

## Utilização de produtos derivados de sensores orbitais para o estudo de queimadas na Amazônia

Luiz Eduardo O. e C. Aragão<sup>1</sup>  
Yosio Edemir Shimabukuro<sup>2</sup>  
Andre Lima<sup>2</sup>  
Liana O. Anderson<sup>1</sup>  
Nicolas Barbier<sup>3</sup>  
Sassan Saatchi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Environmental Change Institute, School of Geography and the Environment,  
University of Oxford, OX1 3QY, UK  
{luiz.aragao, liana.anderson}@ouce.ox.ac.uk

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{yosio, andre}@ltid.inpe.br

<sup>3</sup> Université Libre de Bruxelles  
Service de Botanique Systématique et Phytosociologie, CP 169, B-1050, Bruxelles, Belgium  
nbarbier@ulb.ac.be

<sup>4</sup> Jet Propulsion Laboratory  
California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA  
saatchi@congo.jpl.nasa.gov

**Abstract.** The main objective of this article is to depict the interplay between climate and land use dynamics in Amazonia. Understanding these relationships is currently a fundamental concern for assessing the vulnerability of this ecosystem to climate change. Here we analyze satellite-derived monthly time-series of rainfall, fires and deforestation to quantify the seasonal patterns and relationships between these three variables. Our results demonstrate a marked seasonality of fires. The majority of fires occurs along the Arc of Deforestation, as expected. Deforestation and fires reach the highest values three and six months, respectively, after the peak of the rainy season. The cumulative number of hot pixels was exponentially related to the monthly rainfall. During the 2005 drought, the number of hot pixels increased 33% in relation to mean 1998-2005. We demonstrated that anthropogenic forcing, such as land use changes, is decisive in determining the seasonality and annual patterns of fire occurrence. Moreover, droughts can increase significantly the number of fires in the region. We may expect that the ongoing deforestation, currently based on slash and burn procedures, and the use of fires for land management in Amazonia, will intensify the impact of droughts associated with natural climate variability or human-induced climate change and therefore, a large area of forest edge will be under increased risk of fires.

**Palavras-chave:** remote sensing, fire, queimadas, NOAA-12, DETER, TRMM, sensoriamento remoto, Amazônia, Amazon, drought, seca.

### 1. Introdução

A ocorrência de queimadas nos biomas tropicais é regulada principalmente pelas condições climáticas e atividades humanas. Este fenômeno é portanto vulnerável às mudanças climáticas globais. Essas queimadas exercem grande influência no ciclo global do carbono pois afetam a estrutura da vegetação, modificam os estoques e fluxos de carbono, influenciando as interações entre a biosfera e atmosfera. As mudanças na cobertura da terra e principalmente os processos de degradação florestal na Amazônia contribuem significativamente para as emissões de carbono para a atmosfera. No entanto, estes processos

continuam sendo a maior fonte de incerteza para o balanço global do ciclo do carbono (Houghton 2000, Denman et al., 2007).

Estima-se que as emissões anuais de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis fósseis e produção de cimento sejam na ordem de  $7.2 \pm 0.3 \text{ Pg C ano}^{-1}$  ( $1 \text{ Pg} = 1 \times 10^{15} \text{ g}$ ) para o período entre 2000-2005. Deste total,  $0.9 \pm 0.6 \text{ GtC ano}^{-1}$  foi sequestrado pela biosfera terrestre no mesmo período. O fluxo global de CO<sub>2</sub> para a atmosfera proveniente das mudanças na cobertura da terra foi de 1.6 (0.5 a 2.7) Pg C ano<sup>-1</sup> para a década de 90 (Denman et al., 2007). Em uma análise específica para a Amazônia Brasileira, Houghton et al. (2000) estimou que as mudanças na cobertura da terra contribuíram com um fluxo líquido de carbono para atmosfera de 0.1 - 0.4 Pg C ano<sup>-1</sup> (6-25% do total). Estes valores demonstram não só a importância das emissões tropicais pela conversão e queima de florestas nativas para o balanço global, como também destacam a região amazônica como um dos principais focos de emissões de C.

