

## Uso de lidar para quantificação de mudanças no estoque de carbono acima do solo em São Jorge, Pará

Marcos Scaranello <sup>1</sup>  
Marcos Longo <sup>1</sup>  
Maiza Nara dos-Santos <sup>1</sup>  
Michael Keller <sup>1,2</sup>  
Veronika Leitold <sup>3</sup>  
Douglas Morton <sup>3</sup>  
Édson Bolfe <sup>4</sup>  
Mateus Batistella <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Embrapa Informática Agropecuária  
Caixa Postal 6041 - 13083-886 - Campinas - SP, Brasil  
masscaranello@gmail.com, mdplongo@gmail.com, maizanara@gmail.com,  
mkeller.co2@gmail.com

<sup>2</sup> USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry  
PO BOX 96090 - 00926-1119 - Rio Piedras - Puerto Rico, USA

<sup>3</sup> NASA Goddard Space Flight Center  
PO BOX 130 – 20771 – Greenbelt – Maryland, USA  
vleitold@gmail.com, douglas.morton@nasa.gov

<sup>4</sup> Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Caixa Postal 8605 – 70770-901 – Brasília – DF, Brasil  
edson.bolfe@embrapa.br, mateus.batistella@embrapa.br

**Abstract.** The Amazon forest plays an invaluable role in the global carbon cycle by storing and processing carbon from the atmosphere. However, both those environmental services are threatened by ongoing deforestation and forest degradation. Here we present one of the first simulated studies using the MRV REDD+ (measuring, reporting and verifying reduced emissions from deforestation and degradation) approach, in which we report the balance of above ground carbon density over the landscape due to degradation and deforestation. We used repeated airborne lidar (light detection and ranging) surveys over 1079 ha near the Tapajós National Forest region, Eastern Amazon, Brazil, between 2013 and 2016. We reported carbon losses from severe understory fires, as well as losses due to deforestation of secondary and previous degraded forests. We also reported gains from regrowth of secondary forests. The results showed a huge amount of carbon lost due to fires resulted from 2015 El Niño drought. In addition, the deforestation of secondary forests played a significant role on the emissions balance over the landscape. Airborne Lidar is a powerful approach for quantifying the balance of carbon over the landscape within the scope of REDD+, as long as its associated uncertainty.

**Palavras-chave:** remote sensing, lidar, parametric model, emission factors; sensoriamento remoto, lidar, modelo paramétrico, fatores de emissão.

## 1. Introdução

As florestas tropicais desempenham papel inestimável no ciclo global do carbono (Houghton 2005). Um deles é a capacidade de estocar (1) grandes quantidades de carbono, vivo e morto, acima do solo (Pan et al. 2011). Outro importante papel está relacionado com a capacidade de processar (2) carbono da atmosfera, fazendo com que assim os estoques permaneçam relativamente constantes, cresçam de forma lenta ou cresçam rapidamente no caso de uma floresta secundária (Brienen et al. 2015; Chazdon et al. 2016). Ambos os serviços ecossistêmicos estão ameaçados pela degradação florestal e o desmatamento. Os estoques de carbono podem diminuir drasticamente devido a eventos de degradação florestal tais como queimada e exploração madeireira (Longo et al. 2016). As queimadas florestais na Amazônia impactam negativamente os estoques vivos, tendo potencial de emissão quase equivalente as emissões devido ao desmatamento dependendo do ano. A regeneração florestal também está sujeita a degradação florestal e o desmatamento. Entretanto, pouco se sabe sobre emissões devido ao desmatamento de áreas de floresta secundárias.

