

Análise da detecção e ocorrência de queimadas em áreas urbanizadas e entorno

Analysis of detection and occurrence of wildfire in urban and surrounding areas

Gustavo Maximiano Junqueira Lazzarini¹, Luiz Carlos Costa Ferreira²,
Maryelle Ferreira Garcia Felicíssimo², Lawrence Nóbrega de Oliveira¹
e Marcos Vinícius Giongo Alves³

¹Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis- Brasil
gmjlazzarini@bol.com.br; eng.lawrencenobrega@gmail.com

²Coordenadoria Estadual de Defesa Civil no Tocantins, TO, Brasil
luizccarlos@gmail.com; maryyelle@hotmail.com

³Universidade Federal do Tocantins, TO, Brasil
giongo@mail.uft.edu.br

Resumo

Focos de calor são as principais ferramentas para monitoramento de incêndios no Brasil. Contudo, apresentam limitações que podem distorcer a real incidência de fogo em determinados locais. Este trabalho analisou a relação entre queimadas que foram combatidas em algumas cidades do Estado do Tocantins e focos de calor detectados por vários sensores orbitais durante o ano de 2012. Dados de 346 relatórios de ocorrência de incêndios mostraram a concentração de 1,42 eventos/km² em áreas urbanizadas. No entorno de até 9 km ao redor dessas queimadas foram registrados 950 focos de calor, dos quais 40% eram das plataformas AQUA_M-T e TERRA_M-T. A análise dos incêndios e focos de calor registrados no mesmo dia revelou que apenas 7,8% das queimadas foram registradas por algum dos sensores. Houveram outras 89,5% intersecções entre as queimadas e a área de abrangência dos focos de calor, porém com diferença temporal maior que 2 dias. Esses resultados realçam a inaplicabilidade do uso de focos de calor como ferramenta de monitoramento de queimadas em áreas urbanizadas e entorno e evidenciam o potencial de erros quando da utilização de produtos com grande intervalo temporal para a validação de focos de calor e áreas queimadas.

Palavras-chave: Focos de calor; Validação; Queimadas; Acurácia; Geoprocessamento

Abstract

Hotspots are the main way to monitor the occurrence of wildfire in Brazil. However, they present limitations that can disturb the real incidence of fire in some places. This study analyzed the events of fires faced by teams of firefighters of some cities from Tocantins State and their relationship to hotspots detected by several optical sensors during the 2012 year. Data from 346 facing fire reports showed the occurrence of 1,42 events/km² in urbanized areas. In distances until 9 km from the fire events were registered 950 hotspots, being 40% of them from AQUA_M-T and TERRA_M-T. The analysis regarding fire and hotspot happening in the same day revealed that only 7,8% of the fires could be detected by any sensor. Others 89,5% of intersections between fires and hotspots were happened, but in interval-times longer than 2 days. Those results highlight the impracticability to use hotspots as fire monitoring tool in urbanized areas and the great potential to make mistakes when they are employed satellite images with long interval-time to validate hotspots and burned areas.

Keywords: Hotspots; Validation; Wildfire; Accuracy; Geoprocessing

Introdução

O IBAMA (2010) define incêndio florestal como todo tipo de fogo sem controle incidente sobre vegetação. Eles podem ocorrer tanto em áreas rurais, quanto em áreas urbanas, como em parques, terrenos baldios e áreas não edificadas das cidades. Os danos causados por eles englobam o empobrecimento do solo, a destruição de vegetação e a erosão, bem como alterações na composição química da atmosfera (CRUTZEN; ANDREAE, 1990) e prejuízos à saúde humana (RIBEIRO; ASSUNÇÃO, 2002). Também podem ocasionar danos ao patrimônio público e privado (ICMBIO, 2007), tais quais, destruição de equipamentos de infraestrutura, residências e mesmo perda de vidas humanas.

A incidência das queimadas no Brasil central é mais concentrada no período compreendido entre os meses de agosto e novembro (JUSTINO; SOUZA; SETZER, 2002; SISMANOGLU et al., 2002), o que favorece o uso de sensores óticos no monitoramento (SETZER; PEREIRA; PEREIRA, 1992). O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibiliza dados de focos de calor oriundos de satélites polares e geoestacionários, desde 1987 (SETZER; PEREIRA; PEREIRA, 1992). Esses e outros dados relativos a incêndios florestais podem ser analisados em sistemas de informações geográficas (VETORAZZI; FERRAZ, 1998), de forma a contribuir para melhor direcionar as ações de prevenção e combate às queimadas, pois se tratam de ferramentas capazes de aprofundar o conhecimento territorial e contribuir para a melhoria do seu monitoramento, planejamento e gestão (GOMES, 2006).

