

Detecção da exploração madeireira a partir de imagens Landsat e dados LiDAR no Sudoeste da Amazônia

Nara Vidal Pantoja^{1,2}
Marcus Vinício Neves d'Oliveira³
Niro Higuchi¹

¹ Laboratório de Manejo Florestal, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
Caixa Postal 478, 69060-020 - Manaus - AM, Brasil
niro@inpa.gov.br

² Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA
Rua Veterano Manuel de Barros, 320 - 69907-150 - Rio Branco - AC, Brasil
narapantoja@gmail.com

³ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA/Acre
Caixa Postal 321, 69900-970 - Rio Branco - AC, Brasil
marcus.oliveira@embrapa.br

Abstract. Structural changes on forest canopy produced by selective logging can be identified through satellite images, which shows the location and extent of these areas. The aim of this study was to analyze the detection of logging infrastructure using Landsat images and LiDAR data and verify how long logging scars can be identified through remote sensing. The study was carried out in an annual production unite at the Antimary State Forestry Acre State, western Amazon. We used Non-Photosynthetic Vegetation (NPV) images to identify log landings and compare its location with relative vegetation density models generated from LiDAR data. We also compared the log landing areas identified in the images with the location of 40 log landings obtained in the field through DGPS. The mean area of the detected by landsat images landings was 435 m² while the undetected landings was 302 m². The technique tested in this study allowed us to detect 30% of the log landings in NPV images and assisted in the visual interpretation of the canopy opened produced by selective logging. The relative vegetation density model tested in this study successfully identified altered by forest operations area two years after logging, while using Landsat images these areas could be detected only in the logging year.

Palavras-chave: selective logging, Landsat, *Light Detection and Ranging*, exploração madeireira, Landsat, LiDAR.

1. Introdução

O Brasil é responsável por expressivos resultados de redução de emissões de CO₂ provenientes do desmatamento no bioma Amazônia e estes resultados foram reportados no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MMA, 2016). No contexto das políticas de REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation, and the role of Conservation of Forest Carbon Stocks, Sustainable Management of Forests and Enhancement of Forest Carbon Stocks*) o monitoramento da exploração madeireira tem um papel importante uma vez que os dados de degradação ainda não foram utilizados para reportar o nível de referência de emissões florestais (FREL) do país (Brasil, 2014).

A degradação florestal em decorrência de exploração madeireira e fogo representa 41,9% das emissões de carbono brutas para a atmosfera em anos de seca, enquanto que somente a exploração madeireira está estimada em 33,3% em anos sem seca (Aragão et al., 2014). Assim, o monitoramento contínuo da exploração madeireira é necessário para reportar as estimativas relacionadas às emissões de carbono por degradação florestal. Embora já exista desde 2008 um sistema de monitoramento da degradação na Amazônia, o Programa DEGRAD, essa atividade não foi incluída no FREL do Brasil devido a curta série temporal existente não gerar taxas de áreas exploradas periodicamente e para todos os estados da

Amazônia. O único estudo em grande escala da extensão da exploração de madeira na Amazônia brasileira estima uma área de $19.823 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$ e $12.075 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$ em 1999 e 2002, respectivamente (Asner et al., 2005).

Neste aspecto, o uso de imagens de satélites auxilia no monitoramento da exploração madeireira na Amazônia, principalmente devido à extensa dimensão territorial da região que impede a ampla fiscalização pelos órgãos ambientais. Diferentes estudos têm sido realizados para mapear a exploração madeireira na Amazônia a partir de dados de sensoriamento remoto, empregando desde técnicas de interpretação visual (Santos et al., 2001) até métodos semiautomáticos e automáticos de processamento de imagens (Asner et al., 2005; Graça et al., 2005; Souza et al., 2005; Matricardi et al., 2013; Shimabukuro et al., 2014). A detecção da exploração madeireira por satélites apresenta limitações devido a regeneração da vegetação após 2-3 anos (Matricardi et al., 2013) e as feições relacionadas à exploração como a presença de clareiras, pátios e estradas ocorrerem na escala sub-pixel (Souza et al., 2005).

