

IMPACTOS DE QUEIMADAS SOBRE DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA DA TERRA NO LESTE DA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA

Fire Impact on Different Land Cover Types in the Eastern Part of the Brazilian Legal Amazon

**Natalia Salazar Latorre¹, Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão¹,
Liana O. Anderson^{1,2}, Luaê Andere¹, Valdete Duarte¹, Egídio Arai¹ & André Lima^{1,3}**

**¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Tropical Ecosystems and Environmental Sciences Laboratory – TREES
Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR**

Av dos Astronautas, 1.751. Jd. Da Granja, São José dos Campos, São Paulo, CEP: 12227-010, Brazil
nataliasalazarlatorre@gmail.com, {laragao, luae, valdete, egidio}@dsr.inpe.br

**²Centro Nacional de Monitoramento de Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN
Coordenação-Geral de Pesquisa e Desenvolvimento**

Parque Tecnológico de São José dos Campos, Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, CEP: 12247-016,
São José dos Campos - São Paulo, Brasil
liana.anderson@cemaden.gov.br

**³ University of Maryland
Department of Geographical Sciences
College Park, MD 20742, United States
delima@umd.edu**

*Recebido em 16 de Novembro, 2015/Aceito em 28 de Outubro, 2016
Received on November 16, 2015/Accepted on October 28, 2016*

RESUMO

As queimadas na Amazônia Brasileira têm aumentado nas últimas décadas devido à ocorrência de anomalias climáticas e pela ação antrópica para fins de expansão da fronteira agrícola. As queimadas incrementam as emissões de carbono modificando a composição da atmosfera, gerando alterações no equilíbrio dos ecossistemas. Deste modo, é importante determinar quais as fontes de combustão para o propágulo do fogo. Nesse cenário, este estudo teve como objetivo determinar quais tipos de uso e cobertura da terra contribuem com as áreas queimadas na Amazônia oriental, estimar o impacto de uma seca intensa como 2010 nos padrões de área queimada em relação a um ano com padrão normal de precipitação como foi o ano de 2012, e finalmente quantificar o conteúdo de biomassa aérea afetada pelos incêndios ocorridos em 2010. Os resultados indicaram que as coberturas com maior área queimada foram Não-Floresta, Floresta primária e Floresta secundária. Essas coberturas evidenciaram padrões de queimadas maiores no ano de 2010, com um aumento de 29,67% de áreas queimadas com relação ao ano de 2012, influenciadas pelas condições climáticas extremas de 2010. As coberturas de floresta primária e secundária apresentaram os maiores valores de carbono estocado na biomassa aérea, sendo essas classes mais a classe Não-Floresta, as unidades de cobertura com os maiores áreas impactadas pelas queimadas.

Palavras chaves: Fogo, Queimadas, Biomassa, Uso e Cobertura da Terra, Seca.

ABSTRACT

Fires in the Brazilian Amazon have increased in the last decades due to the occurrence of weather anomalies and exacerbation of human actions for expansion of the agricultural frontier. Fires increase carbon emissions modifying the atmospheric composition, affecting the stability of ecosystems. Thus it is important to determine the combustion sources for the spread of fire. In this scenario, this study aimed to determine which of the different land cover and land uses contributed with burned areas in eastern Amazonia, estimate the impact of the 2010 drought on patterns of burned area in comparison to 2012, a year with normal precipitation, and finally, quantify the biomass affected by the 2010 fires. The results indicated that Not-Forest, Primary Forest and Secondary Forest, were the main land cover types affected by fires. However, these land covers suffered a larger fire impact in 2010 with an increase of 29.67% of burned areas compared to the year 2012, influenced by the extreme weather conditions in 2010. The Primary Forest and Secondary Forest classes showed the highest carbon values stored in the aboveground biomass, these classes in addition to the Not-Forest class, were the most affected by the fires.

Keywords: Fire, Biomass, Land Use and Land Cover, Drought.

1. INTRODUÇÃO

Na Amazônia, o uso do fogo por populações locais é uma prática de manejo comum para eliminação da biomassa em áreas recentemente desmatadas e para manutenção de pastagens (ARAGÃO *et al.* 2014). Contudo, em anos de secas extremas, o risco de espalhamento do fogo aumenta, transformando essas queimadas em incêndios descontrolados (ARAGÃO *et al.* 2007). Estes incêndios causam impactos no clima regional e prejudicam o funcionamento dos ecossistemas e sua biodiversidade (BARLOW & PERES 2008). Perdas econômicas e sociais são agravadas pela maior incidência dos incêndios durante anos secos (DIAZ *et al.* 2002). Os incêndios causam a emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera (GATTI *et al.*, 2014). Estas emissões geram um mecanismo de retroalimentação com o clima (VAN DER WERF *et al.* 2006), onde o aumento de CO₂ na atmosfera contribui para o aquecimento global, que por sua vez favorece o aumento na incidência dos incêndios florestais. Este processo somado à intervenção antrópica tende a aumentar os possíveis impactos.

Na Amazônia, uma anomalia intensa no padrão de chuvas foi registrada no ano de 2010. Esta anomalia foi mais severa do que a registrada no ano de 2005 (MARENGO *et al.* 2011). No evento de 2010, foi observado um maior número de focos de calor que a média histórica no leste da Amazônia (ARAGÃO *et al.* 2007). A seca de 2010 foi influenciada pelo evento de El Niño e pelas anomalias relacionadas com o aumento da temperatura superficial do oceano Atlântico Norte

tropical, aumentando as temperaturas do sul e leste da Amazônia durante a estação seca (LEWIS *et al.* 2011, MARENGO *et al.* 2011;). Este aumento na seca associada à diminuição das chuvas em 2010 favoreceu a ocorrência de desastres naturais associados ao uso do fogo na Amazônia.

O efeito climático sobre a ocorrência de incêndios na Amazônia depende da ação antrópica que atua como fonte de ignição. Esta ação está associada à expansão e manutenção da fronteira agrícola, que além de utilizar o fogo como ferramenta de manejo, causa também a degradação das florestas primárias e secundárias, assim como do bioma Cerrado, presente dentro dos limites geográficos da Amazônia legal. O fogo, em paralelo com a degradação florestal, afeta diretamente a estrutura, a composição florística e a diversidade das florestas (BARLOW & PERES 2008). Isto gera outro mecanismo de retroalimentação, onde o fogo altera o microclima interno das florestas degradadas, induzindo a uma redução de umidade nas áreas de bordas e consequentemente aumentando a suscetibilidade a incêndios recorrentes (COCHRANE *et al.* 1999; BROADBENT *et al.* 2008).

Neste contexto, torna-se indispensável quantificar a extensão dos eventos extremos de incêndios e seus potenciais impactos na Amazônia para que possam ser propostas medidas efetivas direcionadas a mitigação deste problema. Um passo fundamental para a elaboração de uma política de redução dos impactos de queimadas consiste: (i) na determinação de quais dos diferentes tipos de cobertura e uso da terra estão mais expostos a incidência de incêndios e (ii) na quantificação de qual o potencial impacto

dos incêndios nas emissões de CO₂ associadas a queima da biomassa vegetal destas coberturas vegetais amazônicas.

