

## Avaliação temporal dos efeitos da exploração madeireira usando dados Lidar

Ekena Rangel Pinagé<sup>1</sup>  
Michael Keller<sup>1,2</sup>  
Maiza Nara dos-Santos<sup>1</sup>  
Luciana Spinelli-Araújo<sup>1</sup>  
Marcos Longo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Embrapa Monitoramento por Satélite - CNPM  
Av. Soldado Passarinho, nº 303, Fazenda Jardim Chapadão - 13070-115  
– Campinas - SP, Brasil

[ekenapinage@hotmail.com](mailto:ekenapinage@hotmail.com), [mkeller.co2@gmail.com](mailto:mkeller.co2@gmail.com), [maizanara@gmail.com](mailto:maizanara@gmail.com),  
[luciana.spinelli@embrapa.br](mailto:luciana.spinelli@embrapa.br), [marcos.longo@colaborador.embrapa.br](mailto:marcos.longo@colaborador.embrapa.br)

<sup>2</sup> USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry  
Jardín Botánico Sur, 1201 Calle Ceiba  
San Juan, Puerto Rico, 00926 USA

**Abstract.** Laser scanning is a promising technology for forest applications, enabling quantitative assessments of vegetation structure. This study aimed at assessing differences in forest structure of logged areas in different years (from 2007 to 2010) and unlogged forests in a private property in Pará State using Lidar data. The analyses estimated the total number and the area of canopy gaps per hectare, extracted from canopy height model. Impacts in the forest understory were also assessed using a metric that calculates the proportion of returns bellow 0.5 meters versus total returns. Results indicated great significant differences in the number of canopy gaps between undisturbed forests and logged forests, but not among logging years. In contrast, we observed changes at the understory level among areas logged in 2007, 2008 and 2010. Our findings suggest that the rate of recovery of vegetation structure is height dependent, with the upper canopy taking longer to recover than the understory. This Lidar approach has proven to be useful in the understanding of selective logging impacts on the forest structure.

**Palavras-chave:** selective logging, tropical forests, laser scanning; corte seletivo, florestas tropicais, escaneamento a laser.

### 1. Introdução

O monitoramento das atividades de exploração madeireira na Amazônia é um desafio que exige aplicação de uma ampla variedade de ferramentas, desde controle das operações florestais no campo, acompanhamento da cadeia de custódia da madeira produzida até a utilização de diferentes geotecnologias.

Imagens de satélite multiespectrais têm historicamente sido utilizadas na avaliação de impactos e monitoramento da exploração madeireira (Asner et al, 2005; Souza Jr et al, 2005; Matricardi et al, 2013), gerando estimativas sobre a extensão e grau de intensidade dos impactos do corte seletivo na Amazônia. Estas iniciativas de mapeamento do corte seletivo utilizaram técnicas de processamento digital de imagens de satélite e o conhecimento de uma série de elementos contextuais que constituem seu padrão espacial. Entretanto, estas imagens são limitadas em sua capacidade de distinguir as mudanças estruturais que ocorrem abaixo do dossel (Coops et al., 2007). Os impactos decorrentes da exploração madeireira na floresta ocorrem tanto no nível do dossel quanto no nível do sub-bosque, e sendo assim, dados Lidar têm potencial para a detecção e quantificação destas alterações.

O escaneamento a laser é uma tecnologia relativamente nova no campo de sensoriamento remoto, baseada na medição precisa do tempo que o pulso de luz enviado leva do transmissor ao alvo e de volta ao receptor. Sua capacidade de obter informações tanto da vegetação

quanto da superfície do terreno permite a sua aplicação em medições da estrutura da vegetação (Jensen, 2009).

Diversos estudos aplicaram dados Lidar em florestas, especialmente na quantificação de biomassa e estoques de carbono (Asner et al., 2010; Næsset e Gobakken, 2008), demonstrando o potencial desta tecnologia. Trabalhos mais recentes têm utilizado este tipo de dado também para estudos sobre degradação em florestas tropicais (D'Oliveira et al., 2012; Englhart et al., 2013; Andersen et al., 2014).