Além da interferência antrópica no ecossistema amazônico alterando o ciclo global de carbono por meio da degradação florestal, estudos recentes tem demonstrado a partir da análise de modelos de circulação global, que existe uma alta probabilidade de aumento da frequência de secas extremas na Amazônia como consequência do aquecimento global (Li et al., 2006, Malhi et al., 2007). Este cenário de secas pode causar o aumento de queimadas florestais (Aragão et al. 2007), além de diretamente induzir a mortalidade das florestas amazônicas causando uma aceleração do aquecimento global (Cox et al., 2004).

Diante dessas evidências, devemos, como primeiro passo para mitigação deste problema, responder as seguintes perguntas:

- 1) Onde e quando ocorrem as queimadas na Amazônia?
- 2) Qual a relação entre as queimadas, desmatamento e clima?
- 3) Como uma seca extrema afeta os padrões de queimada normalmente observados?

As duas maiores dificuldades em responder essas perguntas com um enfoque regional, ou seja, para toda a bacia amazônica (cerca de  $5 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) ou para a Amazônia brasileira, são a dimensão deste sistema e a escala temporal com que os fenômenos como, queimadas, desmatamentos e secas ocorrem na região. No entanto, atualmente, existe uma variedade de sensores orbitais que geram informações ambientais e permitem a elaboração de produtos relevantes para responder essas perguntas. No presente estudo por exemplo, integramos dados sobre focos de calor do sensor NOAA-12 e taxas de desmatamento mensais, disponibilizados gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através dos projetos Queimadas, DETER respectivamente. Além disso, utilizamos também os dados de precipitação pluviométrica derivados da missão TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*, NASA) para atingir os seguintes objetivos:

- 1) Demonstrar a variação sazonal da frequência queimadas na Amazônia.
- 2) Investigar as os efeitos do clima e desmatamento nos padrões sazonais das queimadas.
- 3) Investigar como a seca de 2005 afetou a distribuição espacial das queimadas na região amazônica.

## **2. Materiais e métodos**

A maioria das análises apresentadas neste artigo estão focadas dentro dos limites da Amazônia Legal. No entanto, algumas análises foram realizadas considerando a definição proposta por Eva and Huber (2005), que inclui outras áreas de floresta densa fora dos limites da Amazônia brasileira. Informações adicionais serão providas quando necessário no decorrer do texto.

### a. Base de dados orbitais

Neste estudo, foram utilizados dados de uma série de produtos derivados de satélites ambientais com informações sobre focos de calor, pluviometria e desmatamento (INPE-DETER 2006; INPE-QUEIMADAS 2006; NASA 2006).

Os focos de calor mensais foram derivados do processamento e integração de dados diários do sensor NOAA-12 (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), disponíveis na base de dados do projeto Queimadas do INPE (1998–2005; INPE-Queimadas 2006). Os dados originais foram agregados em valores acumulados mensais numa resolução espacial de 0.25°

Os dados de pluviometria foram obtidos a partir do processamento de uma serie temporal (Jan-98 – Dez-06) de chuva acumulada mensalmente derivada dos dados TRMM (produto, 3B43-v6), com resolução espacial de 0.25° (NASA 2006).

A base de dados dos projetos DETER (INPE-DETER 2006) foi utilizada para quantificar a área total (km<sup>2</sup>) dos polígonos desmatados mensalmente de Abr-04 até Out-05 e entre Mar-06 e Set-06. Os valores de desmatamento para os meses sem estimativas mensais foram estimados utilizando valores proporcionais entre meses consecutivos entre Out-04 e Fev-05.

### b. Análise dos dados

Para demonstrar a variação sazonal das queimadas na região amazônica, comparamos os mapas de precipitação pluviométrica acumulada por trimestre com os totais trimestrais de focos de calor acumulados dentro de cada célula com 0.25° de resolução espacial.

Posteriormente, avaliamos o efeito do clima e desmatamento no padrão sazonal das queimadas. Para esta análise, os valores médios de pluviometria e totais de área desmatada e focos de calor dentro da Amazônia Legal foram extraídos das superfícies mensais. Uma análise de regressão foi conduzida para testar a significância das relações entre as variáveis.