Portanto, neste estudo focamos na região leste da Amazônia Brasileira, com o objetivo de (1) mapear a área queimada em função dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra durante a seca de 2010, (2) quantificar o impacto desta seca na extensão das áreas queimadas, utilizando como base o ano de 2012, que apresentou valores de incidência de queimadas dentro da média e (3) quantificar o conteúdo de biomassa aérea afetada pelos incêndios ocorridos em 2010, estimando a quantidade de carbono passível de ser emitido para a atmosfera. Pretendemos com os resultados deste estudo expor os potenciais impactos para as autoridades e entidades de controle, visando subsidiar os esforços de mitigação dos incêndios e seus consequentes impactos nos ecossistemas e populações amazônicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para cumprir os objetivos propostos foram analisadas de forma integrada informações espacialmente explícitas de área queimada, cobertura da terra e biomassa aérea. Os procedimentos metodológicos de integração e análise encontram-se descritos nas seções a seguir.

2.1 Área de estudo

A área de estudo do presente trabalho corresponde à região leste da Amazônia Brasileira, incluindo especificamente os estados do Pará, Tocantins e Maranhão (Figura 1). Estes três estados durante o ano de 2010, juntos, somaram 27.360 focos ativos de queimadas detectados pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo da plataforma (TERRA). Em 2010, o estado do Pará foi o segundo estado brasileiro com maior número de focos ativos (12.518 focos), seguido pelo estado do Tocantins (6.132 focos), e finalmente o estado do Maranhão ocupando a sexta posição (3.926 focos).

2.2 Materiais e Métodos

Para a estimativa do impacto das queimadas na região leste da Amazônia Legal Brasileira e a contribuição das diferentes coberturas foram usados os dados de mapeamento de queimadas feito pelo *Tropical Ecosystems and*

Environmental Science Laboratory (TREES) vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Os dados de uso e cobertura da terra foram adquiridos do produto TerraClass disponibilizado pelo INPE. Finalmente os dados de biomassa viva acima do solo foram adquiridos do produto desenvolvido por Saatchi *et al.* (2011). A descrição detalhada dos produtos utilizados é apresentada nos itens subsequentes.

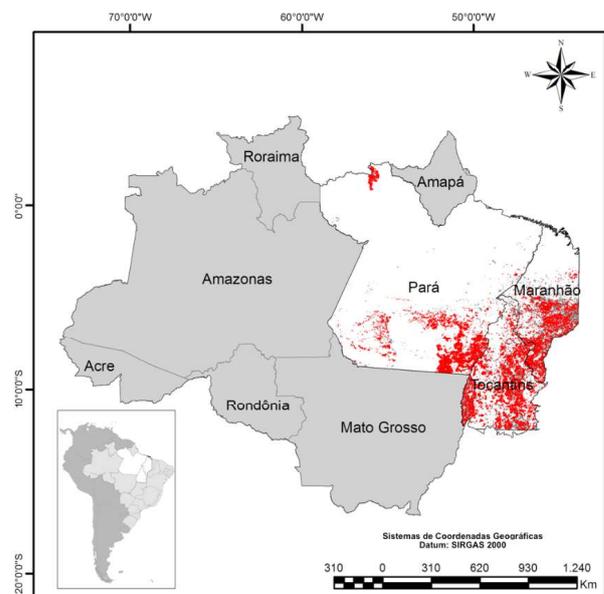


Fig. 1 - Localização da área de estudo nos Estados do Pará, Maranhão e Tocantins na Amazônia Legal Brasileira. A área de cor vermelha e cinza sobre a área de estudo correspondem às cicatrizes das queimadas para os anos de 2010 e 2012, respectivamente. O mapa foi gerado com sistema de coordenadas Geográficas e Datum SIRGAS 2000.

2.2.1 Mapeamento de queimadas da Amazônia Legal Brasileira

Os principais produtos usados no desenvolvimento deste estudo foram os mapas temáticos de cicatrizes de áreas queimadas dos anos 2010 e 2012. Estes mapas temáticos foram gerados através de um método semiautomático desenvolvido para a classificação de áreas de cicatrizes queimadas (ANDERSON *et al.* 2005, SHIMABUKURO *et al.* 2009, LIMA *et al.* 2012, LIMA *et al.* 2013, ANDERSON *et al.* 2015a). As imagens de refletância de superfície provenientes do sensor MODIS foram derivadas dos produtos mosaicos de oito dias MOD09A1, MOD09Q1

e imagens diárias dos produtos MOD09GQ e MOD09GA onde três bandas espectrais foram empregadas e uma delas reamostrada de 500 para 250 metros (ANDERE *et al.* 2015).

Uma vez feito o mapeamento, o produto foi validado com imagens Landsat/TM de 30 m de resolução, seguindo a metodologia de validação de Anderson *et al.* (2017) desenvolvida no INPE.

2.2.2 Cobertura e uso da terra

A determinação da cobertura e uso da terra da área de estudo, foi obtida a partir do produto TerraClass, desenvolvido através da classificação e análise de imagens Landsat/TM, para os anos de 2010 e de 2012 (INPE, 2015a).

O projeto TerraClass quantifica o uso e cobertura da terra sobre a totalidade das áreas desflorestadas mapeadas pelo Projeto PRODES (INPE, 2015b). Nestas áreas o produto TerraClass define doze classes temáticas, sendo: (Classe 2) Agricultura anual, (Classe 3) Mosaico de ocupações, (Classe 4) Área urbana, (Classe 5) Mineração, (Classe 6) Pasto limpo, (Classe 7) Pasto sujo, (Classe 8) Regeneração com pasto, (Classe 9) Pasto com solo exposto, (Classe 10) Vegetação secundária, (Classe 11) Outros (afloramentos rochosos, praias fluviais, bancos de areia, entre outros), (Classe 12) Área não observada, (Classe 13) Reflorestamento e (Classe 16) Desflorestamento. O mapeamento final do TerraClass também disponibiliza as classes temáticas que são contempladas pelo projeto PRODES, incluindo: (Classe 1) Floresta, (Classe 14) Hidrografia e (Classe 15) Não-Floresta (Coutinho *et al.* 2013). Portanto, o dado TerraClass apresenta um total de 16 classes temáticas.

Para atingir os objetivos deste estudo as 16 classes temáticas foram reclassificadas em nove classes, onde as classes 8 e 10 foram agrupadas como Vegetação secundária. As classes 6, 7 e 9 foram agrupadas como Pasto. As classes de 3 a 5 foram agrupadas como Outros. As classes 14 e 15 foram agrupadas na classe Não-Floresta. Portanto as novas classes ficaram reagrupadas como: (1) Floresta, (2) Agricultura anual, (3) Vegetação secundária, (4) Reflorestamento, (5) Pasto, (6) Outros, (7) Não-Floresta, (8) Área não observada e (9) Desflorestamento.

Para o presente trabalho foram usadas apenas as classes de Floresta (52%), Vegetação

secundária (8%), Pasto (10%), Não-Floresta (26%) e Desflorestamento (0,2%), que juntas representam 96,2% da área de estudo. A classe Desflorestamento apresenta menos do 1% da área, no entanto essa cobertura é de grande importância na análise para a determinação do impacto das queimadas, dada a associação entre estes dois processos.

Para a realização da álgebra de mapas utilizando as informações de queimadas e das coberturas da terra, o pixel de 30 m dessa última camada foi reamostrado para 250 m, aplicando o algoritmo de vizinho mais próximo.