Este trabalho tem como objetivo avaliar as diferenças na estrutura do dossel (clareiras) e na densidade do sub-bosque florestal em áreas exploradas em diferentes anos (de 2007 a 2010) e em áreas de florestas intactas em uma propriedade particular no Estado do Pará, com a utilização de dados Lidar.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1 Área de estudo

A Fazenda Cauaxi se localiza no município de Paragominas, Nordeste do Estado do Pará. Esta fazenda é uma propriedade privada, onde o Instituto Floresta Tropical (IFT) mantém atividades florestais desde 1995. Não há histórico de uso da terra antes das atividades de exploração florestal na área e não havia estradas na fazenda até a década de 80.

O clima da Fazenda Cauaxi é tropical úmido, com precipitação média anual de aproximadamente 2200 mm. A estação seca se estende de julho a novembro, embora junho e dezembro sejam meses secos o suficiente para permitir operações florestais. Os solos da área são classificados como latossolos distróficos amarelos, e a topografia é plana a levemente ondulada. A tipologia florestal da Fazenda Cauaxi é classificada como Floresta Ombrófila Densa (LBA-ECO Investigations, 2014).

### 2.2 Dados utilizados

Os dados Lidar utilizados (Projeto Paisagens Sustentáveis 2014) consistiram em uma cobertura adquirida em julho de 2012 na Fazenda Cauaxi. Os dados cobrem áreas que sofreram exploração florestal em diferentes anos (de 2007 a 2010) e áreas de floresta não exploradas, abrangendo 1214 hectares. A Tabela 1 descreve as características da aquisição dos dados.

Tabela 1. Características da aquisição de dados Lidar na Fazenda Cauaxi.

Característica	Dado
Equipamento	Optech ALTM 3100
Data de aquisição	27-29/07/2012
Altitude máxima de voo (em relação ao terreno)	850 m
Campo de visada	11°
Frequência de pulso	100 KHz
Densidade mínima de retornos	4/m <sup>2</sup>
Densidade média de retornos	28.3/m <sup>2</sup>
Densidade média de primeiros retornos	13.8/m <sup>2</sup>

Os dados foram disponibilizados na forma de nuvem de pontos e acompanhados do Modelo Digital do Terreno (MDT) dela derivado. A densidade mínima de pontos exigida na aquisição foi atingida em 99,35% da área de estudo.

Os limites das áreas e as datas de exploração foram fornecidos pelo IFT.

### 2.3 Processamento dos dados

Os dados foram processados no pacote FUSION, versão 3.42 (McGaughey, 2014). A altura do terreno derivada do MDT foi subtraída de cada retorno para remover a influência da topografia sobre a altitude da floresta.

Os múltiplos *tiles* (no formato .las) do conjunto de dados foram processados de modo a gerar superfícies matriciais contínuas para toda a área de estudo. Foram geradas como resultado deste processamento métricas de cobertura, elevação, intensidade e estatísticas por estratos de altura, em resolução espacial de 2 metros.

A métrica que representa o percentil 95 da altura da floresta (altura máxima dentro da qual 95% dos dados se encontram) foi utilizada para gerar o modelo de dossel (Figura 1). A partir deste dado foi calculada a quantidade e área de clareiras por hectare, de acordo com a definição proposta por Hunter et al. (2014), que considera clareiras como áreas contíguas com altura menor que 10 metros e área maior que 10 metros quadrados.