Apesar da operacionalidade do emprego de sensores remotos no estudo do fogo, há de se ressaltar a importância da confrontação dos registros deles com a realidade de campo (RAZAFIMPANILO et al., 1995). A avaliação da acurácia da classificação não é uma tarefa simples, apesar de ser uma etapa fundamental do processo (FOODY, 2002), principalmente quando se tratam de produtos oriundos de dados de baixa resolução espacial (BOSCHETTI; FLASSE; BRIVIO, 2004). A análise dos erros de comissão e omissão deve constar da pauta dos métodos de classificação das imagens, pois resultados inadequados podem interferir negativamente no uso proposto dos dados (FOODY, 2008). Isso se aplica também aos focos de calor, visto que eventos inexistentes podem vir a ser registrados, enquanto que eventos que existiram podem passar despercebidos. No tema de queimadas, é comum que mapeamentos de áreas queimadas sejam utilizados como referência para avaliação do registro de focos (PEREIRA et al., 2012; PIROMAL et al., 2008; SCHROEDER et al., 2008). Contudo, tanto o mapeamento em análise quanto o mapeamento de referência podem conter erros (POWELL et al., 2004). Assim, o emprego de um produto de imageamento como referência para validação e avaliação de outro pode levar ao incremento dos erros, por não correspondência com a realidade de campo.

Esse problema torna-se mais relevantes na medida em

que dados remotamente adquiridos são empregados em sistemas de monitoramento. No Estado do Tocantins, a elevada incidência de incêndios florestais faz com que ações voltadas ao monitoramento desses incidentes faça parte da agenda de diversas instituições, como forma de melhor direcionar as ações de prevenção e combate. O monitoramento das queimadas é feito a partir de focos de calor disponibilizados pelo INPE, que servem de insumo para produção de produtos derivados, como relatórios diários no período da estiagem (CEDEC, 2016). Contudo, a prevalência de focos de calor em áreas rurais e/ou de vegetação (LAZZARINI et al., 2012) sugere a necessidade de avaliação da aplicabilidade desses dados em áreas urbanizadas e arredores, visto que não existem ferramentas amplamente difundidas que atendam às características desse ambiente.

Este trabalho analisou a ocorrência de fogo em áreas urbanizadas e arredores, e sua detecção por sensores remotos. Dados de focos de calor foram cruzados com dados de ocorrências de incêndios registradas e atendidas por grupamentos de combate de alguns municípios do Estado do Tocantins.

Material e métodos

Ocorrências de fogo

No Estado do Tocantins, existem brigadas de combate a incêndios florestais em diversas instituições. Os relatórios de ocorrências de incêndios combatidos, elaborados por algumas dessas instituições, são encaminhados para a Coordenadoria Estadual de Defesa Civil, onde são armazenados e compilados num banco de dados geoespacial. Assim, informações como data e local onde foram combatidas queimadas ficam disponíveis em formato shapefile. Esses dados foram utilizados como referência de campo na análise do registro de focos de calor captados por sensores remotos, pois representavam ocorrências confirmadas de fogo.

A maioria das ocorrências analisadas foi oriunda de grupamentos municipais de combate a incêndios. Para uma melhor compreensão espacial da localização desses dados, fez-se o cruzamento dos mesmos com o perímetro das áreas urbanizadas do Tocantins, com base nos dados da Secretaria Estadual de Planejamento (SEPLAN, 2012). Foram criadas três zonas distintas: área urbanizada; entorno, criado a partir do perímetro da área urbanizada, num raio de 1 km da mesma, e; remanescente. Cabe ressaltar que, em alguns casos, um mesmo evento permutou por duas ou mais dessas zonas adjacentes.

Focos de calor

Foram utilizados os dados relacionados aos focos de calor (FC) de todas as plataformas disponíveis no site do

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para o período entre 1º de janeiro de 2012 e 31 de dezembro de 2012 no estado do Tocantins (INPE, 2012). O download foi realizado em 27/11/2013, e todos os dados foram exportados em arquivos na extensão shapefile.