2.2.3 Biomassa

O dado de biomassa utilizado neste estudo foi produzido por Saatchi *et al.* (2011). Este dado representa a biomassa viva acima do solo (AGB - *Aboveground biomass*) para o ano de 2000, com cobertura global e uma resolução espacial de 1 km. Esse dado contém o mapeamento total do estoque de carbono de biomassa viva acima do solo (AGB), mediante uma combinação de dados de parcelas *in situ*, informação sobre a estrutura das florestas provenientes de um sensor LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e imagens óticas e micro-ondas.

Este dado foi reamostrado de 1km para 250 m de resolução espacial, utilizando-se o algoritmo vizinho mais próximo. Posteriormente, este mapa foi utilizado para realizar sua intersecção com os mapas de queimadas e uso e cobertura da terra.

Como o dado de biomassa foi elaborado para o ano de 2000, valores inconsistentes de biomassa são esperados nas classes analisadas para os anos de 2010 e 2012. Isto se deve a possível transição entre as classes durante o intervalo entre a aquisição do dado de biomassa e os dados de cobertura e uso da terra. Portanto, para minimizar as possíveis inconsistências nos dados, o dado da biomassa foi filtrado baseado na estatística do valor z o qual foi calculado fazendo a subtração do valor mapeado de biomassa (B) para cada classe de cobertura, pelo valor médio (X) de AGB da classe e dividindo pelo desvio padrão (σ^2) da classe (Equação 1).

$$Z = \frac{B-X}{\sigma^2} \quad (1)$$

A filtragem foi feita para cada cobertura, portanto para floresta se $z < -1$, o valor de biomassa foi substituído pelo valor médio. Similarmente, para as coberturas de Pasto, Não floresta e Desflorestamento, se o valor $z > 1$, atribuiu-se a média da biomassa dessas coberturas. No entanto, para Vegetação secundária, utilizou-se um limiar entre $[-1$ e $1]$, os valores fora desse limiar eram substituídos pela média da biomassa para essa cobertura.

Finalmente, realizou-se uma estimativa de quanto dessa biomassa afetada pelo fogo foi emitida na forma de carbono para a atmosfera. Esse valor foi obtido aplicando a metodologia proposta por Alencar *et al.* (2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia proposta permitiu uma análise compreensiva do impacto do fogo sobre a vegetação amazônica durante a seca de 2010. Nesta seção foram descritos e discutidos os resultados sobre a área queimada, o tamanho e a frequência das cicatrizes de fogo. Avaliamos também a contribuição de cada Estado estudado para o total de queimadas. Consideramos também as mudanças do uso da terra ocorridas no período de estudo e por fim apresentamos uma quantificação da biomassa afetada pelo fogo.

3.1 Quantificação da área queimada para os anos de 2010 e 2012

O ano de 2010 apresentou 47.502 km² (34%) a mais em área total queimada do que o ano base de 2012. Os tipos de uso e cobertura do solo mais afetados pelo fogo foram as classes Não-Floresta (2010= 69.864 km², 2012=38.793 km²) e Floresta (2010= 9.285 km², 2012= 2.824 km²).

As áreas queimadas nestas duas classes de cobertura contribuíram respectivamente com 3,9% e 0,5% da área total de estudo para o ano 2010, e com 2,2% e 0,2% para o ano 2012 (Figura 2a).

É importante destacar que os três estados analisados, contém 26% de suas áreas na classe Não-Floresta, que corresponde em sua maioria ao bioma Cerrado (72% = 335.404 km²) (LAPIG, 2015). Este bioma apresenta vegetação de porte baixo, com estação seca prolongada (COUTINHO 1990; MISTRY 1998). Devido

a estas características, a combustão do material orgânico torna-se facilitada pelas condições microclimáticas.

Em 2010, notou-se claramente que devido à influência de oscilações climáticas extremas durante a estação seca nesta região amazônica (julho a setembro) (LEWIS *et al.*, 2011), a ocorrência de queimadas e incêndios nas áreas de Cerrado foi amplificada. Além disso, também foram afetadas áreas extensas (9.285 km²) da classe Floresta Primária. Isto indica que durante períodos de secas extremas as queimadas utilizadas para o manejo das áreas de pastagens tendem a adentrar as áreas florestadas se transformando em incêndios (ARAGÃO & SHIMABUKURO, 2010).

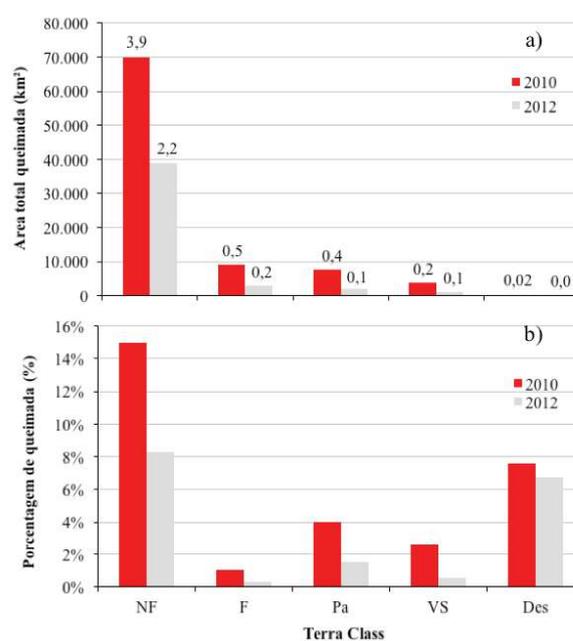


Fig. 2 - a) Área total queimada por cobertura. Os valores sobrepostos as barras indicam a porcentagem de área queimada em cada cobertura da terra em relação a área total de estudo, b) Porcentagem de área queimada em relação a área total de cada cobertura da terra. NF: Não Floresta, F: Floresta primária, Pa: Pasto, VS: Vegetação secundária, Des: Desflorestamento.

Cerca de 15% (69.864 km²) da área total da classe Não-Floresta, presente na área de estudo, foi afetada por queimadas em 2010. Este valor diminuiu para 8,3% (38.793 km²) no ano de 2012, quando não foram observadas anomalias de chuva na região. A classe Vegetação Secundária queimou 2,6% (3.650 km²) em 2010 e 0,5% (989 km²) em 2012 (Figura 2b).

Aproximadamente 1% (9.285 km²) da classe Floresta Primária foi afetada pelo fogo em 2010, com uma redução para 0,3% (2.824 km²) no ano de 2012. As queimadas na classe Floresta Primária em 2010 afetaram 7.621 km² no estado do Pará, 1.078 km² no Maranhão e 585 km² no Tocantins. Os resultados obtidos por Shimabukuro *et al.*, (2009), no ano de 2005, um ano de seca extrema no oeste da Amazônia, demonstram um total de 2.800 km² de Florestas Primárias queimadas e 3.700 km² de áreas previamente desmatadas impactadas pelo fogo no estado de Acre.

Fato interessante demonstrado neste estudo foi que as classes de Pastagem e Desflorestamento, onde normalmente são evidenciadas as maiores incidências de queimada, não apresentaram valores dominantes de área queimada na região estudada. O desflorestamento contribuiu com 4.200 km² (7,6% da área desflorestada) e 2.002 km² (6,7% da área desflorestada) em 2010 e 2012, respectivamente. Similarmente, evidenciou-se um incremento na área queimada sobre pastagens em 2010 (4,0%) em relação a 2012 (1,5%).

Os incêndios de 2010 impactaram um total de 46.095 km² a mais do que o observado em 2012. Deste total, o efeito da seca de 2010 causou um aumento em relação a 2012 de 22,94%, 4,77% e 1,96% na área queimada nas classes Não-Floresta, Floresta Primária e Vegetação Secundária, respectivamente.