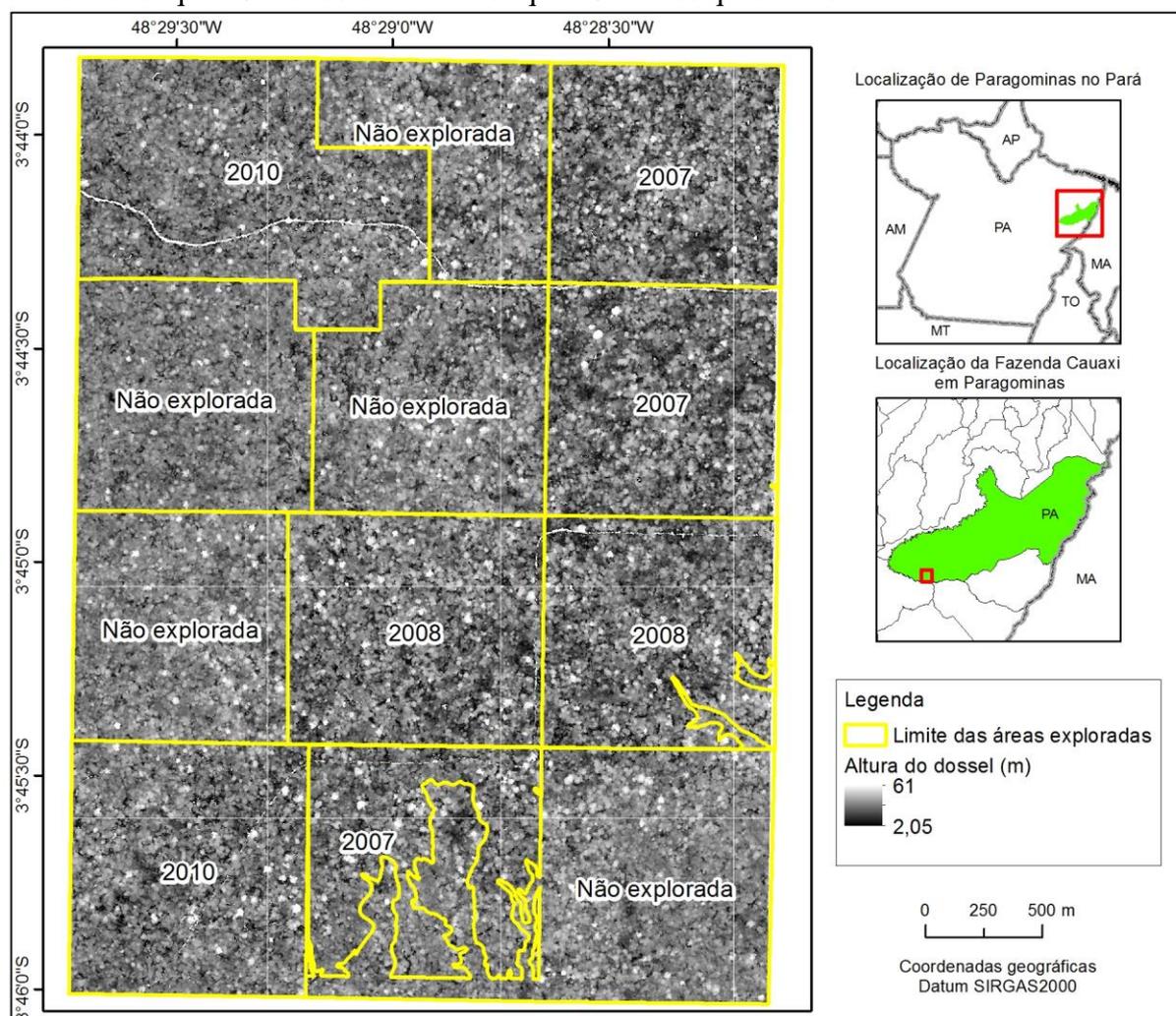


Figura 1. Modelo de elevação do dossel da área de estudo.

O modelo de dossel foi reclassificado e vetorizado para separar os polígonos que atendessem aos dois critérios da definição de clareiras. Em seguida, foi calculado o número e a área média de clareiras por hectare para os diferentes anos de exploração e para as florestas intactas na área de estudo.