Nos últimos anos, a tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) tem sido aplicada em florestas tropicais para fins de estudos ecológicos e de avaliação de estoques de biomassa e carbono (Saatchi et al., 2011; Espírito-Santo et al., 2014) e quantificar as mudanças estruturais na floresta causadas pela exploração de madeira, mesmo em intensidades muito baixas de exploração (d'Oliveira et al., 2012).

Os objetivos deste estudo foram: (1) analisar a detecção da infraestrutura da exploração madeireira usando imagens Landsat e dados LiDAR e (2) verificar por quanto tempo os indícios da exploração madeireira podem ser identificados em produtos de sensoriamento remoto.

2. Material e métodos

2.1. Área de estudo

Este estudo foi realizado em uma área de 1000 hectares da Unidade de Produção Anual 3 (UPA-3) de manejo florestal localizada na Floresta Estadual de Antimary, estado do Acre, entre as coordenadas $68^\circ 01'$ a $68^\circ 23'$ W e $9^\circ 13'$ a $9^\circ 31'$ S. A vegetação é composta por florestas densas, abertas e florestas abertas com bambu. A área possui uma topografia suave ondulada com elevação máxima em torno dos 300 metros. Os solos predominantes são latossolos amarelos distróficos (Acre, 2000).

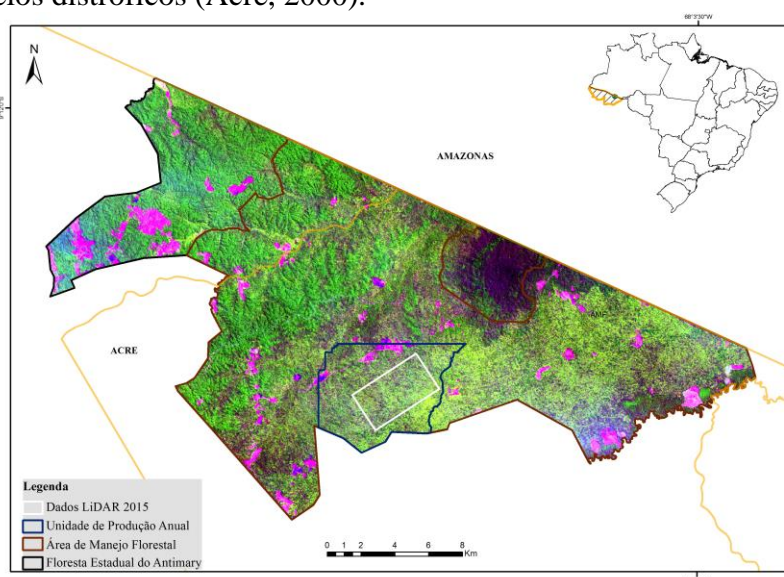


Figura 1. Localização da área de estudo na Floresta Estadual do Antimary em imagem Landsat-8/OLI de 09/09/2016 na composição RGB 654. O retângulo branco corresponde à área sobrevoada pelo LiDAR na Unidade de Produção Anual (em azul).

2.2. Dados de campo

O trabalho de campo envolveu a coleta de coordenadas geográficas com equipamento DGPS modelo Zenith II em cada uma das extremidades de 40 (quarenta) pátios de estocagem de madeira com duração de trinta minutos para coleta de cada ponto. A área foi parcialmente explorada em 2013 e as campanhas de campo foram realizadas nos meses de setembro e outubro de 2014 e agosto de 2015. As coordenadas coletadas foram processadas no programa GTR Processor e utilizando como base de referência os dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do IBGE. A partir do posicionamento dos pátios com alta exatidão foi possível comparar com os dados Landsat e LiDAR.

2.3. Imagens Landsat

Foram utilizadas as imagens de satélite Landsat dos anos 2011, 2013, 2014 e 2015 disponibilizadas pelo Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) para detectar os pátios na área de manejo. O primeiro ano, anterior à exploração, foi usado como uma referência para a área antes da perturbação promovida pelo manejo florestal e o último ano foi utilizado para verificar a existência de indícios da exploração após dois anos.