Os resultados do presente estudo também demonstraram que entre 2010 e 2012, 24.096 km² ou aproximadamente 18% das áreas impactadas pelo fogo sofreram reincidência de queimadas. Nesse caso, a classe de cobertura Não Floresta apresentou a maior reincidência, em relação as demais classes, com 16% das cicatrizes mapeadas em 2010 sendo novamente afetadas pelo fogo em 2012. A classe Pastagem apresentou uma reincidência de queimadas em 2,5%, seguida pela classe Floresta Primária com 0,69% e Vegetação Secundária com 0,11%.

Um dos principais efeitos negativos das queimadas na Amazônia consiste na degradação florestal por consecutivas queimadas (BALCH *et al.* 2011; BARLOW & PERES, 2008). A reincidência das queimadas incrementa a mortalidade das árvores e lianas (morte imediata das árvores de diâmetros menores e morte com

o decorrer dos anos das árvores de maiores diâmetros) (BALCH *et al.* 2011), modificando a composição da floresta primária. Isto favorece, especialmente na borda dos fragmentos, o estabelecimento de espécies mais suscetíveis a queima, que por sua vez podem aumentar a susceptibilidade destas áreas a queimadas futuras e mais intensas (BRANDO *et al.* 2014; BARLOW & PERES, 2008).

Fato interessante observado neste estudo, foi que o desflorestamento, contribuiu com cerca de 0,01% das áreas queimadas mapeadas no estudo. Este resultado refletiu a diminuição das taxas de desmatamento ocorrida entre 2008 e 2014 (Figura 3 - PRODES - INPE, 2015). Apesar das condições extremas de seca em 2005 e 2010 terem sido parecidas, as áreas afetadas por queimadas em 2010 parece ter sido maior, apesar deste ano ter apresentado taxas de desmatamento menores que 2005 (2.561 km²/ano a menos). Estes resultados indicam que as queimadas, ao contrário do que foi proposto anteriormente (ARAGÃO *et al.* 2008), parecem estar sendo desacopladas dos padrões de desmatamento nesta região.

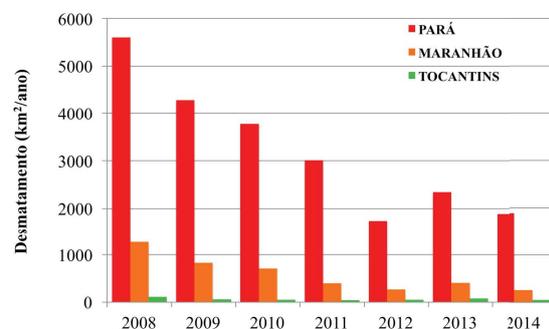


Fig. 3 - Histórico de desflorestamento na área de estudo desde ano 2008 até 2013.

3.2 Tamanho e frequência das cicatrizes

Para a determinação da frequência de tamanho das cicatrizes foram estabelecidas quatorze classes. A primeira classe correspondeu a um intervalo de 0,1 - 1 km², as seguintes classes foram subdivididas em intervalos de 10 km² até 100 km², as classes seguintes foram divididas em um intervalo de 100 a 500 km², e a outra de 500 a 1000 km². Finalmente, cicatrizes com área maior que 1000 km² foram agrupadas em uma única classe. Com os tamanhos de área estabelecidos, demonstrou-se que a maioria das

cicatrizes, em ambos os anos e nas diferentes coberturas, ocorreram, preferencialmente, nas primeiras classes de 0.1 - 1 km² (~80%), exceto

na cobertura de Não-Floresta, onde as cicatrizes foram distribuídas entre 0 e 10 km² de forma mais homogênea (Figura 4).

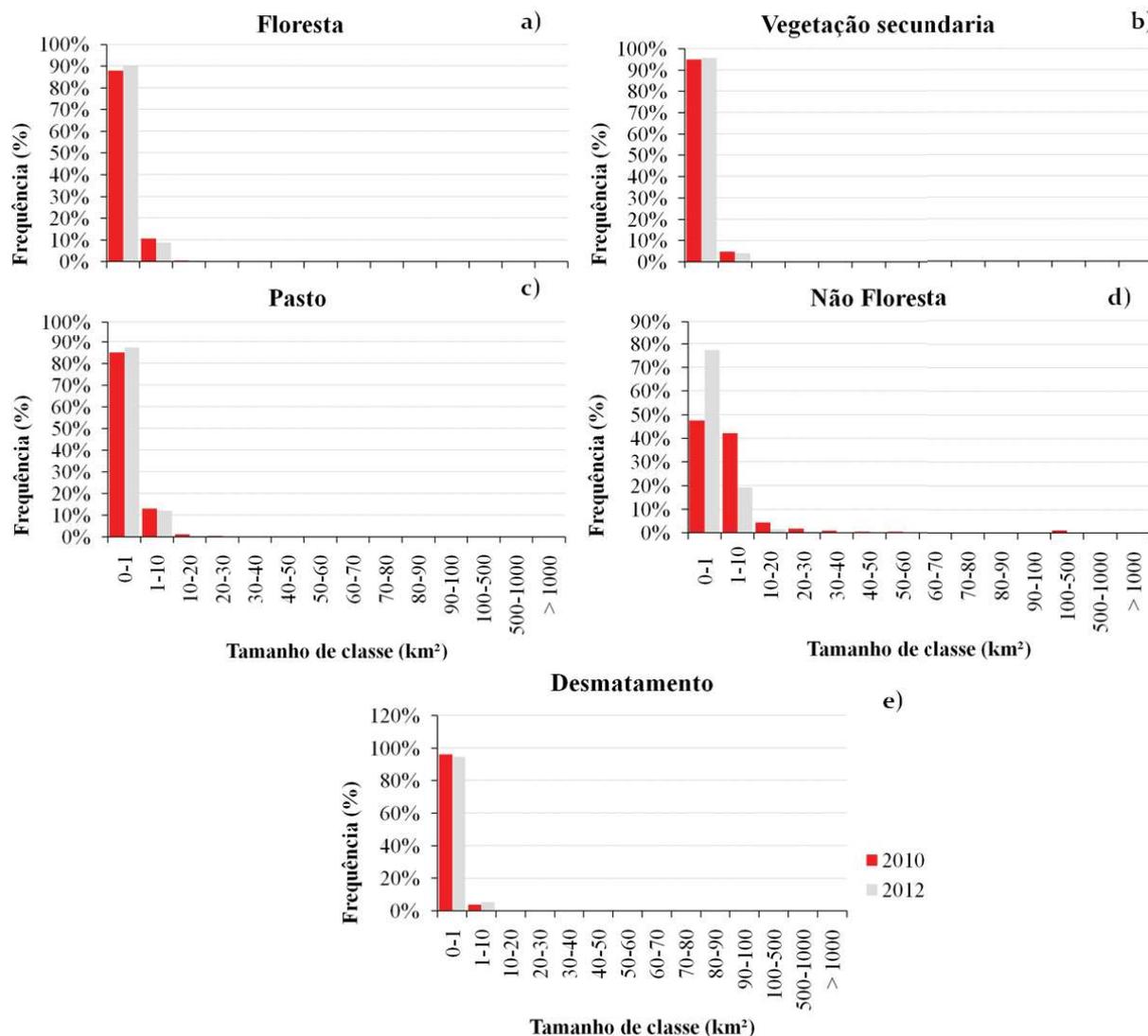


Fig. 4 - Frequência das cicatrizes de queimada para cada classe de tamanho das diferentes coberturas e uso da terra.