A métrica que representa a proporção de retornos provenientes do estrato analisado (no caso, 0 - 0.5 m) em relação aos retornos totais foi utilizada como um indicador do impacto da exploração madeireira no sub-bosque florestal da área. Nesta métrica, as áreas que tem pouca ou nenhuma cobertura vegetal aparecem com altos valores de proporção de retornos (Figura

2). D'Oliveira et al. (2012) utilizaram abordagem de processamento semelhante para estimar densidade de sub-bosque e os impactos da exploração madeireira no Estado do Acre.

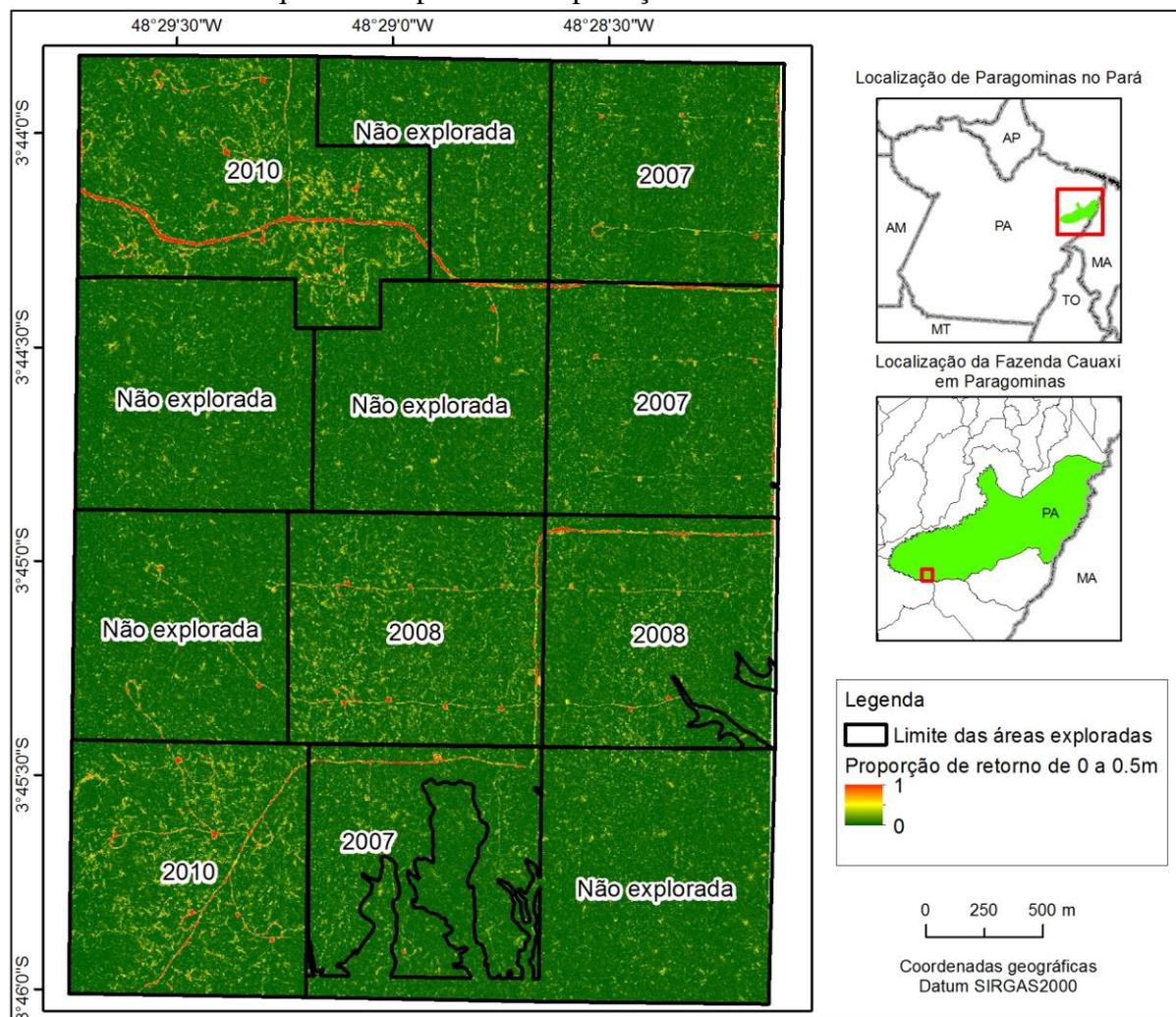


Figura 2. Proporção de retornos provenientes do estrato de 0 a 0.5 m.