O processamento das imagens Landsat foi feito no programa computacional CLASLite 3.2 (Asner et al., 2009). O CLASLite é um método automatizado para discriminar mudanças na floresta. As imagens de reflectância foram utilizadas para obter as imagens de cobertura fraccional por meio do método *Automated Monte Carlo Unmixing* (AutoMCU) (Asner, 1998; Asner e Heidebrecht, 2002). Neste estudo, foi utilizada somente a fração Vegetação Não-Fotossintética (NPV) que corresponde à vegetação morta para identificar a infraestrutura da exploração florestal.

A identificação dos pátios foi feita no aplicativo computacional ArcGis 10 a partir da interpretação visual na imagem NPV do ano 2011, quando ainda não havia exploração na área e dos anos 2013, 2014 e 2015, após a exploração. A interpretação visual dos pátios na imagem foi baseada no contraste deste alvo em relação à floresta e também a proximidade de estradas florestais interligadas aos pátios. A área dos pátios coletada em campo foi calculada e em seguida relacionada com os pátios detectados na imagem. A comparação entre os pátios detectados nas imagens e não detectados foi realizada por meio de teste de Tukey ($\alpha=0,05$) dos valores médios obtidos utilizando o programa estatístico R para estabelecer a relação entre área dos pátios e potencial de detecção pela imagem Landsat.

2.4. Dados LiDAR

O levantamento a laser aerotransportados foi realizado em setembro de 2015 cobrindo uma área de 1.000 hectares. A densidade média de retornos foi de 5,5 pontos por metro quadrado (ppm²). A Tabela 1 apresenta as informações do sobrevoo do LIDAR.

Tabela 1. Parâmetros do sobrevoo do sistema LIDAR.

Parâmetro	Especificações
Sensor	Harrier 68i
Data de aquisição	25/09/2015
Altitude de voo	597,44 m
Frequência de operação	300 khz
Exatidão horizontal	0,5 m
Exatidão vertical	0,15 m
Largura da faixa no terreno	494 m

Os dados de nuvem de pontos foram processados no pacote Fusion 3.42 (McGaughey, 2014) e os modelos gerados foram associados com os pátios de madeira com base nos pontos coletados e a imagem gerada foi normalizada para obter a altura do terreno nesta imagem. A

partir do modelo digital de terreno foram extraídas as métricas de elevação dos retornos dos dados LiDAR dos pátios. O modelo de densidade relativa de vegetação foi utilizado para identificar a infraestrutura construída na floresta (estradas e pátios de estocagem) e comparar com as imagens Landsat para indicar qual indício foi possível observar após a exploração, de acordo com método proposto por d'Oliveira et al. (2012). Para este estudo também foi utilizada a camada do estrado florestal de 8 metros como limite inferior e 12 metros como limite superior de altura devido o imageamento do LiDAR ter ocorrido dois anos após a exploração, pois nos pátios já havia regeneração.

3. Resultados e Discussão

A dimensão dos pátios calculada a partir das medições coletadas de campo variou entre 140 m² a 649 m², com média de 342 m² ± 17,63 m² (Tabela 2).

Tabela 2. Área dos pátios não detectados e detectados na imagem Landsat neste estudo.

Pátio não detectado				Pátio detectado			
Nº	Área (m ²)	Nº	Área (m ²)	Nº	Área (m ²)	Nº	Área (m ²)
1	140	8	247	16	307	25	361
2	147	9	248	18	317	29	394
3	177	10	265	19	326	31	411
4	190	11	280	21	338	32	412
5	204	13	294	22	340	33	423
6	217	14	298	23	343	34	427
7	244	15	299	24	353	35	461

A maior parte dos pátios de tamanho maior que 290 m² foi detectada, ao contrário dos pátios com tamanho inferior a este que não foram identificados. Os pátios com tamanho maior que este limite não foram identificados na imagem NPV devido a presença de copas de árvores dentro dos pátios que dificulta a detecção, como pode ser observado no modelo tridimensional do LiDAR nestes pátios com área maior que 290 m² (Figura 2).