Para cada intervalo de classe determinouse a área das cicatrizes para, posteriormente, entender quais dessas classes aportam o maior impacto relacionado à área total afetada por queimadas na região estudada. Os resultados desta análise demonstraram que apesar da maioria das cicatrizes terem sido registradas nas primeiras classes de tamanho, as cicatrizes com maiores áreas foram as que aportaram o maior impacto para a área total queimada nos dois anos analisados, principalmente nas classes Floresta Primária, Não-Floresta e Pasto. No entanto, no ano de 2010 foram registradas as cicatrizes com maior extensão, especificamente nas coberturas

de Não-Floresta e Floresta Primária. O impacto do fogo na classe Vegetação Secundária, contrariamente, tendeu a ser dominado por cicatrizes menores (Figura 5).

3.4 Comportamento das queimadas por estado

Para os dois anos analisados, o estado do Tocantins apresentou a maior área queimada (Figura 6). A cobertura de Não-Floresta foi a mais afetada pelas queimadas nos três estados. Contudo, no Tocantins o impacto foi extremo com 40.000 km² e 20.000 km² da classe Não-Floresta queimada em 2010 e 2012, respectivamente. Estes

valores de área queimada correspondem a 16,01% (2010) e 8,12% (2012) da extensão total desta classe no estado. O Maranhão apresentou um comportamento similar para a classe Não-Floresta nos dois anos. Já no estado do Pará as queimadas de 2010 dominaram não só a classe Não-Floresta como também atingiram, equivalentemente, as classes Floresta Primária e Pasto (0,79%, 0,61% e 0,56% da área das classes, respectivamente). Em 2012 as queimadas afetaram uma menor extensão de área no Pará. A classe que sofreu maior impacto foi a Não-Floresta (1,20%). Contudo, em comparação com os outros dois estados a área absoluta queimada foi relativamente menor. Em anos normais (ex. 2012) os estados do Tocantins e Maranhão, apresentaram uma extensão maior de queimadas em relação ao estado do Pará. Este padrão está relacionado com a extensão das áreas de Não-Floresta presentes nos dois primeiros

estados, que são mais susceptíveis ao fogo. No entanto, o estado do Pará torna-se vulnerável as queimadas durante os anos de seca extrema.

De forma global, observou-se que a cobertura de Não-Floresta, foi a cobertura mais impactada pelo fogo. Este resultado indica que nesta região de transição dos biomas Amazônia e Cerrado, os esforços de monitoramento e prevenção de queimadas devem ser dirigidos, prioritariamente, para esta classe de cobertura da terra, visando minimizar a pressão antrópica sobre estas áreas. No entanto, os impactos observados na classe Floresta Primária e Floresta Secundária, principalmente, no estado do Pará, evidenciam que durante secas extremas o fogo pode incursionar para áreas de florestas mais úmidas na direção do bioma Amazônia. Portanto, a legislação deve também contemplar essas duas classes de cobertura florestal para elaborar estratégias eficazes de mitigação de queimadas.

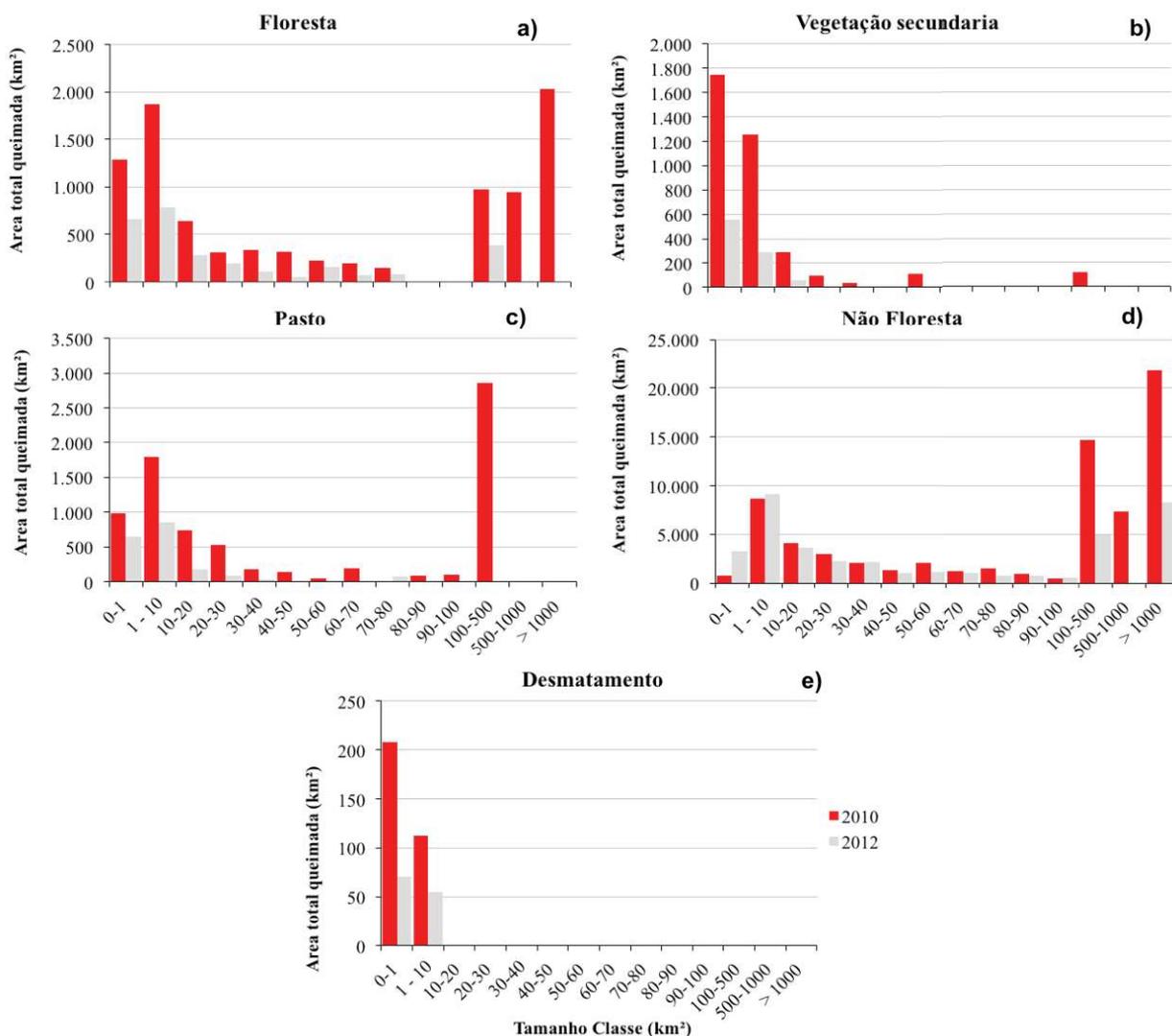


Fig. 5 - Área das cicatrizes para as classes de tamanho para cada uso e cobertura da terra.