Há evidências de infraestrutura (pátios e estradas secundárias) aberta em algumas áreas com designação de não exploradas na época da aquisição dos dados Lidar (Figura 2). Estas áreas tinham previsão de serem exploradas nos anos subsequentes. A construção de infraestrutura de dois a três anos antes do início da exploração é um procedimento recomendável nas operações florestais, a fim de garantir a compactação das estradas.

A métrica de proporção de retornos foi reclassificada de acordo com um limiar de 10% definido visualmente (pixels com mais de 10% de retornos provenientes da altura de até 0.5 m foram classificados como de baixa densidade de sub-bosque). Em seguida, a reclassificação foi vetorizada, e os polígonos com área maior que 10 m<sup>2</sup> foram selecionados. A partir deste produto, foi calculada a quantidade e a área média de polígonos de baixa densidade de sub-bosque por hectare para os diferentes anos de exploração e florestas intactas.

## 2.4 Análise dos dados

Uma análise foi realizada com o objetivo de determinar o grau de associação entre a estrutura do dossel e do sub-bosque das florestas não exploradas e exploradas nos diferentes anos. Foram alocados 40 polígonos quadrados de 1 hectare (100 x 100m) em cada classe considerada, e foi calculado o valor médio das duas métricas utilizadas para cada polígono.

Foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para avaliar se os dados das quatro categorias consideradas seguem distribuição normal. O teste *t* de Student para amostras independentes foi utilizado para comparar as amostras com distribuição normal, e o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para comparar aquelas que apresentaram distribuições não normais. O nível de confiança adotado em todos os testes foi 95%.

### 3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos através do processamento das métricas Lidar para o dossel e o sub-bosque revelam impactos distintos da exploração florestal (Figura 3). O modelo de elevação do dossel evidencia maior densidade e tamanho das clareiras nas áreas exploradas, mas também identifica as clareiras naturais na floresta não explorada, elementos fundamentais da dinâmica de crescimento e distribuição de espécies nas florestas tropicais (Hunter et al., 2014; Denslow, 1987).