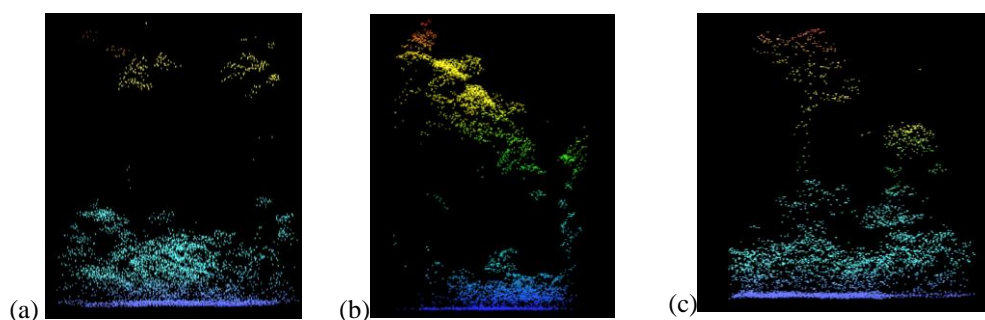


Figura 2. Visualização da nuvem de pontos LiDAR dos pátios que não foram detectados na imagem NPV. Dimensão dos pátios: 294 m² (a), 298 m² (b) e 299 m² (c).

A média da área dos pátios detectados foi 435 m² enquanto que dos pátios não detectados foi 302 m². O tamanho do pátio afetou significativamente ($t = -4,0076$, $df = 38$, $p \leq 0,01$) a sua identificação (Figura 3).

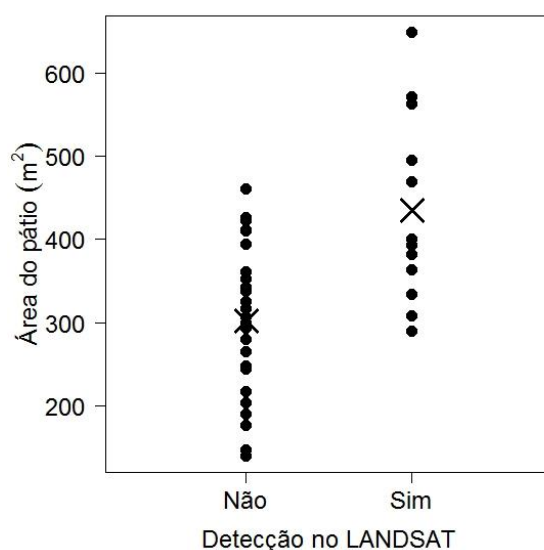


Figura 3. Detecção dos pátios na imagem NPV do ano de 2013 e relação com a área medida em campo.

A partir da interpretação visual da imagem Landsat do ano de 2013 foi possível identificar 30% de pátios na área de estudo no ano da exploração (Figura 4). A diferença de contraste entre o alvo de interesse e o restante da imagem possibilitou a detecção dos pátios na região onde as estradas estavam abertas recentemente. No ano seguinte após a exploração não foi possível identificar indícios de pátios e estradas na imagem de satélite. Isto pode ser explicado pela baixa intensidade de corte ($11 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) ocorrida na área, implicando na abertura de pátios menores e favorecendo o rápido fechamento do dossel, diferente de áreas com maior impacto em que os indícios da exploração permanecem visíveis por 2-3 anos em imagens Landsat (Matricardi et al., 2013). As estradas também ficaram visíveis apenas no ano da exploração (Figura 4).