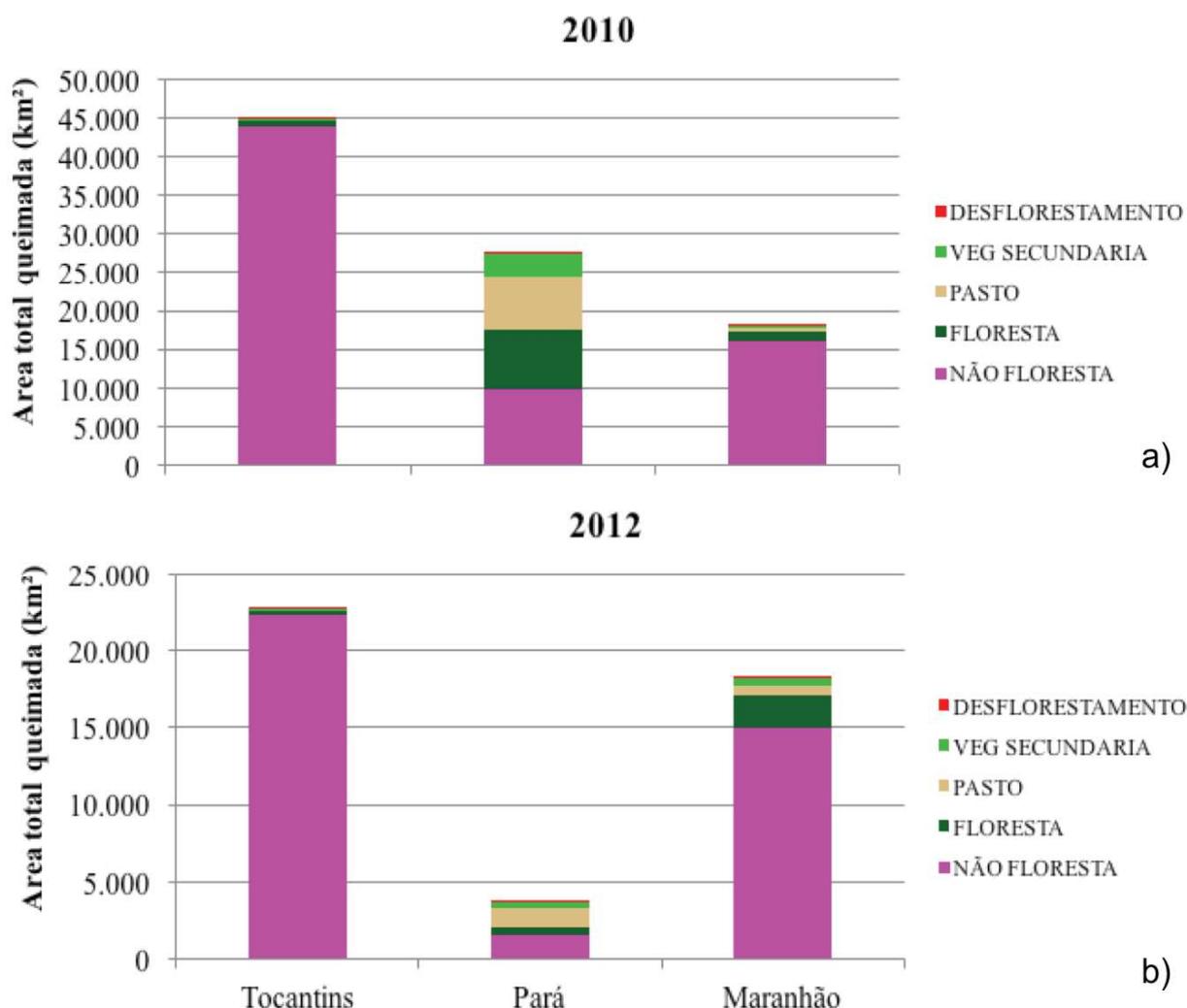


Fig. 6 - a) Queimadas por estado em 2010, valores absolutos de área queimada com escala até 50.000 km². b) Queimadas por estado em 2012, com valores absolutos de área queimada com escala até 25.000 km².

Tabela 1: Mudanças das coberturas queimadas entre os anos de 2010 e 2012

Mudança 2010 - 2012		2012									
		Floresta primária		Vegetação secundária		Pasto		Não-Floresta		Desflorestamento	
2010	Floresta primária	7804,541	84,06%	305,775	3,29%	645,718	6,95%	324,8	3,50%	147,991	1,61%
	Vegetação secundária	326,791	8,95%	1223,373	33,51%	1908,670	52,29%	42,3	1,16%	11,246	0,31%
	Pasto	310,719	0,47%	564,426	7,38%	6548,447	85,66%	48,0	0,63%	10,190	0,13%
	Não-Floresta	327,528	0,47%	36,233	0,05%	86,852	0,12%	69389,6	99,33%	1,811	0,0026%

*As células em cinza claro são os valores de não mudança entre 2010 e 2012 para cada cobertura da terra, as células cinza escuro são as mudanças inconsistentes.

3.4 Mudanças das coberturas queimadas entre 2010 e 2012

Na Tabela 1, são apresentadas as mudanças das coberturas queimadas de 2010 para 2012. Os resultados demonstraram que 84% da

classe Floresta Primária queimada em 2010, permaneceram classificadas como Floresta nos dados TerraClass de 2012. Somente 33,51% da área de vegetação secundária queimada, manteve-se na mesma classe, enquanto 52,29% desta classe foi alterada para a classe pastagem.

Nesta análise foram observadas incertezas provavelmente derivadas da técnica de reamostragem, utilizando o algoritmo do vizinho mais próximo, adotada neste estudo para padronizar as diferentes resoluções espaciais dos mapas. Por exemplo, o mapa do produto TerraClass foi reamostrado de sua resolução espacial original (30 m) para 250 m gerando possíveis erros, como perda ou generalização de informação, já que essa técnica determina distâncias dos centroides dos pixels, e os agrupa dependendo das distâncias calculadas. Porém, este algoritmo gera generalizações das entidades, determinando, por exemplo, que um pixel que inicialmente era Vegetação Secundária, fosse classificado como Floresta, incrementando os erros nas mudanças das coberturas. Este erro que é perceptível na Tabela 1 deve ser considerado como um resíduo do mapeamento. Este é representado por mudanças inconsistentes e não podem ser considerados para a presente análise. Neste contexto, destacam-se as mudanças para Floresta Primária: Vegetação Secundária – Floresta Primária (8,95%), Pastagem – Floresta Primária (0,47%), Não-Floresta – Floresta Primária (0,47%). Para Não-Floresta: Floresta – Não-Floresta (3,50%), Vegetação Secundária - Não-Floresta (1,16%), Pasto – Não-Floresta (0,63%). Mudanças para Desflorestamento: Vegetação Secundária - Desflorestamento (0,31%), Pasto - Desflorestamento (0,13%) e Não-Floresta – Desflorestamento. Finalmente, outras mudanças inconsistentes como Não-Floresta para Vegetação secundaria (0,05%) e Não-Floresta para Pasto (0,12%) também foram observadas. Estes resíduos correspondem a 16% da área analisada.

3.5 Quantificação da biomassa afetada pelo fogo

Devido a mistura de classes dentro do pixel de 1km de resolução, disponível para os dados de biomassa viva acima do solo, os valores de biomassa de cada pixel queimado dentro de cada classe foram filtrados (processo descrito na seção 2.1.3). A Figura 7 apresenta o conteúdo de biomassa média ($Mg\ ha^{-1}$) por classe afetada pelo fogo para os anos 2010 e 2012 baseado no mapeamento de Saatchi *et al.* (2011). Os resultados indicam um comportamento esperado e consistente para todas as classes de cobertura analisadas nos dois anos.

