

Estudo da associação espacial entre áreas queimadas e desmatamento na Amazônia Oriental, Estado do Pará

Veronika Leitold¹
André Lima¹
Yosio Edemir Shimabukuro¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{vleitold; andre; yosio}@dsr.inpe.br

Abstract. There is ample evidence showing an association between burning and deforestation within the process of land use and land cover changes in the Amazon region, however, there are few studies examining the structure and spatial association between these events. A study by Lima et al. (2012) showed – through the use of spatial analysis techniques – the existence of an association between deforestation and burning in the western Amazon. However, approximately 55% of the burned area had no relation to deforestation of mature forest, leading to several hypotheses about the sources of fuel burned in these fires (i.e.: perhaps renovation of pastures, deforestation of regenerated areas, or other sources?). This study aims to examine whether these associations between burning and deforestation can also be established in the eastern Amazon, with focus on the state of Pará. For this purpose, we use burn scar data for the year 2010 obtained from the sensor Landsat/TM-5, deforestation maps produced by PRODES (deforestation up to 2010) and maps of land cover produced by the TerraClass project. The knowledge obtained from these analyses has implications for the emission of greenhouse gases from burning of forest biomass, as well as for efforts to mitigate climate change, such as REDD (“Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation”) and other related policies.

Palavras-chave: fire, deforestation, spatial analysis, Amazon Forest, REDD, queimada, desmatamento, análise espacial, Floresta Amazônica, REDD.

1. Introdução

Sendo a maior floresta tropical do mundo, a Floresta Amazônica tem um papel crítico nos ciclos biogeoquímicos globais, bem como na regulação do sistema climático global e na conservação de uma alta biodiversidade. No entanto, existem diversas ações antrópicas que põem em perigo vastas áreas desta floresta, como o desmatamento, a fragmentação de hábitat, o corte seletivo e as queimadas. Este cenário torna-se ainda mais alarmante com previsões de aumento de eventos de secas extremas na região amazônica nas próximas décadas, o quê, combinado com as ameaças antrópicas previamente mencionadas, pode intensificar as ocorrências de queimadas na área.

Enquanto as taxas de perda de floresta na Amazônia brasileira têm diminuído desde 2004, a incidência de fogo está aumentando na região. Em um estudo recente realizado por Aragão e Shimabukuro (2010), os autores analisaram dados de desmatamento obtidos por satélite e dados de incêndio na Amazônia brasileira para entender a influência do plano da Organização das Nações Unidas (ONU) para reduzir as emissões de gases de efeito estufa por desmatamento e degradação (REDD) sobre os padrões de fogo na floresta Amazônica. Os resultados indicam que as taxas de ocorrência de incêndio na Amazônia aumentaram em 59% em áreas com desmatamento reduzido, prejudicando assim parte dos créditos de carbono obtidos por meio de medidas REDD.

Há ampla evidência de que existe uma associação entre queimadas e o desmatamento dentro do processo de uso e mudanças de cobertura da terra na Amazônia (SORRENSEN, 2004; BOWMAN et al., 2008; MORTON et al., 2008). O uso de fogo é uma prática comum para manejar a terra nesta região, inclusive para limpar a vegetação em preparação para agricultura intensiva e pecuária (SORRENSEN, 2000). Os agricultores da região tendem a manter a terra agrícola fértil e livre de regeneração utilizando a técnica de *slash and burn*, geralmente em um ciclo de 3 a 5 anos. Incêndios são naturalmente raros na Amazônia, porém,

esses fogos antrópicos são propensos a fugir para áreas florestais adjacentes, especialmente durante os meses secos, quando a maioria das queimadas ocorre. O aumento de incêndios resulta em emissões adicionais de dióxido de carbono que não são contabilizadas pelo sistema brasileiro de monitoramento de desmatamento, parcialmente anulando créditos de carbono obtidos por medidas REDD (ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2010). Por conseguinte, é importante caracterizar a extensão e estrutura espacial das áreas de queimada na Amazônia, assim como as fontes de combustível nessas queimadas.