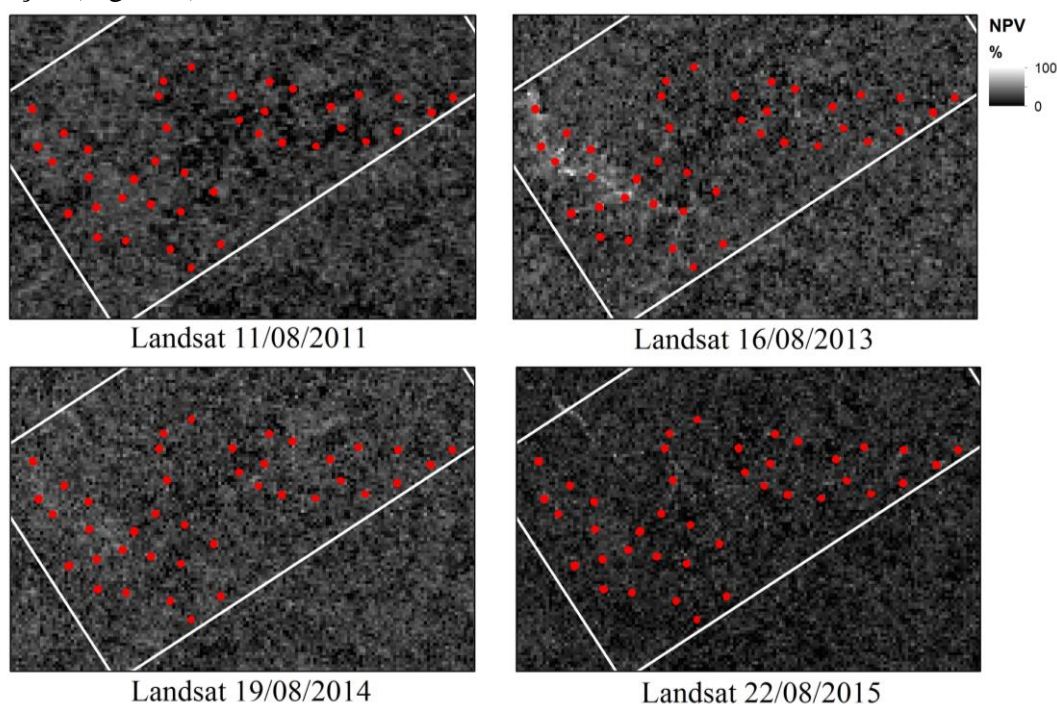


Figura 4. Identificação de pátios (em vermelho) a partir da interpretação visual nas imagens de cobertura fracional NPV do Landsat dos anos 2011, 2013, 2014 e 2015.

Em geral os pátios construídos em áreas de planos de manejo têm dimensões aproximadas de 500 m² (MMA, 2002). Neste estudo demonstramos que pátios acima de 290 m² podem ser identificados em imagens de média resolução espacial, quando imagens do mesmo ano da exploração são usadas para a análise. O programa DEGRAD usa os dados Landsat com resolução de 30 metros para mapear a floresta degradada por corte seletivo e incêndios florestais. Como estes dados ainda não foram adotados para estabelecer o nível de referência de emissões, as estimativas a serem consideradas podem subestimar a área impactada pela exploração, sobretudo no estado do Acre, onde a intensidade de exploração é geralmente baixa quando comparada com outros locais da Amazônia. A disponibilidade de dados de resolução temporal de 5 dias e resolução espacial de 10 m como as imagens do sensor Sentinel-2 poderá melhorar a avaliação e o acompanhamento dos processos de degradação florestal.

Os modelos de densidade relativa derivados dos dados LiDAR detectaram a infraestrutura da exploração mesmo após dois anos, porém o modelo sugerido por d'Oliveira et al. (2012) com altura mínima de 1 metro e altura máxima de 5 metros não mostrou claramente as áreas dos pátios medidos em campo. Assim, considerando que neste estudo o sobrevoo LiDAR ocorreu dois anos após a exploração, para evitar a interferência da vegetação secundária e projeção das copas das árvores circundantes no modelo, foi utilizada uma camada com altura mínima de 8 m e máxima de 12 metros.

A definição dos novos limites da camada feita em função da análise das amostras LiDAR dos pátios com elevação normalizada (Figuras 5 e 6) identificou a infraestrutura construída na floresta (estradas e pátios de estocagem) e perturbações promovidas pelo corte das árvores (clareiras) e extração das toras (trilhas de arraste) mesmo dois anos após a exploração (Figura 6), mostrando que o modelo de densidade relativa com altura mínima de 8 metros e máxima de 12 metros foi mais adequado para detectar a infraestrutura da exploração em um período mais longo.