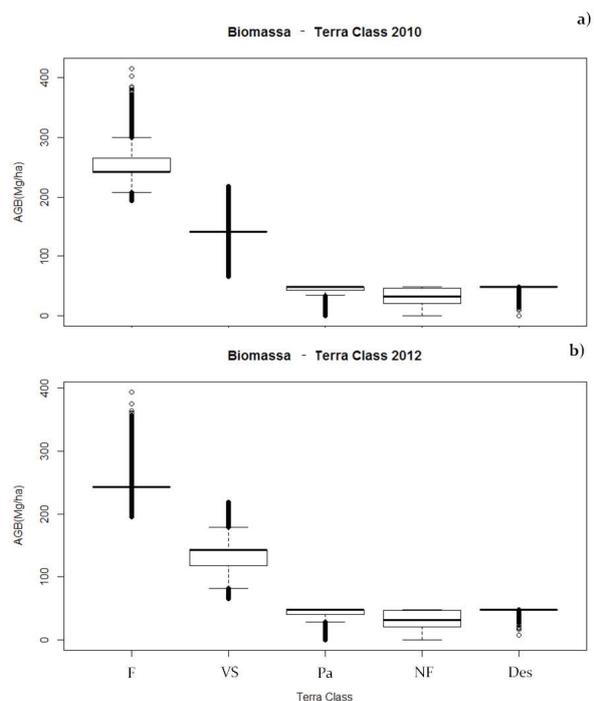


Fig. 7 - Biomassa acima do solo - AGB afetada pelo fogo para 2010 e 2012 em Mg/ha . NF: Não-Floresta, F: Floresta primária, Pa: Pasto, VS: Vegetação secundaria, Des: Desflorestamento.

As classes de Floresta Primária e Secundária apresentaram os maiores valores de carbono estocado refletido nos valores de biomassa aérea com cerca de $243\ Mg\ ha^{-1}$ e $143\ Mg\ ha^{-1}$ respectivamente. Esses valores de biomassa são comparáveis aos reportados por Berenguer *et al.* (2014), onde foi obtido para os Municípios de Paragominas e Santarém – Pará, valores de carbono total estocado em Floresta Primária de $204,82\ Mg\ C\ ha^{-1}$ e $187,11\ Mg\ C\ ha^{-1}$, respectivamente e para Floresta Secundária de $49,68\ Mg\ C\ ha^{-1}$ em Paragominas e $60,52\ Mg\ C\ ha^{-1}$ para Santarém. Assim, os valores de biomassa estão na faixa de $300\ Mg\ ha^{-1}$ para Floresta Primária e $100\ Mg\ ha^{-1}$ para Floresta secundária.

As outras classes de cobertura com porte baixo ou herbáceo, como Não-Floresta, Pastagem e Desflorestamento apresentaram valores de biomassa médios de $48,5\ Mg\ ha^{-1}$.

Para determinar quanto da biomassa florestal pode ter sido emitida devido as queimadas de 2010 e 2012, utilizou-se a relação proposta por Alencar *et al.* (2006). Nesta estimativa, assumiu-se que uma proporção entre 10% e 50% do carbono contido na biomassa aérea pode ser emitido devido ao impacto da queima.

Neste estudo, utilizamos como referência o ano de 2012, caracterizado pela ausência de anomalias climáticas e o ano de 2010 como um ano de seca, com anomalias climáticas bem estabelecidas na literatura. Utilizando a premissa proposta por Alencar *et al* (2006) estimamos que para as florestas primárias da área de estudo, os valores de carbono comprometido pelo fogo estão entre 0,01 - 0,056 Pg para o ano de 2010. Para florestas secundárias os valores de emissão comprometida de carbono foram menores entre 0,00014 e 0,0035 Pg de C. Já para o ano de 2012 os valores de biomassa morta, estimados com a metodologia acima, são menores que em 2010, sendo estes de 0,0068 até 0,034 Pg para Floresta, o equivalente a 0,0034 até 0,0172 Pg C, e para vegetação secundária entre 0,00014 até 0,007 Pg, com uma emissão comprometida entre 0,00007 e 0,0035 Pg C. Essas emissões dependem da decomposição das árvores afetadas e futura combustão das mesmas, caso haja reincidência de queimadas nessas áreas nos anos seguintes (ALENCAR *et al.* 2006).

De forma geral, o impacto das queimadas nos estoques de carbono da região estudada durante a seca de 2010 foi consideravelmente maior que durante anos normais (Figura 8). Torna-se importante destacar que a biomassa das classes Não-Floresta, Floresta Primária e Secundária possuem os maiores valores acumulados e afetados pelas queimadas.

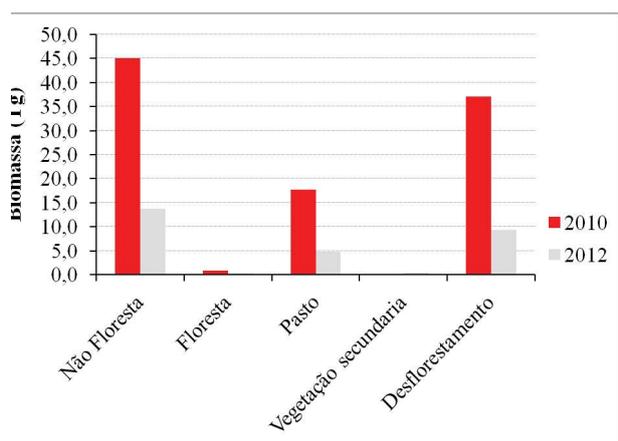


Fig. 8 - Biomassa afetada nas áreas queimadas para cada classe de cobertura em 2010 e 2012.

CONCLUSÕES

A seca de 2010 influenciou diretamente no incremento dos eventos de queimadas na Amazônia, causando impacto na vegetação

natural. O ano de 2010 apresentou um número alarmante de áreas afetadas pelo fogo nas diversas coberturas analisadas. Porém, mesmo em 2012, que foi um ano considerado “normal” em relação às anomalias climáticas, queimadas foram observadas em todas as coberturas de uso da terra analisadas.

Para os dois anos analisados, ficou evidente que as coberturas mais afetadas foram Não-Floresta, Floresta e Vegetação Secundária. A classe Não-Floresta, é caracterizada pela cobertura do bioma Cerrado, que como esperado, devido ao clima mais seco e antropização tem maior probabilidade de queimar. Já nas coberturas de Floresta Primária e Secundária, pode-se inferir que estas foram afetadas pelo fogo, sem controle, provenientes de áreas manejadas com queimadas. Estas queimadas tendem a atingir principalmente as bordas das florestas primárias e fragmentos de floresta secundária. Como consequência estas áreas tornam-se degradadas.

Demonstrou-se que o Tocantins (nos dois anos) foi o estado com maior área queimada, principalmente na classe de Não-Floresta. Contudo, as maiores extensões de Floresta Primária e Secundária afetadas pelo fogo concentraram-se no estado do Pará em 2010. Já em 2012, as maiores extensões de área queimada nestas classes foram mapeadas no estado do Maranhão.

Verificou-se que a problemática das queimadas na região leste da Amazônia Legal brasileira relaciona-se com coberturas de uso da terra que utilizam o fogo para sua manutenção.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece a bolsa cedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio (385980/2014-0). Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento do projeto 458022/2013-6 e a NASA-IDS projeto NNX14AD31G. O segundo autor agradece a bolsa Produtividade em Pesquisa do CNPq (305054/2016-3)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, A.; NEPSTAD, D. C.; VERADIAZ, M. C. Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO & non-ENSO Years: area burned and committed carbon emissions. **Earth**

Interactions 10(6), 1–17, 2006.

