar na cena, as principais áreas que se encontravam sob forte pressão antrópica, seja na indicação de áreas desflorestadas, em processo de regeneração vegetacional ou sob corte seletivo.

Caso o observador necessite de um maior detalhamento da cena como a discriminação de trilhas de arraste, estrada principal, estrada secundária, pátios de estocagem, dentre outros, recomenda-se a utilização de imagens de satélite com resolução espacial superior às imagens Landsat analisadas.

Em uma visão sistêmica, o MLME influencia diretamente no auxílio do planejamento das atividades de combate a crimes ambientais. Ressalta-se que, para obtermos uma fiscalização ambiental mais preventiva do que reativa é necessário que as detecções de áreas degradadas por exploração madeireira, sejam priorizadas como estratégia de antecipação ao desmatamento no interior das UCs.

É importante ressaltar que, o incentivo em pesquisas na área de sensoriamento remoto, a capacitação de agente públicos, o investimento na obtenção de imagens de sensores de alta resolução espacial, que facilitem o monitoramento de extensas áreas protegidas na Amazônia, configuram-se como uma importante estratégia na área de políticas de proteção ambiental voltadas para esse bioma.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, E., & Barreto, P. 2015. **Estratégias e fontes de recursos para proteger as Unidades de Conservação da Amazônia** (p. 40). Belém: Imazon.

Asner, G. P. et al. Selective logging in the Brazilian Amazon. **Science (New York, N.Y.)**, v. 310, n. 5747, p. 480–2, 21 out. 2005.

Beltran & Phillips, A. (EDS.). **Indigenous and Traditional Peoples and Protected Areas: principles, guidelines and Case Studies**. Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN/WWF, 2000. p. 133pp.

BRASIL. Decreto federal s/nº de 13 de fevereiro de 2006.

Câmara, G.; Valeriano, D. D. M.; Soares, J. V. **Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal**. São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/metodologia.pdf>>. Acessado em 24/10/2015.

Ferreira, L.V.; Venticinque, E.; de Almeida, S.S. 2005. **O Desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas**. Estudos Avançados 19(53): 1-10.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, 2015. **Tempo agora. Gráficos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>>. Acessado em 07/12/2015.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2008. **Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por satélites – Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD e QUEIMADAS**. Disponível em: <www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008>. Acessado em: 11/11/2015.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2010. **Sistema DETER. Detecção de desmatamento em tempo real**. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=2282>. Acessado em 14/10/2015

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2015. **Divisão de geração de imagem**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/Satelites/LANDSAT5.php>>. Acessado em 07/12/2015.

IPAM, ISA, & AMAZON. 2014. **O Aumento no Desmatamento na Amazônia em 2013: um ponto fora da curva ou fora de controle?** Belém. Disponível em: <<http://amazon.org.br/publicacoes/o-aumento-no-desmatamento-na-amazonia-em-2013-um-ponto-fora-da-curva-ou-fora-de-controle/>>. Acessado em: 20/11/2015

Kawakubo, F.S.; Morato, R.G.; Luchiari, A. Mapeamento do desmatamento em São Félix do Xingú, utilizando composição colorida multitemporal de imagens-fração sombra. **Revista da ANPEGE**, v. 9, n. 11, p. 119-133, jan./jun. 2013.

Martins, H.; Vedoveto, M.; Araújo, E.; Barreto, P.; Baima, S.; Souza Jr., C. & Veríssimo, A. 2012. **Áreas Protegidas Críticas na Amazônia Legal** (p. 94). Belém-PA: Imazon. Disponível em: <<http://imazon.org.br/publicacoes/areas-protegidas-criticas-na-amazonia-legal/>>. Acessado em: 22/11/2015.

Nagendra. **Do parks work? Impact of protected areas on land cover clearing.** *Ambio*, v. 37, n. 5, p. 330–7, jul. 2008.

Novo, E. M. **Sensoriamento Remoto - Princípios e Aplicações.** 3a. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 363 p.

Pinagé, E. **Mapeamento e análise do corte seletivo em uma cena LANDSAT 5 TM no Estado do Pará.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba: INPE. 2011. p. 1728-1725.

Pinagé, E.R. 2013. Estudos dos impactos da exploração madeireira em áreas de concessão florestal utilizando imagens orbitais. Dissertação de mestrado em Ciências Florestais. Publicação **PPGEFL.DM-220/2013**. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília - UnB, Brasília/DF. 2013. 103p.

Redford & Fearn, E. (EDS.). **Protected areas and human livelihoods.** New York: WCS, 2007. p. 196pp.

Roberts, D. A.; Batista, G. T.; Pereira, J. L. G.; Waller, E. K.; Nelson, B. W. 1998. **Change identification using multitemporal spectral mixture analysis: applications in eastern Amazonia.** In: Lunetta, R.S; Elvidge, C.D. (ed.) *Remote sensing change detection: environmental monitoring methods and applications.* Ann Arbor: Ann Arbor Press, p.137-161.

Rudorff, B.F.T.; Mello, M.P.; Shimabukuro, Y.E. Imagens de satélites de sensoriamento remoto no Brasil. In: **Proceedings of the 2nd Symposium of Geotechnologies in the Pantanal (Geopantanal 2009)**, Corumbá, MS, Brazil: EMBRAPA Informática Agropecuária / INPE. p. 1077-1083. 2009.

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, n. 1, p. 16-20, 1991.

Shimabukuro, Y. E.; Mello, E. M. K.; Moreira, J. C.; Duarte, V. **Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia.** São José dos Campos, INPE, 1997. 16 p. (INPE-6147-PUD/029).

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. 13, p. 1729-1737, 1998.

Soares-Filho, B.; Moutinho, P.; Nepstad, D.; Anderson, A.; Rodrigues, H.; Garcia, R.; Dietzsch, L.; Merry, F.; Bowman, M.; Hissa, L.; Silvestrini, R. & Maretti, C. 2010.

Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. PNAS 2010. Publicado antes da impressão, 26 de maio.

USGS. **Landsat Missions:** Using the USGS Landsat8 Product. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey – NASA. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php>. Acessado em: 28/11/2015.

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. **Revista Acta Amazônica**. VOL. 34 (3) 2004: 487 – 493.

Veríssimo, A. Barreto, P.; Tarifa, R.; Uhl, C. Extraction of a high-value natural resource in Amazonia: the case of mahogany. **Forest Ecology and Management**, v. 72, p. 39 - 60, 1995.

Veríssimo, A.; Barros, A. C.; Souza Jr., C.; Uhl, C.; Vidal, E.; Vieira, I. C. G. & Mattos, M. M. (2002). **A Expansão Madeireira na Amazônia: Impactos e Perspectivas para o Desenvolvimento Sustentável no Pará.** (A. C. Barros & A. Veríssimo, Eds.) (2ª ed., p. 166). Belém: Imazon.

Xavier, E. A.; Freitas, C. R.; Souza, R. A. Análise de corte seletivo na Amazônia Legal em imagens ALOS PALSAR a partir de verificação por modelo de mistura espectral em imagem CBERS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7521-7527. Acessado em 14/10/2015.