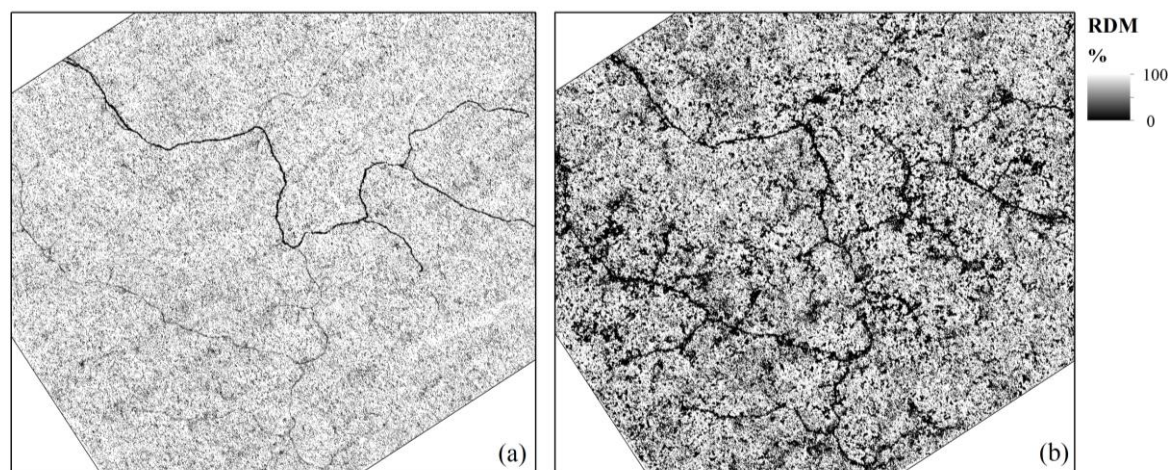


Figura 5. Modelos de densidade relativa de vegetação (RDM) para a área de estudo a partir dos dados Lidar. (a) RDM de 1 m e 5 metros acima do solo conforme proposto por D'Oliveira et al. (2012) e (b) RDM entre 8 m e 12 metros proposto neste estudo. A escala de cinza representa a densidade de retorno do LiDAR com as áreas exploradas em preto.

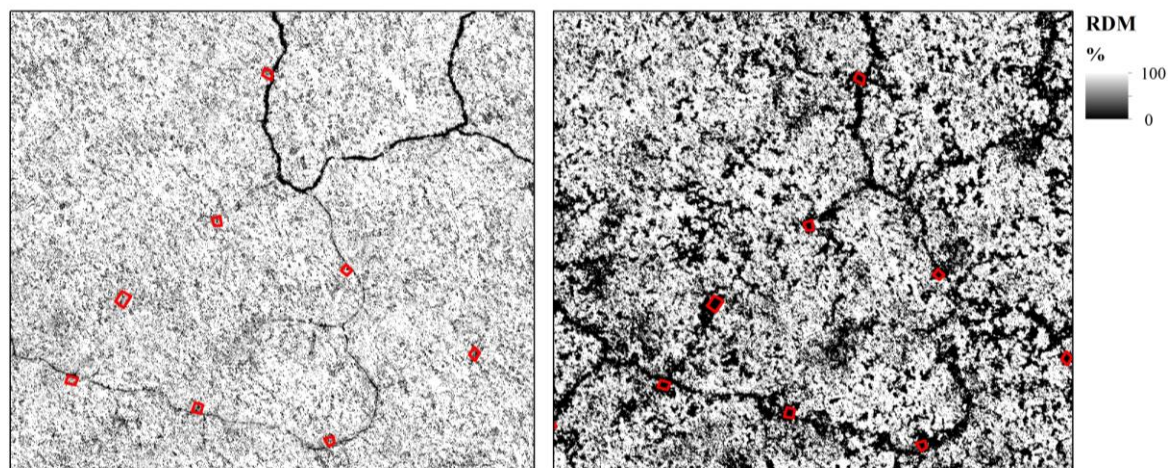


Figura 6. Detalhamento da visualização de pátios no RDM proposto por d'Oliveira et al. (2012) à esquerda e RDM proposto neste estudo à direita. A escala de cinza representa a densidade de retorno do LiDAR com as áreas exploradas em preto e os pátios em vermelho.

4. Conclusões

A área dos pátios interferiu na detecção a partir de imagens Landsat derivadas da fração Vegetação Não-Fotossintética e somente pátios com área superior a 290 m² foram identificados neste estudo. Apesar disto, as imagens Landsat podem ser utilizadas como indicativo de atividade madeireira recente, ou seja, no mesmo ano da exploração. O modelo de vegetação relativa derivado de dados LiDAR desenvolvido para este trabalho identificou as alterações produzidas na estrutura da floresta pelas operações florestais dois anos após a exploração. Portanto, para analisar a degradação florestal por exploração madeireira é crítico o uso de um conjunto de dados para compreender esta dinâmica e conseqüentemente facilitar a implementação de ações no âmbito de programas REDD+.