Foram criados polígonos quadrados de 9 x 9km ao redor da coordenada de cada FC, sendo considerados na análise apenas aqueles FC cujos respectivos quadrados fizeram intersecção com as coordenadas das ocorrências de incêndios. Esse dimensionamento foi escolhido devido aos possíveis erros de localização associados à resolução espacial de alguns sensores utilizados no registro de FC.

Intersecções dos FC com os incêndios combatidos

Para cada FC foram criados 9 polígonos quadrados, cujas coordenadas centrais eram coincidentes com cada FC. As dimensões dos polígonos variou de 1 x 1 km a 9 x 9 km (Fig.1), de forma a representar a projeção de pixels registrados por sensores com resolução espacial entre 1 e 9 km.

A acurácia dos FC foi analisada através da intersecção desses polígonos quadrados representativos de pixels com os pontos constantes dos relatórios de combate a incêndios. Empregaram-se ferramentas de intersecção dos softwares ArcGIS 9.1 licenciado para o IBAMA e ArcGIS 10.2 licenciado para o Governo do Estado do Tocantins.

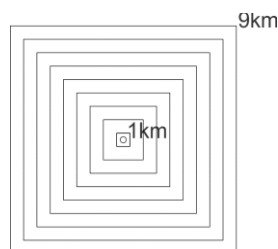


Figura 1 – Representação dos polígonos correspondentes aos pixels representativos de 1 x 1 a 9 x 9 km dos focos de calor

Em complemento, os FC e ocorrências de fogo foram reanalisados de acordo com a diferença temporal na qual as intersecções ocorreram, segundo as categorias a seguir: FC e ocorrências de mesma data; FC e ocorrências com intervalo de 1 dia, representando véspera e dia seguinte; FC e ocorrências com intervalos de 2 a 15 dias, cujo intuito foi identificar erros ocasionados por procedimentos de validação de FC com áreas queimadas geradas a partir de imagens de sensores cujos períodos de revisitas é de 16 dias, a exemplo das plataformas Landsat; FC e ocorrências com intervalos de 16 a 23 dias, cujo intuito foi identificar erros ocasionados por procedimentos de validação que utilizam imagens de sensores cujo período de revisita é de 24 dias, a exemplo das plataformas CBERS e Resourcesat; FC e ocorrências detectados com intervalos maiores que 24 dias, para classificar as intersecções remanescentes.

Resultados e Discussão

Ocorrências de combate a incêndios e FC próximos

Foram coletados dados de relatórios de 346 ocorrências de combate a incêndios florestais registradas entre 05/06/2012 e 21/10/2012, provenientes de grupamentos de brigadistas de 6 municípios (Araguaína, Gurupi, Palmas, Paraíso do Tocantins, Porto Nacional e Talismã), em sua maioria formados por bombeiros militares (Fig.2). Esses dados eram relacionados a toda e qualquer ação voltada a combate de fogo em ambiente externo, podendo ser desde queima de galhadas até incêndios em parques e áreas verdes. Contudo, a maior parte dos relatórios existentes não contemplava adequadamente todas as informações, motivo pelo qual foram aproveitadas neste trabalho apenas a data e a coordenadas geográfica.

O cruzamento com dados vetoriais de áreas urbanizadas mostrou que das 346 ocorrências de combate, 219 ocorrências foram atendidas nesse tipo de área. Outras 121 ocorrências estavam localizadas num raio de até 1 km ao redor das áreas urbanizadas, além de outras 84 localizaram-se a mais de 1 km. A considerar que essas áreas urbanizadas cobrem 154 km² e o entorno de 1 km cobre 299 km², foram confirmadas 1,42 queimadas/km² na área urbana e 0,40 queimadas/km² no raio de 1 km. Esses resultados são discrepantes em relação aos apontamentos feitos por Lazzarini et al. (2012) em sua análise sobre FC/1.000 km², para esses mesmos tipos de ocupação do solo. Na ocasião, foram encontrados 25 e 30 FC/1.000km² da plataforma AQUA TARDE UMD respectivamente em áreas urbanizadas e no seu entorno. Porém, a discrepância maior não reside na inversão das áreas mais afetadas, e sim na quantidade efetiva de queimadas ocorridas. A se considerar que cada FC pudesse corresponder à detecção de uma única frente de fogo ativa, os presentes resultados mostram 1.420 queimadas/1.000km², valor esse mais de 50 vezes maior do que os 25 FC/1.000km² registrados em áreas urbanizadas naquele estudo. Isso mostra que, em áreas urbanizadas, os FC não são bons indicadores da ocorrência quantitativa de queimadas, pois omitem grande parte delas. Há de se destacar que a saturação de um pixel completo por uma pequena área queimada é suficiente para causar o registro de um FC (PIROMAL et al., 2008). Assim, um FC pode indicar tanto uma única, quanto várias queimadas no interior da região espacial que ele representa (INPE, 2012). Em áreas urbanizadas, os incêndios são mais restritos, devido à menor quantidade de vegetação passível de queima e à maior quantidade de barreiras à propagação. Essas heterogeneidade e fragmentação também contribuem para uma menor acurácia dos resultados de classificação de imagens (POWELL et al., 2004).