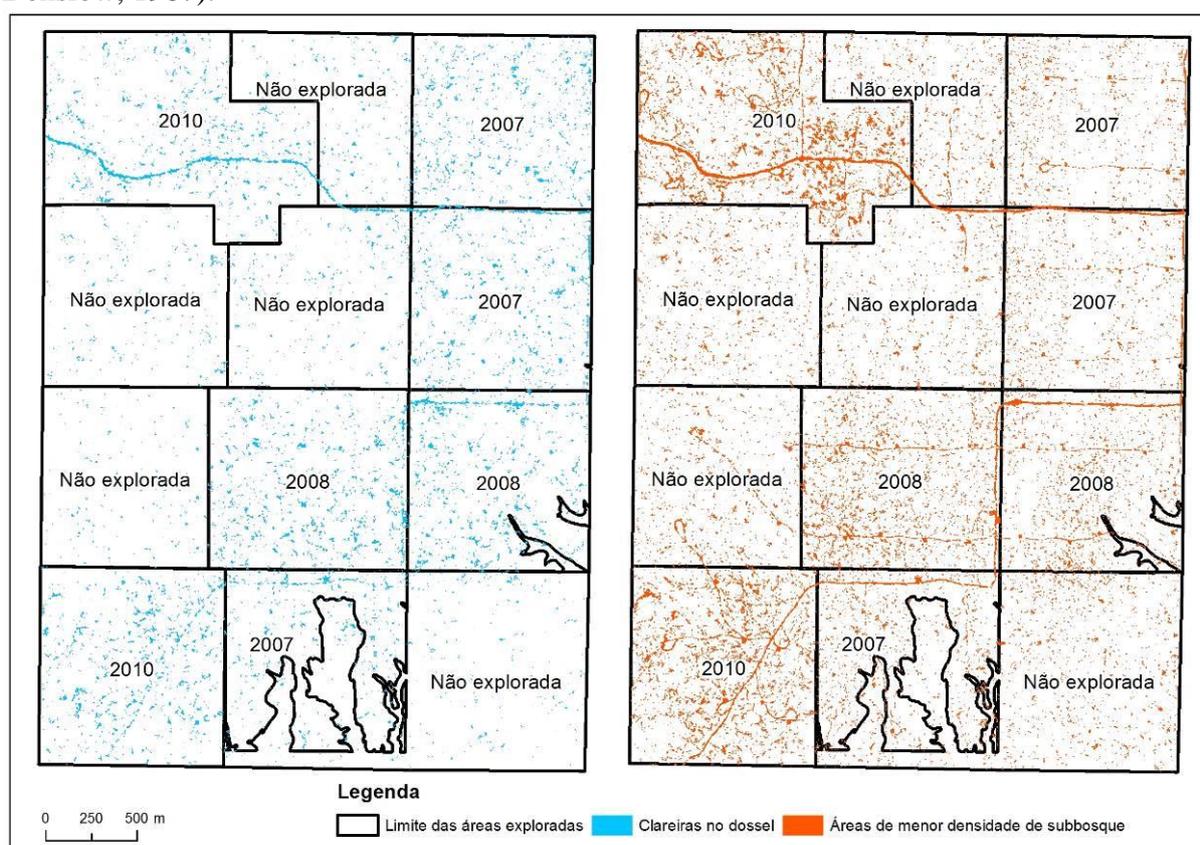


Figura 3. Clareiras no dossel (esquerda) e áreas de sub-bosque de menor densidade (direita) para os diferentes anos de exploração e florestas intactas.

É importante notar que as clareiras do dossel não evidenciam as estradas secundárias e outras alterações que ocorrem no sub-bosque, que podem ser percebidas no produto derivado da estratificação dos retornos Lidar. Somente as estradas primárias (que apresentam abertura lateral de cerca de 6 metros) podem ser observadas nas clareiras derivadas do modelo de elevação do dossel.

Por outro lado, a métrica de proporção de retornos até a altura de 0.5m mostra um retrato pós-exploratório bastante verossímil da área. O padrão típico da exploração florestal, com estradas secundárias interligando pátios de estocagem é claramente visto. Adicionalmente, este produto permite a diferenciação das áreas com exploração mais antiga das mais recentes, ao passo que as clareiras do dossel revelam apenas a diferença entre áreas exploradas e não exploradas (Figura 3).

O teste de normalidade indicou que as distribuições das amostras obtidas do modelo de dossel são normais e que as distribuições derivadas das amostras obtidas da métrica de sub-bosque não são normais. Portanto, nas primeiras foi aplicado o teste *t* e nas segundas, o teste de Kolmogorov-Smirnov.

As estatísticas dos testes corroboraram as análises visuais dos dados, apontando que as florestas não exploradas apresentam número e área de clareiras por hectare estatisticamente diferentes de todos os anos explorados, mas que a diferença entre os anos de exploração não é significativa (Tabela 2). Já no nível do sub-bosque, as florestas não exploradas são estatisticamente similares à floresta explorada em 2007, sugerindo que o estrato inferior se recupera em aproximadamente cinco anos após a exploração. E por outro lado, todos os anos de exploração apresentaram diferença estatística entre si, permitindo a diferenciação do tempo decorrido desde a exploração a partir do produto de proporção de retornos à altura de 0.5 metros.

Tabela 2. Estatística p-valor para os testes aplicados.

<b>Categorias</b>	<b>Não Explorada</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2010</b>
<b>Não Explorada</b>		0,766	0,000	0,000
<b>2007</b>	0,000		0,000	0,000
<b>2008</b>	0,000	0,818		0,014
<b>2010</b>	0,000	0,549	0,429	

verde = dossel (teste *t* de Student); azul = sub-bosque (teste Kolmogorov-Smirnov).