Agradecimentos

Ao Projeto CAPES Pró-Integração 3172/2013 pelo financiamento do sobrevoo LiDAR e da pesquisa de campo. À EMBRAPA/Acre pelo apoio logístico e ao *Carnegie Institution for Science* pela licença do CLASLite.

Referências Bibliográficas

Acre. Governo do Estado. Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico. Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre: Recursos Naturais e Meio Ambiente. Rio Branco: SECTMA, v. 1. 2000.

BRASIL. Brazil's submission of a forest reference emission level for deforestation in the Amazonia biome for results-based payments for REDD+ under the UNFCCC. p. 1–58, 2014.

Aragão, L. E. O. C.; Poulter, B.; Barlow, J. B.; Anderson, L. O.; Malhi, Y.; Saatchi, S.; Phillips, O. L.; Gloor, E. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, v. 89, n. 4, p. 913–931, 2014.

ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote sensing of Environment**, v. 64, n. 3, p. 234–253, 1998.

Asner, G. P.; Heidebrecht, K. B. Spectral unmixing of vegetation, soil and dry carbon cover in arid regions: comparing multispectral and hyperspectral observations. **International Journal of Remote Sensing**, 23(19), p. 3939–3958, 2002.

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**, 310, 480–482, 2005.

Asner, G.P.; Knapp, D.E.; Balaji, A.; Páez-Acosta, G. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 3, n. 1, p. 033543-033543-24, 2009.

D'Oliveira, M. V. N.; Reutebuch, S. E.; McGaughey, R. J.; Andersen, H. E. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 479–491, set. 2012.

Espírito-Santo, F. D.; Gloor, M.; Keller, M.; Malhi, Y.; Saatchi, S.; Nelson, B.; ... & Palace, M. Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance. **Nature communications**, v. 5, 2014.

Graça, P. M. L. A.; Santos, J. R.; Soares, J. V.; Souza, P. E. U. Desenvolvimento metodológico para detecção e mapeamento de áreas florestais sob exploração madeireira: estudo de caso, região norte do Mato Grosso. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1555-1562. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12649-PRE/7941). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.16.13.56>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

Matricardi, E. A.; Skole, D. L.; Pedlowski, M. A.; Chomentowski, W. Assessment of forest disturbances by selective logging and forest fires in the Brazilian Amazon using Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 4, p. 1057-1086, 2013.

McGaughey, R. J. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. Seattle, WA: USFS, 2014.175 p.

Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: < <http://redd.mma.gov.br/pt/>>. Acesso em: 31.out.2016.

Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa Nº 4, DE 4 de março de 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/>. Acesso em: 31.out.2016.

Saatchi, S. S.; Harris, N. L.; Brown, S.; Lefsky, M.; Mitchard, E. T.; Salas, W.; Zutta, B. R.; Buermann, W.; Lewis, S. L.; Hagen, S.; Petrova, S.; White, L.; Silman, M.; Morel, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 24, p. 9899-9904, 2011.

Santos, J. R.; Krug, T.; Araujo, L. S.; Meira Filho, L. G.; Almeida, C. A. Dados multitemporais TM/Landsat aplicados ao estudo da dinâmica de exploração madeireira na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10. (SBSR)., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1751-1755. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00016-1. (INPE-8219-PRE/4008). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.10.35>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

Shimabukuro, Y. E.; Beuchle, R.; Grecchi, R. C.; Achard, F. Assessment of forest degradation in Brazilian Amazon due to selective logging and fires using time series of fraction images derived from Landsat ETM+ images. **Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 9, p. 773-782, 2014.

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, p. 329-343, 2005.

Stone, T. A.; Lefebvre, P. Using multi-temporal satellite data to evaluate selective logging in Para, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 13, p. 2517-2526, 1998.

Yu, X.; Hyypa, J.; Kaartinen, H.; Maltamo, M. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 4, p. 451-462, 2004.