Uma abordagem política e de incentivo financeiro em questões relacionadas a redução das emissões devido ao desmatamento e a degradação (REDD+) possui um papel chave na proteção desses serviços ecossistêmicos (Gibbs et al. 2007). Um dos desafios para implementação do REDD+ é a realização de uma adequada mensuração, relato e verificação (MRV) das mudanças dos estoques, para ser possível comparar com as estimativas de linha de base para a posterior confirmação da redução nas emissões. Existe a necessidade de uma técnica efetiva e espacialmente explícita para o MRV, que leva em consideração a variabilidade espacial e suas incertezas associadas. Um exemplo são as técnicas de sensoriamento remoto (Morton 2016). O sensoriamento remoto ativo, tal como o laser aerotransportado ou light detection and ranging (lidar), possui um papel chave no monitoramento espacial dos estoques de carbono (Asner e Mascaro, 2014; Longo et al. 2016) e também de suas mudanças (Réjou-Méchain et al. 2015).

Este estudo utilizou três medidas repetidas de lidar ao longo de 4 anos para simular um estudo de MRV em uma paisagem de múltiplos usos e cobertura do solo localizada em São Jorge, próximo a Santarém, Pará. Objetivou-se avaliar qual a contribuição dos componentes: (1) emissão devido a desmatamento (diferenciamos floresta previamente degradada e secundária); (2) emissão devido a degradação por queimadas de sub-bosque e queimada severa; (3) acúmulo de carbono devido a regeneração de florestas secundárias; para o balanço de carbono geral da paisagem.

## 2. Metodologia de trabalho

### 2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em uma área de assentamento denominada de São Jorge, próximo a cidade de Santarém, estado do Pará, Amazônia Oriental (Figura 1). O assentamento de São Jorge fica próxima a Floresta Nacional do Tapajós, da qual fazia parte até 2012. O assentamento São Jorge está localizada em uma área povoada sujeita a desmatamento e degradação (Figura 1).

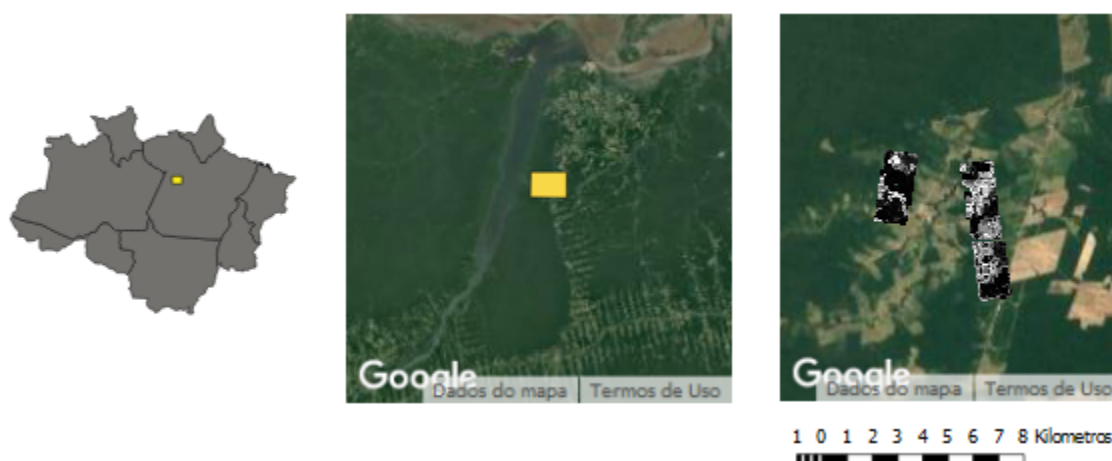


Figura 1. Área de estudo (esquerda os estados da Amazônia Legal; centro a localização da área de estudo próximo à Floresta Nacional do Tapajós; e direita, o recorte da região onde foram realizados os voos de lidar (3°07'S, 54°58'W).

## 2.2 Aquisição de dados repetidos de lidar

Os dados lidar foram adquiridos em 2013 e 2016 para o mapeamento da degradação e do desmatamento, bem como para a quantificação do balanço de estoque de carbono acima do solo conforme descrito na Tabela 1. A comparação de emissões referente a 2013-2016 foi realizada considerando um intervalo prévio de 2012 a 2013 (dados sobre mapeamento de degradação e desmatamento derivados do lidar de 2012 não mostrados).