Finalmente, analisamos o efeito da seca de 2005 no padrão espacial das queimadas na Amazônia. Para mapear as mudanças nos padrões de queimadas, inicialmente calculamos para cada pixel ( $i, j$ ) a anomalia para o ano de 2005 ( $NOAA_{anomalia,t}$ ) como a diferença dos valores de 2005 em relação a média dos total de focos de calor entre 1998 e 2005 ( $NOAA_{1998-2005}$ ) dividido pelo desvio padrão da média ( $\sigma$ ). As superfícies de focos de calor, já agrupadas por trimestres ( $t$ ) anteriormente, foram processadas seguindo a equação 1.

$$NOAA_{anomalia,t}(i, j) = \frac{NOAA_{2005,t}(i, j) - NOAA_{1998-2005,t}(i, j)}{\sigma_{1998-2005,t}(i, j)} \quad (3)$$

As anomalias de focos de calor foram então comparadas com a distribuição especial da seca. A severidade da seca foi mapeada utilizando o conceito do máximo déficit hídrico acumulado (MWD) (Aragão et al., 2007). Este valor corresponde ao máximo valor do déficit hídrico (WD) para cada pixel acumulado dentro de um ano. Para isso, calculamos os déficits hídricos mensais baseados na aproximação de que as florestas tropicais densas transpiram cerca de 100 mm por mês (Shuttleworth, 1989; Malhi et al., 2002; Cox et al., 2004; Hutyrá et al., 2005). Portanto, quando a chuva é menor que 100 mm por mês a floresta entra em déficit hídrico. A seguinte regra foi utilizada para calcular os valores de déficit hídrico (WD) para cada mês ( $n$ ) em cada pixel, considerando um valor de evapotranspiração ( $E$ ), fixo de 100 mm mês:

Se

$$WD_{n-1}(i, j) - E(i, j) + P_n(i, j) < 0$$

então

$$WD_n(i,j) = WD_{n-1}(i,j) - E(i,j) + P_n(i,j);$$

senão

$$WD_n(i,j) = 0$$

Posteriormente, o MWD foi obtido para cada pixel como o mínimo valor de WD (já que os valores resultantes são todos negativos) entre todos os meses para cada ano entre 1998-2005.

### 3. Resultados e discussão

#### a. Variação sazonal das queimadas

A Amazônia apresenta uma sazonalidade climática bem marcada. Durante os meses de janeiro, fevereiro e março a estação seca se intensifica no norte da região, enquanto a porção sul sofre com períodos secos durante os meses de julho, agosto e setembro. As queimadas seguem claramente o mesmo padrão das chuvas. Apesar de serem detectadas durante todo o ano, são mais frequentes no primeiro trimestre na região norte e no terceiro na região sul e leste. Apenas uma pequena faixa no nordeste da Amazônia apresenta aumento de focos de calor durante os meses de outubro, novembro e dezembro (Figura 1).

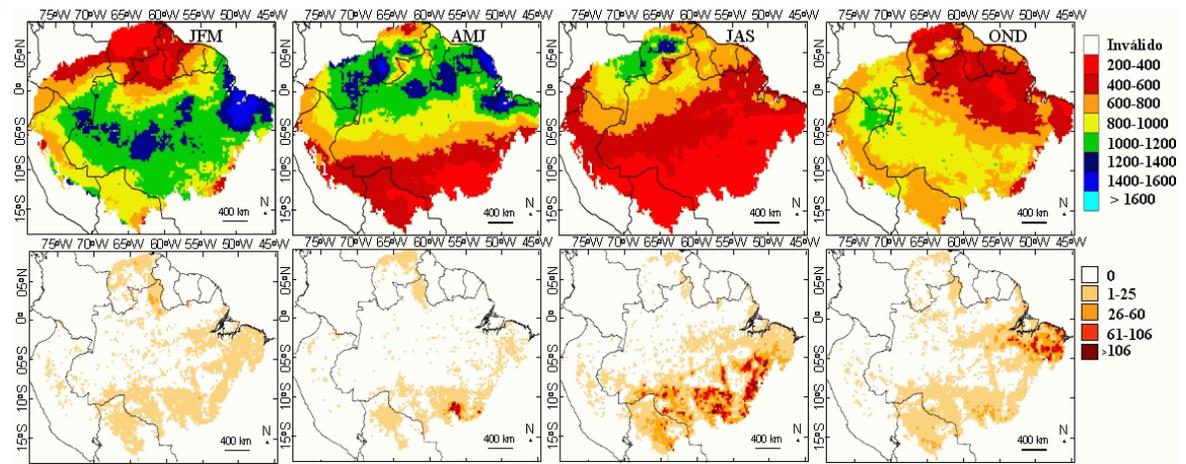


Figura 1. No painel superior observa-se a precipitação pluviométrica acumulada durante cada trimestre derivadas dos dados TRMM, janeiro-fevereiro-março (JFM), abril-maio-junho (AMJ), julho-agosto-setembro (JAS), outubro-novembro-dezembro (OND). A legenda indica os valores em milímetros. No painel inferior observa-se o total de focos de calor acumulados trimestralmente derivados do sensor NOAA-12. A legenda indica o número total de focos agregados dentro de cada pixel com resolução espacial de  $0.25^\circ$ .