As 346 queimadas confirmadas intersectaram os polígonos de 9 km de 950 FC, com base nas 17 plataformas disponíveis para consulta. Foram computados 879 focos (92,5%) coincidentes com o mesmo período

de anotação dos relatórios de combate. Mais de 40% dos FC em questão foram provenientes dos satélites AQUA_M-T e TERRA_M-T (Fig.3). Juntamente com os FC de AQUA-T, GOES-12 e NOAA-15, eles representam mais de 75% dos registros.

A evolução acumulada da quantidade de FC e ocorrências de combate a incêndio tiveram conformação semelhante. Observa-se que a curva dos combates teve sua inflexão ascendente ocorrendo anteriormente à da curva

de FC, indicando que as atividades de enfrentamento de queimadas foram mobilizadas antes do início do período mais crítico de detecção de FC (Fig.4). Contudo, a fase de crescimento exponencial dos combates foi menos intensa, indicando que o crescimento nas detecções de FC não pode ser acompanhado na mesma medida pelas equipes em ação. Esses resultados reforçam o mês de setembro como o mais crítico (JUSTINO; SOUZA; SETZER, 2002; SISMANOGLU et al., 2002), informação essa que

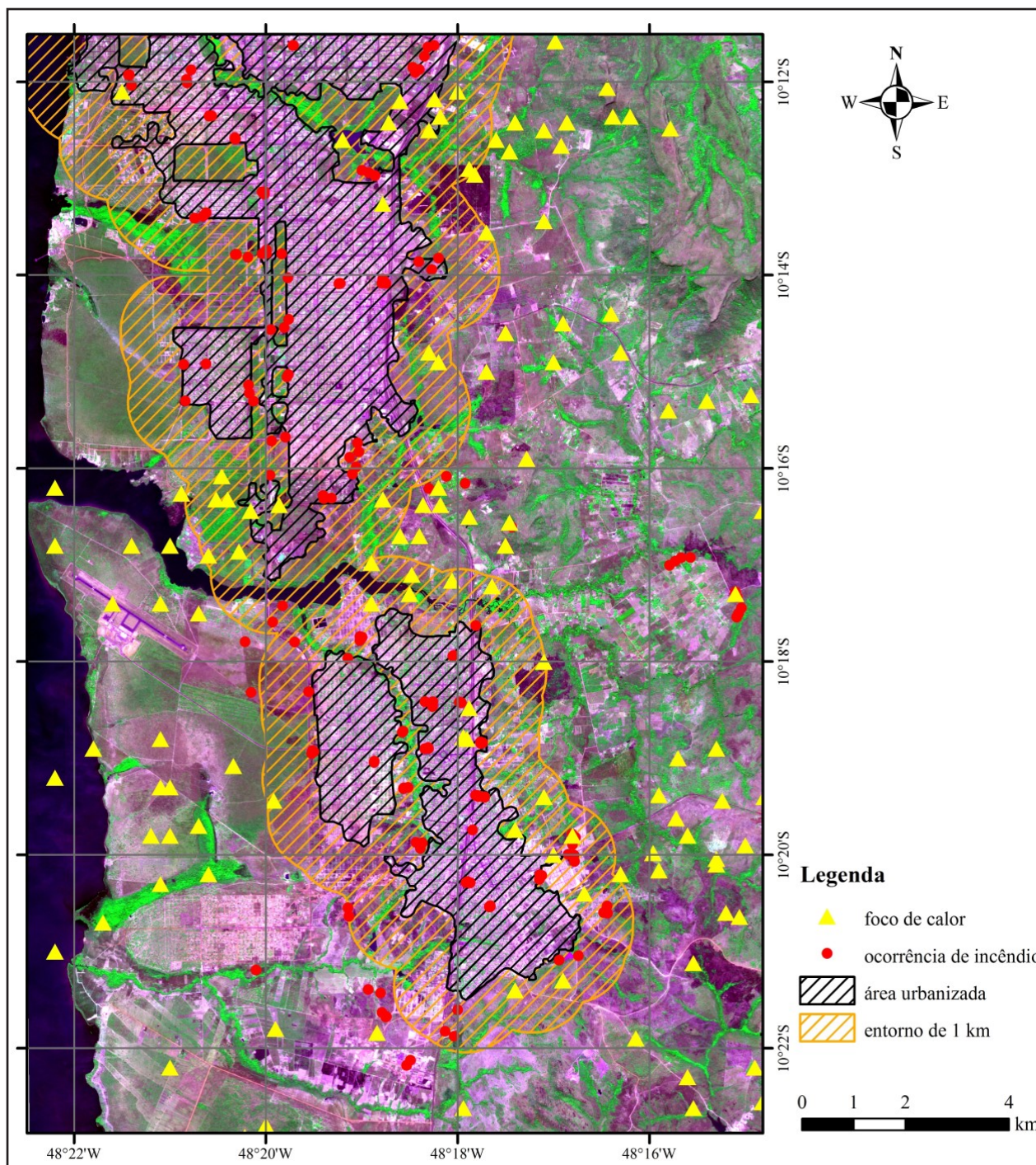


Figura 2 – Recorte da área de estudo: área urbanizada e entorno do município de Palmas; focos de calor registrados em 2012; incêndios combatidos; imagem Rapideye R3G5B2 de 03/09/2011

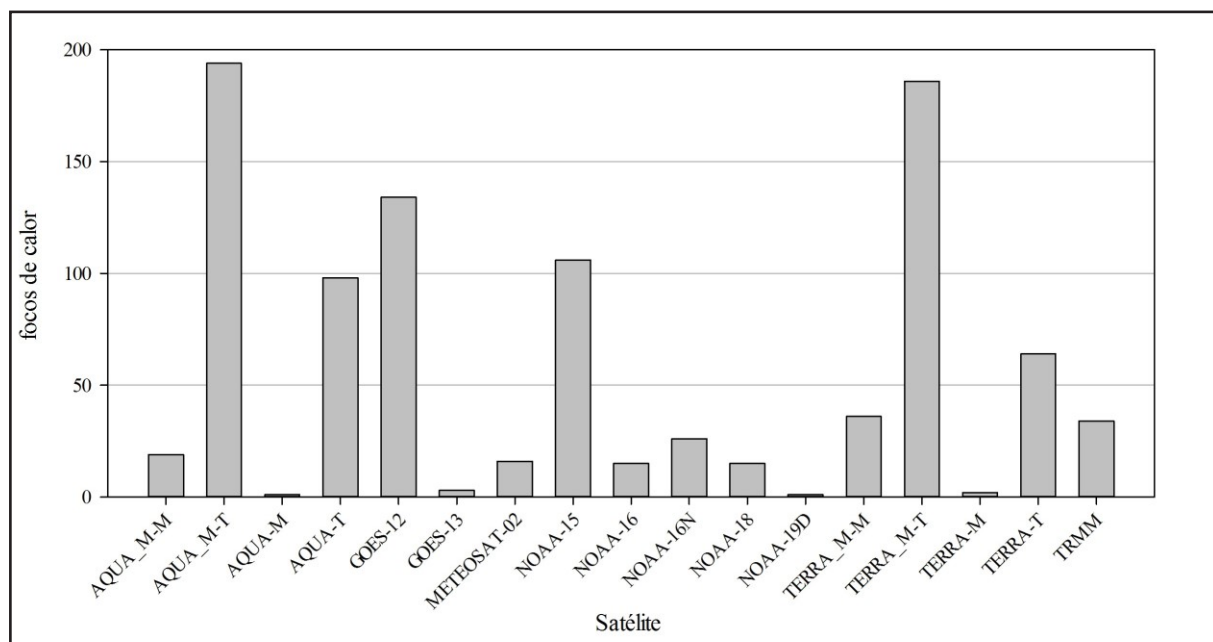


Figura 3 – Quantidade de FC detectados por cada plataforma em 2012 cujos pixels representativos de 9 km intersectaram com as ocorrências de combate a incêndios

possivelmente já vem sendo utilizada no planejamento das ações de enfrentamento e prevenção.