Tabela 1. Informações da aquisição de dados lidar.

Característica	Ano	
	2013	2016
Equipamento	OPTECH ORION 09SEN243	OPTECH ALTM 3100 05SEN171
Data de aquisição	10/09/2013	23/03/2016
Altura do voo (m)	850	700
Frequência de varredura (Hz)	67.5	40.0
Densidade média de retornos (retorno m <sup>-2</sup> )	10.0	11.0
Overlap (%)	65	70
Área de cobertura (ha)	1079	1079

## 2.3 Caracterização do histórico de degradação e mapeamento do desmatamento e degradação

A caracterização do histórico de degradação anterior à aquisição de dados lidar foi realizada através de análise visual de imagens Landsat TM 7 e 8, produtos NDVI e NBR, em formato *raster* (Longo et al., 2016). Longo et al. (2016) consideraram uma série histórica de

1984 até 2013. As seguintes classes foram identificadas: desmatamento, exploração seletiva e queimada. A idade do desmatamento e do evento de degradação também foi contabilizada.

O mapeamento de queimada de sub-bosque, queimada severa, desmatamento e regeneração para a simulação do balanço de estoque de carbono foi realizado através de interpretação visual do modelo de topo de dossel derivado da nuvem de pontos do lidar de 2012, 2013 e 2016 (Figura 2). Neste estudo consideramos para o cálculo do balanço apenas o intervalo de 2013 a 2016. O intervalo entre 2012 e 2013 foi considerado apenas como referência de comparação. O modelo de topo de dossel foi gerado utilizando o software FUSION (McGaughey, 2014). A figura 2 mostra exemplos de recorte do modelo de topo de dossel de floresta intacta, queimada de sub-bosque e queimada severa no ano de 2016.

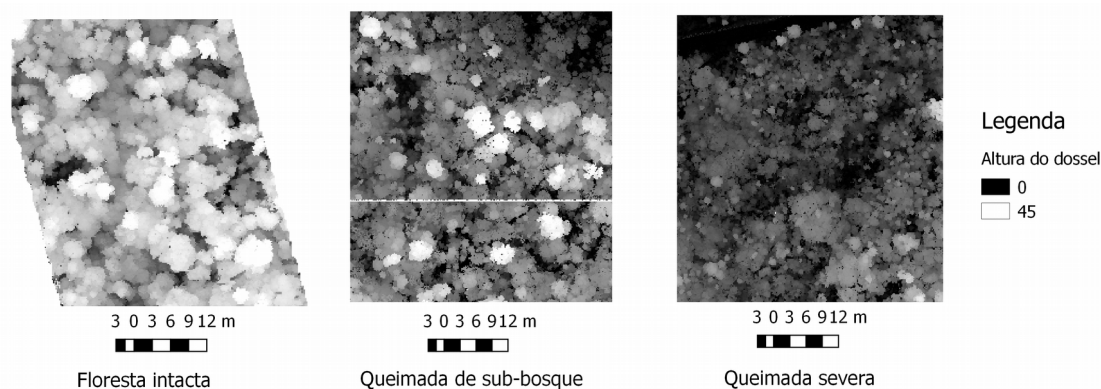


Figura 2. Recortes do modelo de topo de dossel de uma floresta intacta, queimada de sub-bosque e queimada severa do ano de 2016 no assentamento de São Jorge, PA.