Em 2007, foram detectadas mais clareiras por área do que nos anos de exploração posteriores, 2008 e 2010 (Figura 4a). Entretanto, esperava-se que nos anos iniciais da análise houvesse menos clareiras, devido à recuperação da floresta. A mortalidade de árvores remanescentes no período posterior à exploração também provoca clareiras (Schulze & Zweede, 2006) e pode ter influenciado estes resultados. Desta forma, existem indicativos de que, para o dossel, o tempo após o corte seletivo é menos decisivo do que os impactos causados pelas operações florestais, reforçando a importância da adoção de técnicas que reduzam o impacto na floresta remanescente.

Já para o produto de sub-bosque, observou-se o padrão esperado, com áreas de exploração mais antiga apresentando menos impacto, principalmente em relação à área de sub-bosque alterado por hectare (Figura 4b). O tamanho médio dos polígonos de 2010 é 96,9m<sup>2</sup>, enquanto que para 2008 e 2007 é 61,5m<sup>2</sup> e 52,4m<sup>2</sup>, respectivamente. Provavelmente a recuperação da floresta com o passar dos anos gradualmente cause o processo inverso ao causado pela exploração florestal, fragmentando as áreas abertas.

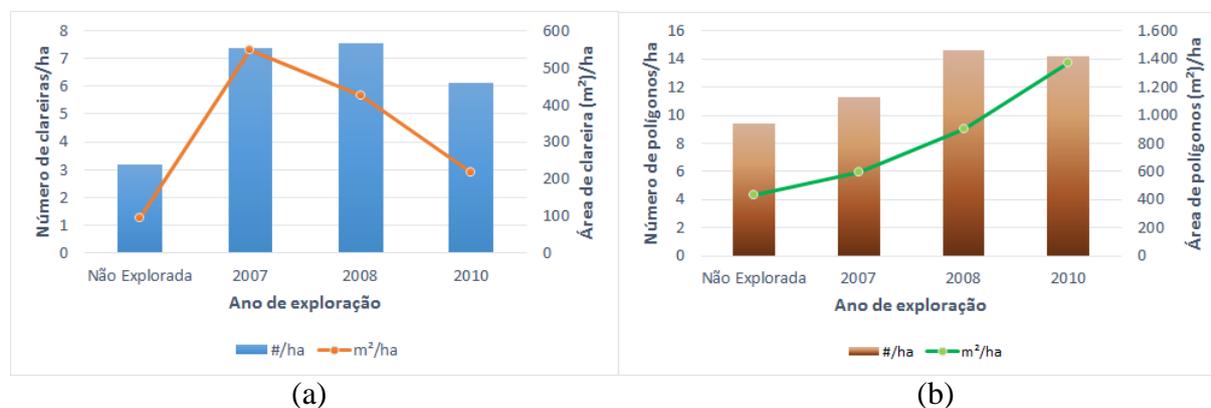


Figura 4. Clareiras no dossel (a) e alteração no sub-bosque (b) para os diferentes anos de exploração e florestas intactas.

#### 4. Considerações finais

Este estudo fornece indicações quantitativas de que o sub-bosque tem recuperação mais acelerada do que o dossel. Adicionalmente, pode-se concluir que a partir de cinco anos decorridos desde a exploração não há mais diferença significativa entre o sub-bosque de uma floresta intacta e o de uma floresta explorada.

Schulze & Zweede (2006) apontaram, a partir de observações de campo na Fazenda Cauaxi e na Floresta Nacional do Tapajós, fragmentação de dossel até 5 anos após as atividades de exploração, mesmo período existente entre o primeiro ano de exploração considerado neste estudo e a aquisição de dados Lidar. A partir destas conclusões, apontamos a possibilidade de detecção da degradação do dossel florestal durante vários anos após a ocorrência do corte seletivo.