Em estudo conduzido por Lima et al. (2012) na Amazônia Ocidental também mostrou-se, por meio de técnicas de análise espacial, a existência de associação entre desmatamento e queimada. Contudo, próximo de 55% da área queimada não possui relação com desmatamento de floresta madura, trazendo assim diversas hipóteses sobre qual a origem do combustível dessas queimadas (i.e., seria renovação de pastagens, desmatamento de áreas regeneradas, ou outras fontes?). O presente trabalho examina se tais associações entre queimada e desmatamento também podem ser encontradas na Amazônia Oriental, com foco no Estado do Pará. Para esse fim, são utilizados dados de cicatrizes de queimadas de 2010 oriundos de dados do sensor Landsat/TM-5, mapas de desmatamento produzidos pelo projeto PRODES (desmatamento até 2010) e mapas de cobertura da terra do projeto TerraClass (2008). São examinadas também as origens de combustível de queimadas, e as fontes de fogo em florestas maduras em pé. O conhecimento obtido a partir de tais análises tem implicações para emissões de gases do efeito estufa oriundas de queima de biomassa florestal, tanto quanto para os esforços de mitigação de mudanças climáticas e outras políticas relacionadas.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) situa-se no centro do Estado do Pará na Amazônia brasileira oriental, entre 4°53'S, 52°37'O e 6°41'S, 51°15'O, dentro dos limites geográficos dados pela cena 225/64 do sensor Landsat/TM-5. A área é caracterizada por elevada presença de atividade antrópica e altas taxas de desflorestamento.

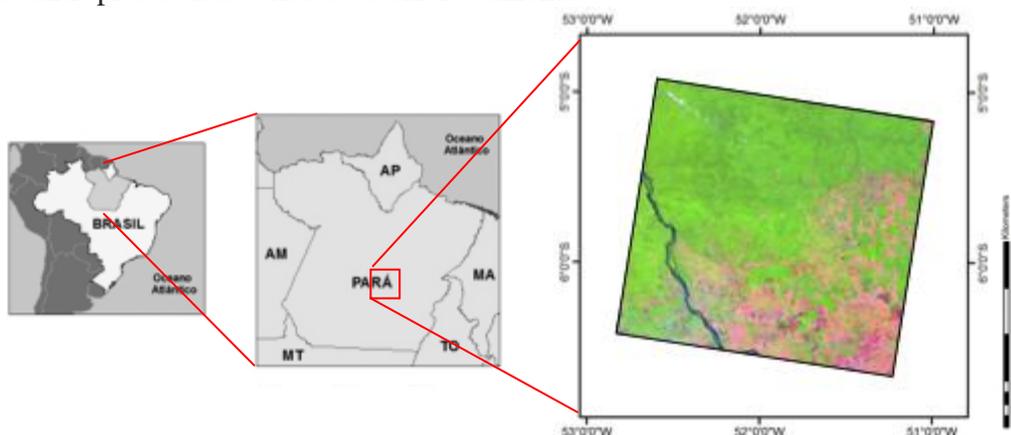


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo, correspondente à Landsat/TM-5 cena 225/64 e situada no centro do Estado do Pará, Amazônia Brasileira.

2.2 Aquisição e processamento de dados

2.2.1 Queimadas

Um conjunto de quatro imagens Landsat/TM-5 foi utilizado no presente trabalho, correspondendo à cena 225/64 no sistema de indexação WRS-2, adquirido entre julho e outubro de 2010. O processamento digital das imagens Landsat/TM-5 para a identificação das cicatrizes de queimadas se baseou na metodologia descrita e aplicada por Lima et al. (2012). As etapas deste procedimento consistiram no uso do Modelo Linear de Mistura Espectral

(MLME), na segmentação das imagens, na classificação não supervisionada por regiões e na edição da classificação.

O MLME foi aplicado no conjunto de bandas espectrais 3 (630 a 690 nm, vermelho), 4 (760 a 900 nm, infravermelho próximo) e 5 (1550 nm a 1750 nm, infravermelho médio) do sensor TM. O intuito deste procedimento foi gerar a fração sombra, que realça os alvos de baixa reflectância – comportamento descrito por áreas queimadas – e reduz o volume de dados analisados.

A classificação das imagens fração-sombra foi feita de forma não-supervisionada, por meio do algoritmo ISOSEG. Por se tratar de um classificador por região se fez necessária a segmentação da imagem fração-sombra, optando-se pelo método de crescimento por regiões a fim de gerar polígonos com níveis digitais homogêneos. No emprego desse segmentador definiram-se dois limiares: a) o limiar de similaridade de nível digital, limiar mínimo abaixo do qual duas regiões são consideradas similares e agrupadas em um único polígono; e b) o limiar de área, valor mínimo de área dado em número de pixels, para que uma região fosse individualizada. Os limiares empregados na segmentação foram 8 para similaridade e 25 para área. Estes limiares foram estipulados com base na complexidade de forma, de dimensão e pela variação dos valores de nível digital apresentados por cicatrizes de queimadas.