## 2.4 Estimativa de estoque de carbono através do Lidar

A estimativa de estoque de carbono foi realizada através de um modelo paramétrico ajustado para florestas intactas e degradadas na Amazônia (Longo et al. 2016). Utilizamos o modelo que considera apenas a altura média do topo do dossel (TCH) como variável independente do modelo (Equação 1), pelo fato de apresentar melhor desempenho em áreas queimadas recentes (Longo et al. 2016). A informação espacial de altura do dossel em resolução de 1 x 1 m foi agregada (média) para 50 x 50 m em formato *raster*, escala de calibração utilizada por Longo et al. (2016). Com o modelo de topo de dossel em 50 x 50 m, produzimos o mapa de estoque de carbono em KgC m<sup>-2</sup> para a região de São Jorge dentro da área de cobertura do dado Lidar (Figura 3).

$$ACDtch = 0.054 (0.012) TCH^{1.76(0.07)} + En[\mu = 0, \sigma = 0.17 (0.05) TCH^{1.04(0.10)}] \quad (1)$$

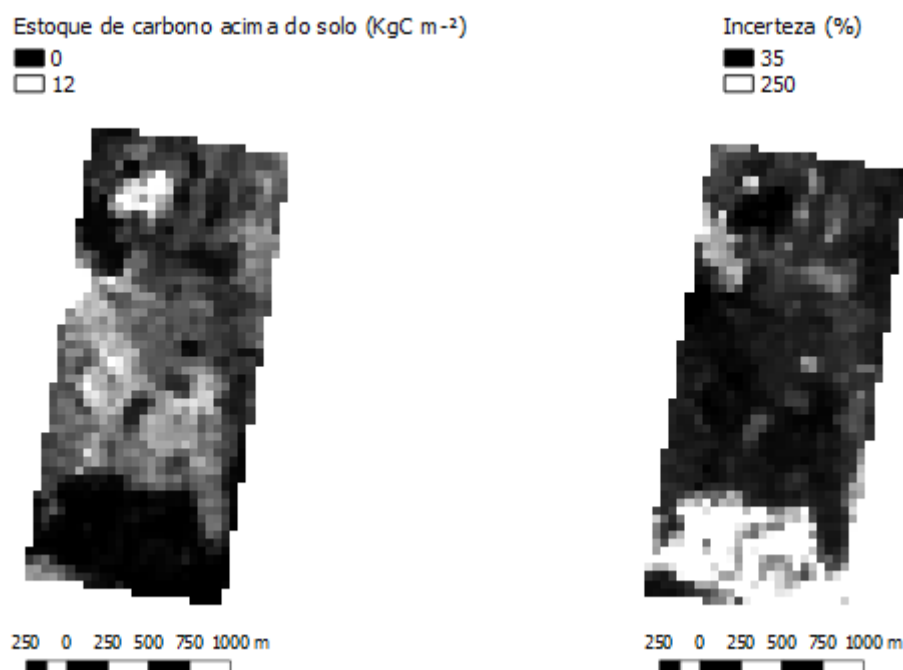


Figura 3. Mapa de estoque de carbono (50 x 50 m) derivado de estimativas de modelo paramétrico com altura do topo do dossel como variável independente (esquerda) e incerteza (direita) para uma das áreas de cobertura do Lidar em São Jorge, Pará, ano de 2013.

## 2.5 Cálculo das taxas de mudanças e propagação das incertezas

A taxa de mudança no estoque de carbono foi calculada através de uma calculadora *raster* utilizando a seguinte equação (Equação 2):

$$\Delta C = ( \text{Ln}(C_{\text{ano } 2}) - \text{Ln}(C_{\text{ano } 1}) ) / \Delta t \quad (2)$$

$$\Delta C_f = C_{\text{ano } 1} \times \Delta C \quad (2.1)$$

Onde  $\Delta C$  é a taxa de mudança ( $\text{ano}^{-1}$ ),  $\Delta C_f$  é o ganho ou diminuição de estoque de carbono anualizado ( $\text{KgC m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ),  $\text{Ln}$  é o logaritmo natural,  $C_{\text{ano } 2}$  é o estoque de carbono ( $\text{KgC m}^{-2}$ ) no segundo ano,  $C_{\text{ano } 1}$  é o estoque de carbono ( $\text{KgC m}^{-2}$ ) no primeiro ano e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em anos. Calculamos as taxas de mudanças de 2012 para 2013 (apenas para efeito de comparação) e de 2013 para 2016 para contabilizar as emissões e ganhos.