#### b. Efeitos do clima e desmatamento na sazonalidade das queimadas

As chuvas na Amazônia possuem uma influência significativa ( $p < 0.05$ ) tanto na sazonalidade dos desmatamentos como na sazonalidade das queimadas (Figura 2). O desmatamento apresenta uma correlação com a chuva com um atraso de três meses. Ou seja, o desmatamento ocorre cerca de três meses antes do pico da estação seca. Por outro lado, o pico das queimadas ocorre como o esperado durante o mês mais seco. Existe uma tendência exponencial de decréscimo do número de focos de calor com o aumento da chuva.

Apesar da tendência de aumento das queimadas com o aumento da área desmatada (Figura 2c), não foi possível estabelecer uma relação significativa entre as duas variáveis. Isto foi atribuído principalmente pela presença de um mês em 2006 que apresentou um desmatamento de aproximadamente 5000 km<sup>2</sup> com baixo número de focos de calor durante este mesmo período. No entanto, Aragão et al. (2007) demonstraram numa escala anual uma relação significativa entre desmatamento e queimadas.

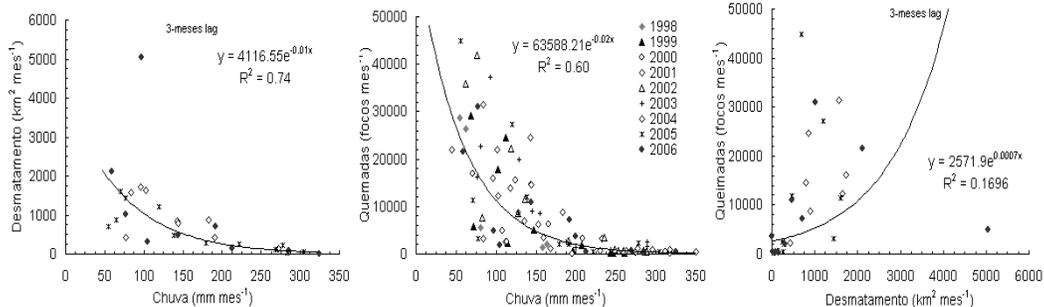


Figura 2. Regressões entre os valores totais mensais de área desmatada e focos de calor e valores médios mensais de chuva, extraídos dentro da área da Amazônia Legal.

### c. Impacto da seca na distribuição espacial dos focos de calor

A seca de 2005 afetou principalmente a região sudoeste da Amazônia. Este padrão foi diferente das secas anteriores. Durante 2005, a seca foi induzida pelo aquecimento do oceano Atlântico equatorial em um fenômeno como Oscilação Multidecadal do Atlântico. Durante os anos anteriores as secas na Amazônia afetaram principalmente a porção norte e leste da bacia e foram causadas pelo fenômeno do El Niño, que consiste no aquecimento do oceano Pacífico (Marengo et al. 2008).

As queimadas por sua vez, se intensificaram na região sudoeste principalmente nos estados do Acre, Rondônia e parte da Bolívia, onde a seca foi mais intensa (Figura 3). Principalmente no Acre, a frequência de queimadas é mais baixa em relação a frequência observada no leste da Amazônia, no entanto, apresentaram-se muito acima da média observada (mais que dois desvios padrões) durante a seca de 2005. Isto indica a influência de anos secos na distribuição espacial do fogo na Amazônia.

Outro fato interessante observou-se na fronteira com o Perú. Devido à baixas taxas de conversão de florestas em pastagens ou agricultura, não foram observados valores anormais de queimadas durante 2005, o que indica que o fogo na Amazônia necessita de um componente antrópico como fonte de ignição, mesmo em períodos de seca extrema.