Finalizada a segmentação, o passo subsequente foi a criação de um arquivo de contexto, onde foram armazenadas as seguintes informações: a) tipo de classificação por regiões; b) bandas ou imagens utilizadas; e c) imagem segmentada. Em seguida extraíram-se os atributos estatísticos (médias e matrizes de covariância) do conjunto de regiões definido na fase de segmentação. Realizada a extração de regiões aplicou-se o classificador ISOSEG com limiar de aceitação de 75% (SHIMABUKURO et al., 2009).

Após a classificação das imagens, foi feita a rotulação dos agrupamentos de pixels, que consistiu na associação dos agrupamentos supostamente representantes de áreas queimadas a classe de mapeamento cicatrizes de queimadas. Por fim, executou-se a edição manual do mapa gerado automaticamente, esta minimizou os erros de inclusão e omissão inerentes à classificação automática de imagens, assegurando, assim, a confiabilidade do mapeamento.

2.2.2 Desmatamento

Além das imagens Landsat/TM-5, foi obtido um mapa de desflorestamento no site do Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES), mostrado na Figura 2.

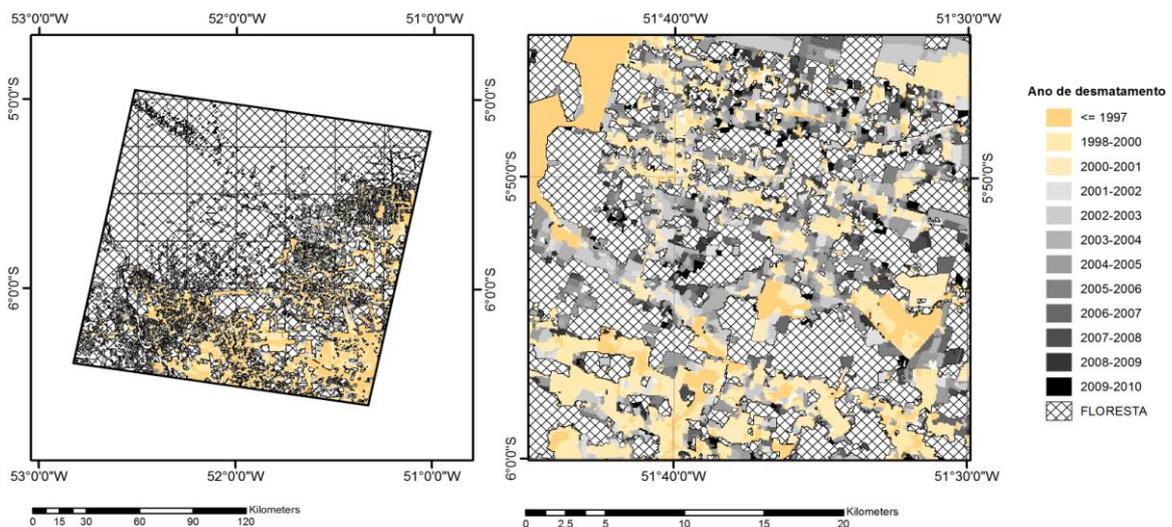


Figura 2. Mapa de desmatamento produzido pelo PRODES, mostrando desmatamento acumulado até 1997, entre 1998 e 2000, e desmatamento anual entre 2001 e 2010. A área corresponde a Landsat/TM cena 225/64, no Estado do Pará.

Como todos os mapas do PRODES, o mapa utilizado no presente estudo foi produzido manualmente por intérpretes experientes, utilizando imagens do Landsat/TM. Foram acessados os dados de desmatamentos ocorridos até 2010, onde discriminam-se as seguintes classes de cobertura de terra: áreas remanescentes da Floresta Amazônica (denominadas aqui como “Floresta”), desmatamento acumulado até o ano 1997, desmatamento acumulado entre 1997 e 2000, e desmatamento anual ocorrido entre 2001 e 2010. Áreas pertencentes a outros tipos de cobertura no mapa de referência (e.g., savana, cerrado, várzea) são coletivamente denominados como "Outros", e o desmatamento não é avaliado para estas áreas. Mais importante ainda, uma vez que uma área tem sido classificada como "Desflorestamento" no mapa, ela não será mais revisitada pelo analista nos anos subsequentes, o que implica que a regeneração da floresta não é avaliada pelo método atual do PRODES.