A extensão e a distribuição espacial do manejo florestal de baixo impacto são difíceis de se identificar com grande parte das técnicas de sensoriamento remoto (Andersen et al., 2013). Entretanto, o advento de novas tecnologias traz novas possibilidades para a quantificação de impactos em pequena escala. Desta forma, este trabalho constitui um dos primeiros esforços de quantificação e interpretação dos impactos decorrentes da exploração florestal que ocorrem tanto no dossel e no sub-bosque.

Uma vez que os resultados apresentados aqui foram obtidos em uma área pequena e com uma única aquisição de dados, testes similares devem ser aplicados em outras condições de estudo, como corte seletivo em diferentes tipologias florestais e com distintas intensidades de exploração.

Apesar de seu alto custo, a metodologia testada permite um acompanhamento da execução de um plano de manejo florestal, podendo ser aplicada de forma amostral para o monitoramento da exploração madeireira, bem como para avaliar as taxas de regeneração da floresta após os ciclos de exploração.

#### Agradecimentos

Os dados Lidar foram adquiridos pelo Projeto Paisagens Sustentáveis Brasil, apoiado no Brasil pela Embrapa e pelo Serviço Florestal, Agência para o Desenvolvimento Internacional e Departamento de Estado dos Estados Unidos.

Esta pesquisa foi desenvolvida no âmbito do projeto “Mudanças de uso da terra e suas interações com processos de degradação florestal na Amazônia”, apoiado pelo CNPq.

#### Referências

Andersen, H.; Reutebuch, S.; MgGaughey, R. J.; D'Oliveira, M. V. N.; Keller, M. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat lidar flights. **Remote Sensing of Environment**, v. 151, p. 157-165, 2014.

Asner, G. P.; Powell, G. V. N.; Mascaró, J.; Knapp D. E.; Clark, J.; Jacobson, J.; Kennedy-Bowdoin, T.; Balaji, A.; Paez-Acosta, G.; Victoria, E.; Secada, L.; Valqui, M.; Hughes, E. F. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 107, n. 38, p. 16738–16742, 2010.

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. 310, p. 480-482, 2005.

Coops N. C.; Hilker, T.; Wulder, M. A.; St-Onge, B.; Newnham, G.; Siggins, A.; Trofymow, J.A. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LIDAR. **Trees**, v. 3, n. 21, p. 295-310, 2007.

Denslow, J. S. Tropical Rainforest Gaps and Tree Species Diversity. **Annual Review of Ecology and Systematics**, vol. 18, p. 431-451, 1987.

D'Oliveira, M. V. N.; Reutebuch, S.; MgGaughey, R. J.; Andersen, H. 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, 2012.

Englhart S.; Jubanski J.; Siegert F. Quantifying Dynamics in Tropical Peat Swamp Forest Biomass with Multi-Temporal LiDAR Datasets. **Remote Sensing** v.5, n. 5, p. 2368-2388, 2013.

Hunter, M.; Keller, M.; Morton, D.; Cook, B.; Lefsky, M.; Ducey, M.; Saleska, S.; Oliveira Jr, R.; Schiatti, J. S. **Plos One** in press, 2014.

Jensen, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

LBA-ECO Investigations: A Component of the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia. Disponível em: < [http://www.lbaeco.org/cgi-bin/web/sites/site\\_desc.pl?region\\_id=4&site\\_id=64](http://www.lbaeco.org/cgi-bin/web/sites/site_desc.pl?region_id=4&site_id=64)>. Acesso em: 01.out.2014.

Matricardi, E. A. T.; 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.

Næsset, E; Gobakken, T. Estimation of above and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 3079-3090, 2008.

Projeto Paisagens Sustentáveis Brasil. Disponível em: <http://mapas.cnpm.embrapa.br/paisagenssustentaveis/>. Acesso em: 29.set.2014.

Schulze, M; Zweede, J. Canopy dynamics in unlogged and logged forests stands in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 236, n. 1, p. 56-64, 2006.

Souza Jr, C.; Roberts, D.; Cochrane, M. A. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, p. 329-343, 2005.