A incerteza associada a cada pixel de ganho ou diminuição de estoque de carbono anualizado foi calculada e propagada de acordo com os seguintes passos. O primeiro passo foi transformar o erro relativo, conforme Saatchi et al. (2007) e Longo et al. (2016) no logaritmo do erro absoluto utilizando as seguintes equações:

$$\varepsilon = \sigma / C \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{Ln}} = \text{raiz}(\text{Ln}[1 + \varepsilon^2]) \quad (4)$$

$$\sigma \Delta C_f = ( \sigma_{\text{Ln\_ano } 2}^2 - \sigma_{\text{Ln\_ano } 1}^2 ) / \Delta t \quad (5)$$

Onde  $\sigma$  é a raiz quadrada da soma dos erros ao quadrado dos seguintes componentes: erro de medida, erro de amostragem, erro do modelo alométrico;  $\varepsilon$  é o erro relativo;  $C$  é o estoque de carbono ( $\text{KgC m}^{-2}$ );  $\sigma_{\text{Ln}}$  é o erro na escala logarítmica;  $\sigma_{\text{Ln}_{\text{ano}_2}}$  é o erro em escala logarítmica do segundo ano;  $\sigma_{\text{Ln}_{\text{ano}_1}}$  o erro em escala logarítmica do primeiro ano;  $\sigma \Delta C_f$  é o erro propagado de cada pixel de ganho ou diminuição de estoque de carbono anualizado ( $\text{KgC m}^{-2}$ );  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em anos.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1 Contribuição de desmatamento, queimada e regeneração

O intervalo de referência considerado neste estudo, de 2012 a 2013, apresentou menos de 10% de degradação devido a queimada e menos de 1% de desmatamento quando comparado com o intervalo considerado para o cálculo do balanço (2013-2016). Além disso, a estimativa média de  $m\Delta C_f \pm \sigma \Delta C_f$  ( $\text{MgC ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) para este período, considerando áreas de floresta secundárias e previamente degradadas, mostrou que tanto florestas secundárias quanto florestas se recuperando de eventos de degradação anteriores acumularam uma quantidade considerável de carbono:  $9,0 \pm 10,0 \text{ MgC ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  (dados não mostrados). Entretanto, o balanço geral de ganho e perda de carbono foi negativo entre o período de 2013 a 2016 (Tabela 2). A regeneração de florestas secundárias contribuiu com uma pequena parcela do balanço geral da paisagem (entre 66,0 e 506,0 Mg C), quando comparado com as perdas devido a queimadas e desmatamento. Quase toda a área florestal (secundária ou degradada) anterior a 2013 sofreu queimada ou desmatamento durante esses 3 anos considerados.

Tabela 2. Contribuição de cada componente no balanço de estoque de carbono acima do solo em 1079 ha de dados lidar. 2013-2016 representa queimadas e desmatamento de 2013-2016.  $C_{\text{total}}$  é o total de ganho ou diminuição no estoque de carbono de cada componente em 3 anos intervalo considerado.

Componente	Área (ha)	2013-2016		Limite inferior $C_{\text{total}}$ (Mg)	Limite superior $C_{\text{total}}$ (Mg)
		$m\Delta C_f \pm \sigma \Delta C_f$ ( $\text{MgC ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ )	$m\Delta C_f \pm \sigma \Delta C_f$ ( $\text{MgC ha}^{-1}$ )		
Regeneração floresta secundária	11,0	$26,0 \pm 20,0$	-	+66,0	+506,0
Queimada de sub-bosque	309,0	$9,2 \pm 6,7$	-	-772,5	-4913,1
Queimada severa	91,0	$19,5 \pm 9,3$	-	-928,2	-2620,8
Desmatamento em floresta degradada	42,3	-	$160,0 \pm 74,0$	-3637,8	-9898,2
Desmatamento em floresta secundária	214,0	-	$82,0 \pm 58,0$	-5136,0	-29960,0
Área total considerada	1079,0	-	-	-	-



### 3.2 A diminuição dos estoques de carbono devido as queimadas florestais: efeito do El Niño

O maior componente de degradação, considerando área mapeada, foi a queimada de sub-bosque exacerbada devida à seca extrema no ano de 2015 (El-Niño) (Tabela 2). A queimada de sub-bosque foi o terceiro maior componente de emissão durante o período considerado, emitindo cerca de 772,0-49131 Mg de carbono em toda a paisagem durante o período de 2013-2016 (Tabela 2).