2.2.3 Uso e cobertura da terra

O terceiro mapa utilizado no presente estudo foi obtido no site do projeto TerraClass. Este projeto teve como objetivo realizar a qualificação das áreas já desflorestadas da Amazônia Legal, e resultou na elaboração de um mapa digital que descreve a situação do uso e da cobertura da terra no ano de 2008. Os dados digitais resultantes do mapeamento a partir de imagens orbitais e dados PRODES encontram-se disponíveis para download recortados pelas respectivas órbitas-ponto do satélite Landsat, assim, para este trabalho foi acessado o mapa correspondendo à cena 225/64.

As classes consideradas para o mapeamento de uso da terra do projeto TerraClass são: vegetação secundária, agricultura, pastagem, mineração, reflorestamento, área urbana e outros usos relacionados às atividades antrópicas, além das classes nuvem e sombra. A classe desflorestamento do ano é classificada como solo exposto, partindo da hipótese de que no ano da retirada da floresta ainda não é possível identificar o uso dado à terra. Além disso, áreas consideradas como “Floresta” pelo PRODES foram excluídas do mapa TerraClass, ainda que nestas áreas também possa existir vegetação secundária, fruto de processos de extração seletiva de madeira, queimadas ou outras fontes de degradação da floresta.

2.3 Análise espacial

2.3.1 Estatística zonal

A análise inicial da área queimada versus área desmatada foi realizada por sobreposição espacial das cicatrizes de queimada em 2010 e os mapas de desmatamento do PRODES, calculando a quantidade de área queimada contido dentro da área que foi deforestada cada ano. Este procedimento também possibilitou datar o período decorrido entre o desmatamento inicial e a ocorrência da queimada. Como as queimadas mais recorrentes ocorrem de três a quatro anos após a atividade de desmatamento inicial, áreas desmatadas foram agrupadas em duas categorias para fins de análise espacial: “desmatamento recente”, correspondendo às áreas mapeadas como desmatamento entre 2008 e 2010, e “desmatamento antigo”, correspondendo a todo o desmatamento mapeado até, e incluso, o ano 2007. Esta categorização teve como objetivo identificar a proporção de áreas queimadas diretamente relacionadas a cada processo de desmatamento (conversão de floresta madura para cultivo e pasto contra queima recorrente de áreas degradadas).

Além disso, para fins de análise espacial, os mapas originais vetoriais foram convertidos em uma grade regular (*fishnet*) com células de 5km x 5km, onde as áreas total de “cicatrizes de queimada”, “desmatamento recente” e “desmatamento antigo” foram calculados para cada célula. Esta transformação foi feita para normalizar o efeito de áreas variáveis de polígonos resultantes do procedimento de mapeamento (e.g., uma única área de queimada pode ser composta de vários polígonos rastreados separadamente durante a digitalização, afetando os

cálculos da vizinhança e área). As relações entre variáveis foram avaliadas através de análise visual dos resultados.

2.3.2 Fontes de combustível e fogo em floresta

Para avaliação e análise da origem de combustível em queimadas que ocorreram em áreas desmatadas até o ano 2007 (classe “desmatamento antigo”), foram consideradas as classes de uso e cobertura da terra conforme o mapa TerraClass. Para estabelecer uma correspondência entre os mapas de queimada e desmatamento (2010) e o mapa de uso e cobertura da terra (2008), o mapa TerraClass foi atualizado com relação ao desmatamento (atualizar o mapa com relação as outras classes de cobertura da terra não foi possível).

Para este fim foram criadas máscaras de “desmatamento em 2009” e “desmatamento em 2010” a partir da utilização de ferramentas de consulta por atributos aplicados ao mapa de desmatamento PRODES. Com uma sobreposição do mapa TerraClass e os dois planos de informação com as classes de desmatamento de interesse, foi obtido o novo mapa de uso e cobertura da terra com a inclusão de desmatamento que ocorreu entre 2008 e 2010. Em seguida, a quantificação de áreas de diferentes classes de uso e cobertura da terra em áreas de “desmatamento antigo” foi realizada por sobreposição espacial das queimadas e o novo mapa “TerraClass 2010”.