Intersecções entre ocorrências de combate a incêndios e FC

O cruzamento dos 950 FC com as 346 ocorrências de incêndios florestais resultaram em 1.289 intersecções, distribuídas pelos pixels representativos de 1 a 9 km e nos intervalos temporais propostos (Tabela 1).

Esses dados mostram que, em média, 7,5% das in-

tersecções (Tabela 2) correspondem a informações congruentes, onde um FC é registrado no mesmo dia de um incêndio, dentro de uma área máxima de 9 x 9km.

Uma pequena parte das interações (2,8%) ocorreu com 1 dia de diferença entre os eventos. Cabe ressaltar que essas interações com 1 dia de diferença também poderiam corresponder à realidade de campo, visto que há a possibilidade de referirem-se a queimadas iniciadas no dia anterior ao do combate e terminadas antes do horário de coleta de dados pelos satélites do dia seguinte. Também englobariam o oposto, ou seja,

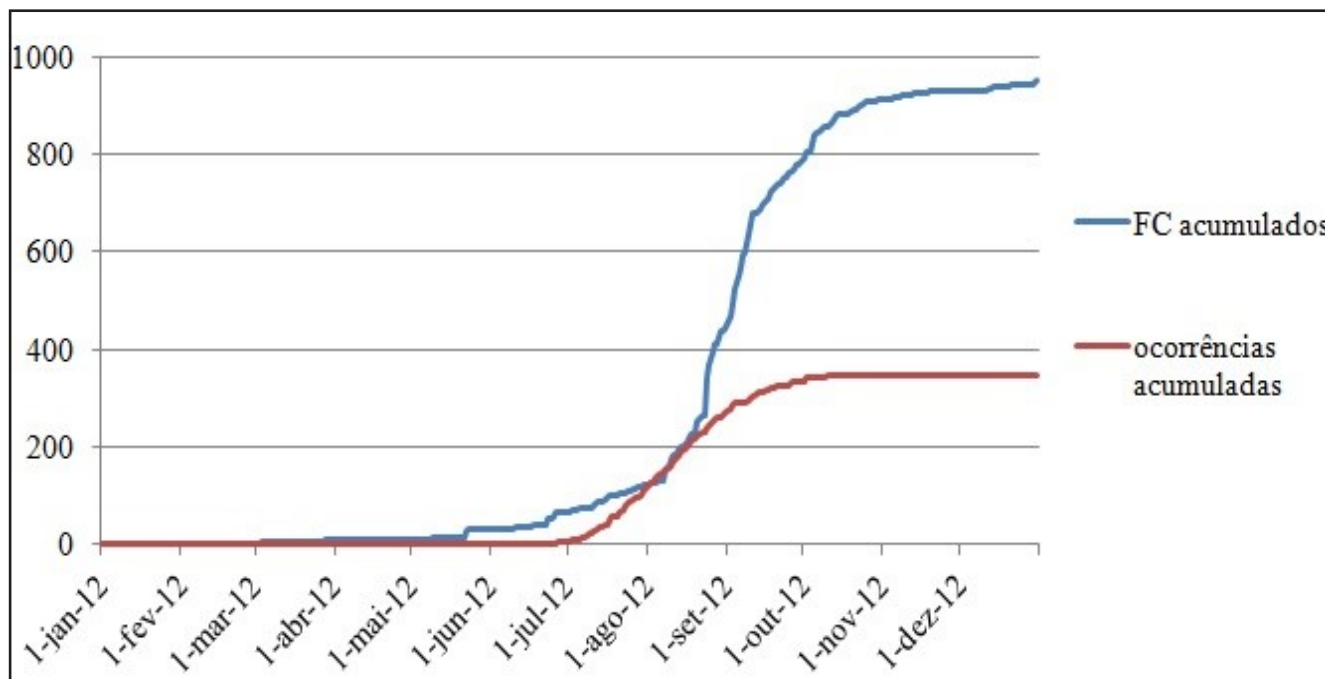


Figura 4 – Evolução acumulada da quantidade de FC e ocorrências de combate a incêndios em 2012 na região de estudo

queimadas cujo combate persistiu até o dia seguinte e que ainda foram captadas pelo sensor nesse dia seguinte.