### 3.3 O Papel das florestas secundárias sobre o acúmulo e emissão de carbono devido ao desmatamento

O maior componente de emissão entre os anos de 2013 e 2016 foi devido a desmatamento em florestas secundárias (Tabela 2). A emissão resultante de 214 ha de florestas secundárias foi de 5136,0-29960,0 Mg de carbono em 1079 ha de paisagem (Tabela 2). Esse resultado mostra que o serviço ecossistêmico prestado pelas florestas secundárias, de capturar carbono da atmosfera mitigando o efeito estufa, pode ser seriamente impactado devido ao desmatamento florestal.

## 4. Conclusões

O desmatamento em florestas secundárias contribuiu com o maior componente de emissão durante os anos de 2013-2016, sendo um importante componente a ser considerado em uma paisagem com um histórico de desmatamento e degradação intenso. Os eventos de seca extrema na Amazônia, além de impactarem negativamente a capacidade de estocar carbono em áreas de floresta intactas, contribui significativamente para o aumento de queimadas de sub-bosque e conseqüentemente com emissões associadas. O lidar é uma ferramenta poderosa para o mapeamento e quantificação de emissões devido a degradação e desmatamento no âmbito de projetos de REDD+.

## 5. Agradecimento

Este estudo faz parte do projeto “Mudanças de uso da terra e suas interações com processos de degradação florestal na Amazônia” CNPq/LBA (processo 457927/2013-5). Marcos Scaranello é bolsista DTI CNPq, processo (384475/2015-9). Este estudo utilizou dados do projeto “Paisagens Sustentáveis”. Marcos Longo é bolsista de pós-doutorado da FAPESP (processo 2015/07227-6).

## 5. Referências bibliográficas

- Asner, G.P.; Mascaro, J. Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 614–624, 2014.
- Brienen, R.J.W.; et al. Long-term decline of the Amazon carbon sink. **Nature** v. 519, p. 344–348, 2015.
- Chazdon, R.L.; et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**. v. 2, e1501639–e1501639, 2016.
- Gibbs, H.K.; Brown, S.; Niles, J.O.; Foley, J.A. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. **Environmental Research Letters**. v. 2, p. 45023, 2007.

Houghton, R.A. Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. **Global Change Biology**, v. 11, p. 945–958, 2005.

Longo, M.; Keller, M.; dos-Santos, M.N.; Leitold, V.; Pinagé, E.R.; Baccini, A.; Saatchi, S.; Nogueira, E.M.; Batistella, M.; Morton, D.C. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochemical Cycles**, v.x, p. xxx-xxx, 2016.

McGaughey, R.J. **FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization, Manual**. USFS Pacific Northwest Research Station, Seattle, WA, USA, 2014.

Morton, D.C. Forest carbon fluxes: A satellite perspective. **Nature** v. 6, p. 346–348, 2016.

Pan, Y., et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. **Science**, v. 333, p. 988–993, 2011.

Réjou-Méchain, M.; Tymen, B.; Blanc, L.; Fauset, S.; Feldpausch, T. R.; Monteagudo, A.; Phillips, O. L.; Richard, H.; Chave, J. Using repeated small-footprint LiDAR acquisitions to infer spatial and temporal variations of a high-biomass Neotropical forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 169, p. 93–101, 2015.

Saatchi, S.S.; Houghton, R.A.; Dos Santos Alvalá, R.C.; Soares, J.V.; Yu, Y. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. **Global Change Biology**, v. 13, p. 816–837, 2007.