Para examinar a questão de fonte de fogo em florestas maduras em pé, foi criada uma máscara utilizando um *buffer* de 500 metros de largura ao redor de áreas de queimada em floresta. Esta máscara foi sobreposta no mapa de uso e cobertura da terra (2010), calculando a quantidade de área queimada contido dentro de cada classe de cobertura ao redor de queimadas em floresta. Todas as operações das análises espaciais foram realizadas no software ArcGIS 10.0.

3. Resultados e Discussão

O mapeamento das cicatrizes de queimada na cena 225/64 para o ano de 2010 estimou uma área de aproximadamente 940 km², ou ~3.4% da área de estudo total (Figura 3). Aproximadamente 17% dessa área total de queimadas (161 km²) encontrou-se dentro de áreas que foram desmatadas durante o período de três anos entre 2008 e 2010 (“desmatamento recente” - Tabela 1).

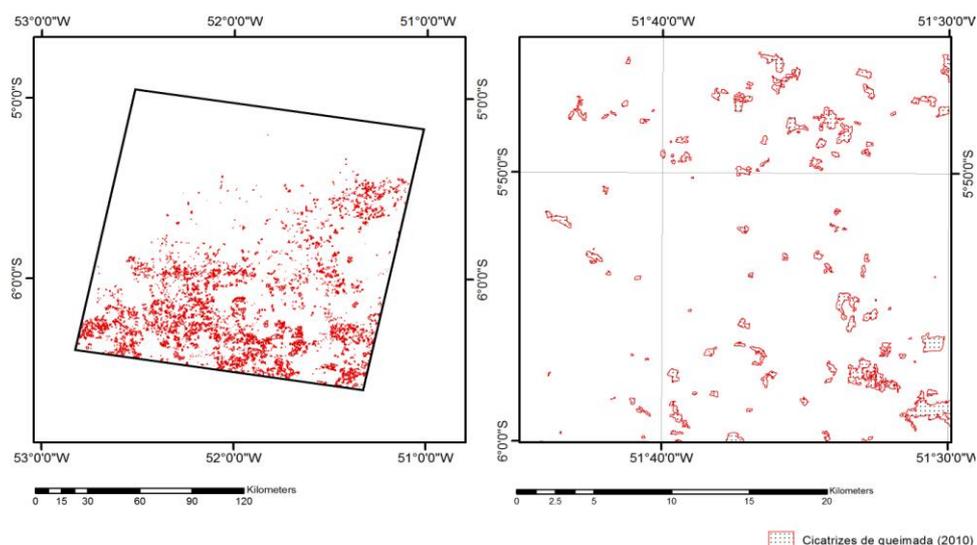


Figura 3. Mapa de cicatrizes de queimada dentro da área de estudo, como resultado da classificação automática não-supervisada e subseqüente edição manual. A imagem na esquerda mostra a área total de cicatrizes de queimada mapeada (em vermelho), a imagem detalhada na direita mostra a amplificação de uma sub-área para melhor visualização.

Estas áreas correspondem a lugares onde queimada é diretamente associada com desmatamento em preparação para fins agrícolas (LIMA et al., 2012). Os resultados também mostram que ~64% (598 km²) das áreas queimadas observadas em 2010 ocorreram em áreas desmatadas em 2007 ou antes (denominadas “desmatamento antigo”), onde a razão para uso de fogo é menos evidente. Além disso, cerca de 16% das queimadas foram observadas em áreas cobertas por “Floresta” (153 km²), correspondente a queimada sem remoção da vegetação.

Tabela 1. Extensão das áreas queimadas no ano 2010 correspondentes a cada classe PRODES de desmatamento e cobertura da terra para o Landsat/TM cena 225/64, Pará, Brasil.

Classe	Área queimada [km ²]	Área queimada [%]
Área desmatada até 1997	127	13
Área desmatada entre 1998 e 2000	154	16
Área desmatada em 2001	82	9
Área desmatada em 2002	25	3
Área desmatada em 2003	45	5
Área desmatada em 2004	34	4
Área desmatada em 2005	56	6
Área desmatada em 2006	37	4
Área desmatada em 2007	39	4
Desmatamento antigo total	598	64
Área desmatada em 2008	47	5
Área desmatada em 2009	48	5
Área desmatada em 2010	67	7
Desmatamento recente total	161	17
Floresta madura	153	16
Outro*	27	3
TOTAL	939	100

*Esta classe representa áreas ocupadas principalmente por savanas e outras formações não florestais, portanto, são áreas não monitoradas pelo projeto PRODES.