ANDERE, L.; ANDERSON, L. O.; DUARTE, V.; ARAI, E.; ARAGÃO, J. R. L.; ARAGÃO, L. E. O. C. Dados multitemporais do sensor MODIS para o mapeamento de queimadas na Amazônia. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 17. (SBSR), João Pessoa. Anais. São José dos Campos: INPE, 3534-3541, 2015. Internet. ISBN 978-85-17-0076-8. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP6W34M/3JM4BQA>>. 2015.

ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; de, LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazônica** 35, 445–456, 2005.

ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; GLOOR, M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SAATCHI, S.; MALHI, Y.; SHIMABUKURO, Y.; BARLOW, J. B.; BERENQUER, E.; DUARTE, V. Disentangling the contribution of multiple land covers to fire-mediated carbon emissions in Amazonia during the 2010 drought. **Global Biogeochemical Cycles**, 28, doi:10.1002/2014GB005008, 2015 a.

ANDERSON, L. O.; CHEEK, D.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERE, L.; DUARTE, B.; SALAZAR, N.; LIMA, A.; DUARTE, V.; ARAI, E. Development of a Point-based method for Map Validation and Confidence Interval Estimation: A case study of Burned Areas in Amazonia. **Journal of Remote Sensing and GIS**, 6(193), 1-9, 2017, doi: 10.4172/2469-4134.1000193, 2017.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, 34. L07701, 2007.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; SAATCHI, S.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L. O.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions of the**

Royal Society B, 363(1498), 1779-1785, 2008.

ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E. The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD. **Science**, 328(5983), 1275-1278, 2010.

ARAGÃO, L.E.O.C.; POULTER, B.; BARLOW, J.B.; ANDERSON, L.; MALHI, Y.; SAATCHI, S.; PHILLIPS, O.L.; GLOOR, E. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, 89, 913–931, 2014.

BALCH, J.K.; NEPSTAD, D.C.; M CURRAN, L.; BRANDO, P.M.; PORTELA, O.; GUILHERME, P.; REUNING-SCHERERA, J.D.; DE CARVALHO Jr, O. Size, species, and fire behavior predict tree and liana mortality from experimental burns in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, 261, 68–77. 2011.

BARLOW, J.; PERES, C. A. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, 363, 1787–1794, doi: 10.1098/rstb.2007.0013, 2008.

BERENQUER, E.; FERREIRA, J.; GARDNER, T.A.; ARAGÃO, L.E.O.C.; DE CAMARG, P.B.; CERRI, C.E.; DURIGAN, M.; DE OLIVEIRA Jr, R.C.; VIEIRA, I.C.G.; BARLOW, J. A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. **Global Change Biology**, 20, 3713–3726, doi: 10.1111/gcb.12627, 2014.

BRANDO, P. M.; BALCH, J. K.; NEPSTAD, D. C.; MORTON, D. C.; PUTZ, F. E.; COE, M. T.; SILVÉRIO, D.; MACEDO, M. N.; DAVIDSON, E.A.; NÓBREGA, C. C.; ALENCARA, A.; SOARES-FILHO, B. S. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 111(17), 6347-6352 2014.

BROADBENT, E. N.; ASNER, G. P.; KELLER, M.; KNAPP, D. E.; OLIVEIRA, P. J. C.; SILVA, J. N. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. **Biological Conservation**, 141(7), 1745–1757, 2008.

- COCHRANE, M. A.; SCHULZE, M. D. Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: effects on forest structure, biomass, and species composition. **Biotropica**, 31(1), 2–16, 1999.
- COUTINHO, L. M. Fire in the Ecology of the Brazilian Cerrado. In Goldammer, J.G., editor, **Fire in the tropical biota**, Berlin: Springer-Verlag, 82-105, 1990.
- COUTINHO, A. C., ALMEIDA, C., VENTURIERI, A., MORA ESQUERDO, J. C. D., SILVA, M. **Uso e cobertura da terra nas áreas desflorestadas da Amazônia Legal TerraClass 2008**. ISBN 978-85-7035-180-7. – Brasília, DF : Embrapa ; Belém : INPE, 2013.
- DIAZ, V. M. C.; NEPSTAD, D.; DE MENDOÇA, C., M. J.; DA MOTTA, R. S.; ALENCAR, A.; GOMES, J. C.; ORTIZ, R. O Prejuízo Oculto do Fogo: Custos Econômicos das Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia. **Relatório do Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM) em colaboração com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e o Centro de Pesquisa Woods Hole (WHRC)**. Versão setembro de 2002. Disponível em: http://queimadas.cptec.inpe.br/~rqueimadas/material3os/Preju_fogo.pdf
- GATTI, L. V.; GLOOR, M.; MILLER, J. B.; DOUGHTY, C. E.; MALHI, Y.; DOMINGUES, L. G.; BASSO, L. S.; MARTINEWSKI, A.; CORREIA, C. S. C.; BORGES, V. F.; FREITAS, S.; BRAZ, R.; ANDRESON, L. O.; ROCHA, H.; GRACE, J.; PHILLIPS, O. L.; LLOYD, J. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature**, 506, 76-80, doi:10.1038/nature12957, 2014.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (2010 e 2012). **Projeto Terra Class: Levantamento de informações de uso e cobertura da terra na Amazônia**. 2015a Disponível em: http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2010.php, http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2012.php.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (2008 até 2014). **Projeto PRODES: Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira**, 2015b, Disponível em: http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2014.htm, <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>
- LEWIS, S. L.; BRANDO P. M.; PHILLIPS, O. L.; VAN DER HEIJDEN, G. M. F.; NEPSTAD, D. The 2010 Amazon drought. **Science**, 331(6017), 554, doi:10.1126/science.1200807. 2011.
- LAPIG (Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento) da Universidade Federal de Goiás (UFG) (baseado em dados do CSR-IBAMA-MMA 2009) **Mapa Biomass do Brasil**, <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>
- LIMA, A.; SILVA, T. S. F.; ARAGÃO, L. E. O. C.; DE FEITAS, R. M.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Land use and land cover changes determine the spatial relationship between fire and deforestation in the Brazilian Amazon. **Applied Geography**, 34, 239-246. 2012.
- LIMA, A. **Influência da Cobertura da Terra na Extensão e Configuração Espacial de Áreas Queimadas em Anos de Seca Extrema na Amazônia Oriental**. 2013. 110 p. (sid. inpe.br/mtc-m19/2013/03.08.16.30-TDI). Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2013.
- MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, 38, L12703, doi:10.1029/2011GL047436, 2011.
- MISTRY, J. Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. **Progress in Physical Geography**, 22(4), 425-448, 1998.
- SAATCHI, S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E.; SALAS, W.; ZUTTA, B. R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S.; HAGEN, S.; PETROVA, P.; 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**, 108(24), 9899-9904, 2011.
- SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; FREITAR, R. M.; LIMA, A.; VALERIANO, D. M.; BROWN, I. F.; MALDONADO, M. L. R. Fraction images derived from Terra MODIS data

for mapping burned areas in Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, 30(6), 1537–1546. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802509058>, 2009.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.;

GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO, A. F.; JR. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 6(11), 3423–3441, 2006.