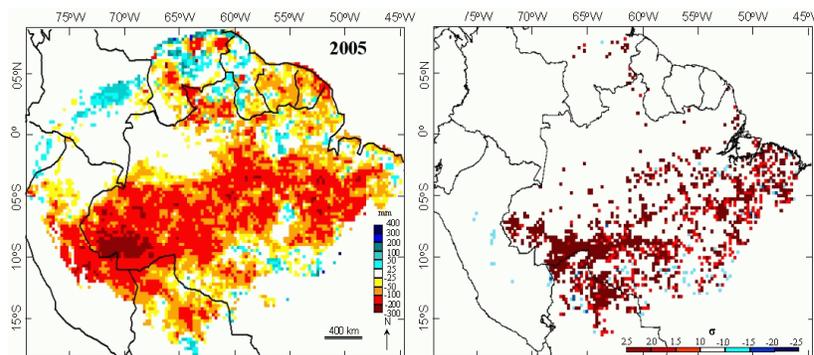


Figura 3. Na esquerda observa-se o mapa que máximo deficit hídrico acumulado. Valores mais negativos indicam áreas mais secas em relação a média de 1998-2005, em milímetros.

Na direita observa-se as anomalias de áreas queimadas em 2005. Valores positivos neste caso indicam mais focos em 2005 que a média de 1998-2005, em unidades normalizadas de desvio padrão.

#### 4. Conclusões

O presente estudo demonstrou que as queimadas na Amazônia são um processo sazonal se intensificando durante as estações secas. Existe um sinergismo evidente entre os padrões espaço-temporais das queimadas, do clima e do desmatamento nesta região. Concluímos que secas extremas tem a capacidade de alterar os padrões de queimadas observados, mas contudo, necessitam estar combinadas a ações antrópicas para que haja ignição.

O efeito sincronizado da seca extrema com o desmatamento causou um aumento significativo (33% em relação a média) no número de focos de calor detectados. Com o previsto aumento da frequência de secas na Amazonia, e com o desmatamento contínuo desta região, espera-se portanto que o fogo seja em breve um agente de transformação importante dos estoques de carbono, diversidade e ecologia do ecossistema amazônico.

Ainda existe uma falta de informação sistemática (espacial e temporal) sobre os processos de degradação, tal como as queimadas em florestas. O mapeamento da área afetada por essas queimadas e sua intensidade por exemplo, é crucial para o aperfeiçoamento da quantificação das emissões de carbono resultantes do uso da terra na Amazônia.

Incluir, além do desmatamento, temas sobre queimadas e degradação florestal na agenda político-científica nacional e internacional é atualmente vital para estabelecer a vulnerabilidade do ecossistema Amazônico às mudanças do clima e elaborar o planejamento do manejo e conservação deste bioma.

#### Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao *Natural Environment Research Council* (NERC-UK) pelo financiamento da pesquisa (projeto NE/F015356/1).

#### Referências Bibliográficas

Aragão, L.E.O.C. et al. 2007 Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters** 34, 5.

Cox, P. M. et al. 2004 Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology* 78, 137-156.

Denman, K.L., et al. 2007: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press.

Eva, H. D. and O. Huber (eds), **A Proposal for defining the geographical boundaries of Amazonia** (European Commission - Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities ISBN 92-79-00012-8, 2005).

Houghton, R. A. et al. 2000 Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature** 403, 301-304.

Hutyra, L. R. et al. 2005 Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazonia. **Geophysical Research Letters** 32, 4.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), DETER disponível em <<http://www.obt.inpe.br/deter/dados/>>

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), Projeto Queimadas disponível em <http://www.cptec.inpe.br/queimadas/>

Li, W. H., Fu, R. & Dickinson, R. E. 2006 Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres** 111, 14.

Malhi, Y. et al. (2002), The energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest, **Journal of Geophysical Research**, 107, D20, 806, doi:10.1029/2001JD000623.

Malhi, Y. et al. 2007 Climate change and the fate of the Amazon. **Science**, 2007, in press.

Marengo, J. A., et al. (2008), The drought of Amazonia in 2005, **Journal of Climate**, in press.

NASA Data Access for TRMM and Other Satellites Precipitation Product, disponível em [http://disc.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM\\_DP/01\\_Data\\_Products/02\\_Gridded/07\\_Monthly\\_Other\\_Data\\_Source\\_3B\\_43/](http://disc.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM_DP/01_Data_Products/02_Gridded/07_Monthly_Other_Data_Source_3B_43/)

Shuttleworth, W. J. (1989), Micrometeorology of temperate and tropical forest, **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Serie B, 324, 299-334.