A Figura 4 mostra a estrutura e associação espacial entre as variáveis estudadas através de técnicas de estatística zonal: “área queimada em 2010”, “desmatamento antigo” e “desmatamento recente”. As duas classes de desmatamento mostram padrões espaciais complementares, refletindo uma forte ligação com relação à estrutura temporal do processo de desflorestamento.

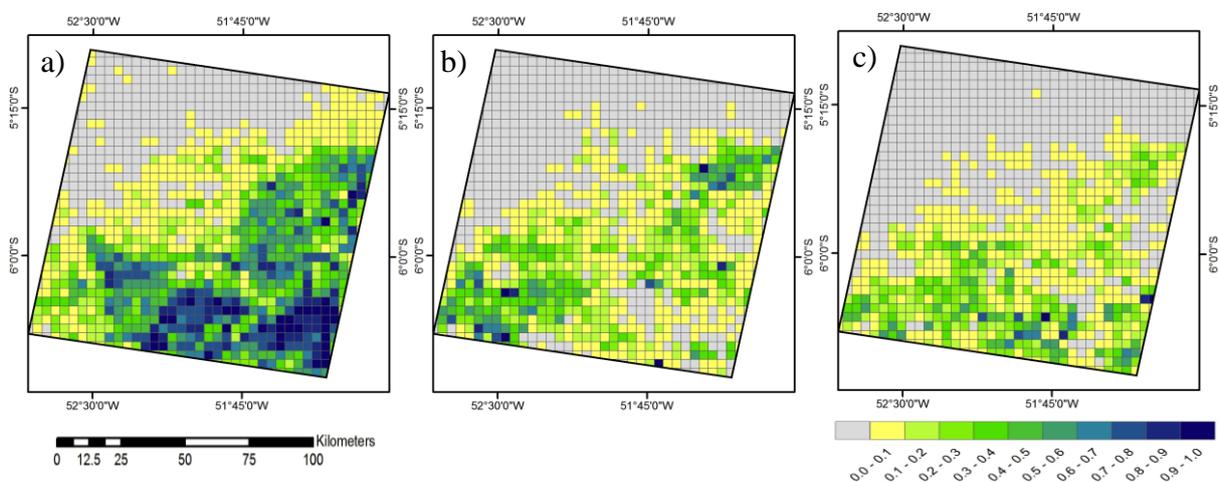


Figura 4. Representação visual da relação espacial entre cicatrizes de queimadas e desflorestamento dentro da área de estudo: a) desmatamento antigo (≤ 2007), b) desmatamento recente (2008-2010), c) área queimada em 2010. As células são de 5km x 5km.

A representação gráfica do “desmatamento antigo” mostra uma maior incidência de corte de floresta no sudeste e sul da região (tons escuros), espalhando-se radialmente, principalmente nas direções norte e oeste (tons claros). Este mesmo padrão pode ser observado no gráfico de “desmatamento recente”, onde os focos de corte de floresta mudaram do sudeste para o norte e oeste. Em ambos os casos, a distribuição de desmatamento mostra certo nível de aglomeração (*clustering*).

A avaliação visual de cicatrizes de queimada em relação ao desmatamento revela um padrão mais complexa, mostrando relações significativas tanto com desmatamento recente quanto com desmatamento antigo. De modo geral, os resultados confirmam a existência de relação espacial entre áreas queimadas e áreas de desflorestamento, o que também corrobora com demais trabalhos que mencionam a existência desta relação como parte do processo de conversão de cobertura natural na Amazônia brasileira (para referências, veja LIMA et al., 2012).

Através da examinação das origens de combustível em queimadas associadas com áreas de “desmatamento antigo” mostrou-se que a maior incidência de queimadas ocorreu em pastos (“Pasto limpo” e “Pasto sujo”), representando 71% (419 km²) da área queimada examinada. Outra classe com contribuição significativa foi a “Vegetação secundária”, representando 18% (109 km²) das queimadas em “desmatamento antigo” (Tabela 2). Tais resultados confirmam as hipóteses de que queimada na Amazônia não está associada apenas com corte de floresta madura (“desmatamento recente”), mas também com renovação de pastagens e desmatamento em áreas de regeneração.

Tabela 2. Principais fontes de combustível para queimadas em 2010 que ocorreram em áreas desmatadas antes de 2007 (“desmatamento antigo”).

Classe	Área queimada [km ²]	Área queimada [%]
Pasto limpo	338	57
Vegetação secundária	109	18
Pasto sujo	81	14
Regeneração com pasto	17	3
Floresta	5	1
Pasto com solo exposto	1	0
Outros*	8	1
Área não observada	38	6
Desmatamento antigo total	597	100

*Esta categoria representa áreas de cobertura da terra com ocorrência mínima nas áreas de interesse (“Não floresta”, “Floresta sob nuvem”, etc.)

Dado que uma significativa área de queimadas encontrou-se em “Floresta” (17% ou 153 km²), uma análise final foi realizada para examinar as fontes potenciais de fogo nessas áreas cobertas em floresta madura. Os resultados indicam que as principais fontes de fogo em floresta em pé são áreas pertencentes às classes “Pasto limpo”, representando quase 45% da área total examinada (342 km²), “Desflorestamento”, com uma contribuição de 152 km² (ou quase 20%), e “Vegetação secundária”, com um adicional 103 km² de área (13.5% da área total).

4. Conclusões

Os resultados da análise espacial realizada no presente trabalho concordam com estudos anteriores que mostraram que desmatamento e queimada são eventos fortemente ligados dentro do processo de uso e mudanças de cobertura da terra na Amazônia, fazendo parte da preparação da terra para uso agrícola. No entanto, as estatísticas também mostram que a maior parte das queimadas ocorreu em áreas onde a floresta foi removida há mais que 3 anos (“desmatamento antigo”). Assim, mostrou-se que queimada está associada não só com corte

de floresta madura, mas também com outros tipos de cobertura da terra, como pastagem e regeneração. Além disso, estes resultados enfatizam a importância da questão levantada por Aragão e Shimabukuro (2010): se a redução do desmatamento na Amazônia não resulta em redução na quantidade de queimada, isso tem implicações importantes quanto aos esforços para controlar as emissões de gases do efeito estufa, também prejudicando parte dos créditos de carbono obtidos por meio de medidas REDD.

O uso de técnicas de análise espacial para quantificar relações entre queimadas e desflorestamento é uma abordagem relativamente nova na literatura sobre essa questão, e prova ser uma ferramenta valiosa para tais análises. No presente trabalho, foram utilizadas técnicas e operações principalmente para detectar e caracterizar os padrões espaciais presentes nos dados (exploração) e para realizar testes de hipóteses sobre esses padrões e as relações entre variáveis (inferência).

Referências Bibliográficas

Aragão, L. E. O. C.; Shimabukuro, Y. E. The Incidence of Fire in Amazonian Forests with Implications for REDD. *Science*, v. 328, n. 4, 2010.

Bowman, M. S.; Amacher, G. S.; Merry, F. D. Fire use and prevention by traditional households in the Brazilian Amazon. *Ecological Economics*, v. 67, n. 1, p. 117-130, 2008.

INPE CATÁLOGO DE IMAGENS. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/index.php>>. Acesso em: 01.mai.2012.

Lima, A.; Silva, T. S. F.; Aragão, L. E. O. C.; de Freitas, 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*, v. 34, p. 239-246, 2012.

Morton, D. C.; Defries, R. S.; Randerson, J. T.; Giglio, L.; Schroeder, W.; Van Der Werf, G. R. Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia. *Global Change Biology*, v. 14, n. 10, p. 2262-2275, 2008.

PRODES, Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>>. Acesso em: 05.mai.2012.

Shimabukuro, Y. E.; Duarte, V.; Arai, E.; Freitas, R. M.; Lima, A.; Valeriano, D. M. Fraction images derived from Terra Modis data for mapping burnt areas in Brazilian Amazonia. *International Journal of Remote Sensing*, v. 30, n. 6., p. 1537-1546, 2009.

Sorrensen, C. L. Linking smallholder land use and fire activity: examining biomass burning in the Brazilian Lower Amazon. *Forest Ecology and Management*, v. 128, n. 1-2, p. 11-25, 2000.

Sorrensen, C. L. Contributions of fire use study to land use/cover change frameworks: Understanding landscape change in agricultural frontiers. *Human Ecology*, v. 32, n. 4, p. 395-420, 2004.

TERRACLASS. Disponível em: <http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass.php>. Acesso em: 15.mai.2012.

TERRACLASS, Metodologia para mapeamento de vegetação secundária na Amazônia Legal. Registro do documento original disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.23.17.06>>. Acesso em: 15.mai.2012.