Outros 92,5% das intersecções poderiam ser considerados falsos positivos, visto que os FC não correspondem a incêndios ocorridos no mesmo dia. Isso mostra que as áreas queimadas oriundas de imageamentos realizados com intervalos de revisita maiores do que 2 dias podem levar a enganos na validação de FC, pois incrementariam grandes percentuais de erros de comissão. Dessa forma, esses erros de comissão poderiam estar presentes em vários trabalhos, como Pereira et al. (2012) e Piromal et al. (2008), que utilizaram imagens da plataforma Landsat, cujo intervalo de revisita é 16 dias. Assim, esses intervalos de revisita acumulam áreas queimadas que validariam erroneamente os FC gerados no mesmo período. Morisette et al. (2005) também avaliaram a detecção de FC com produtos cujo intervalos de revisita era 16 dias, porém utilizando os focos ativos, ao invés da área queimada. Esse método restringe temporalmente os FC a serem analisados, porém traz resultados mais confiáveis de validação. Incêndios detectados pelos FC

Incêndios detectados pelos FC

Dos 346 incêndios confirmados pelos relatórios de ocorrências de combate, apenas 27 (7,8%) puderam ser correlacionados com algum FC do mesmo dia, a se considerar todos os tamanhos representativos de pixels estudados (Tabela 3). Os incêndios que tiveram FC registrados com 1 dia de diferença foram 13 (3,8%), que, acumulados com os anteriores, totalizaram 34 (9,8%). Dessa forma, é certo que de 90,2 a 92,2% dos incêndios, que ocorrem em áreas urbanizadas e entorno são omitidos pelos sistemas disponíveis atualmente. A baixa detecção de pequenas queimadas, e a influência do tamanho da área nos registros, são recorrentemente relatados (MARTINEZ; FIEDLER; LUCATELLI, 2007; TOMZHINSKI et al., 2011). Pereira et al. (2012) levantaram que apenas 15% da cicatrizes menores que 10ha foram detectadas, considerando o máximo de 1 km de distância dos FC em mapeamento realizado com intervalo de 32 dias. Há de se destacar que incêndios de pequenas proporções, encerrados antes ou iniciados depois da

Tabela 1 – Distribuição das intersecções entre FC e ocorrências de incêndios florestais conforme intervalo de tempo e tamanho representativo dos pixels

| Intervalo de dias entre o FC e a ocorrência | Tamanho representativo do pixel (km) | | | | | | | | | Total |
|---|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| 0 | 19 | 25 | 11 | 8 | 9 | 3 | 12 | 2 | 2 | 91 |
| 1 | 5 | 2 | 4 | 0 | 4 | 6 | 8 | 5 | 2 | 36 |
| 2 a 15 | 24 | 27 | 15 | 23 | 36 | 35 | 29 | 26 | 24 | 239 |
| 16 a 23 | 6 | 18 | 14 | 27 | 28 | 28 | 38 | 32 | 35 | 226 |
| > 23 | 67 | 71 | 56 | 84 | 83 | 60 | 74 | 102 | 100 | 697 |
| Total | 121 | 143 | 100 | 142 | 160 | 132 | 161 | 167 | 163 | 1.289 |

Tabela 2 – Porcentagem das intersecções entre FC e ocorrências de incêndios florestais conforme intervalo de tempo e tamanho representativo do pixel

| Diferença temporal da intersecção (dias) | Tamanho representativo do pixel (km) | | | | | | | | | Média |
|--|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| Nenhuma | 15,7 | 17,5 | 11,0 | 5,6 | 5,6 | 2,3 | 7,5 | 1,2 | 1,2 | 7,5 |
| maior que 1 | 84,3 | 82,5 | 89,0 | 94,4 | 94,4 | 97,7 | 92,5 | 98,8 | 98,8 | 92,5 |
| maior que 2 | 80,2 | 81,1 | 85,0 | 94,4 | 91,9 | 93,2 | 87,6 | 95,8 | 97,5 | 89,5 |

passagem dos satélites, não são detectados (SETZER, 1993; SETZER; PEREIRA; PEREIRA, 1992). Também são de difícil detecção as frentes de fogo menores que 50m, o fogo sob a copa de árvores e sob áreas nubladas ou enfumaçadas (SETZER; PEREIRA; PEREIRA, 1994). No sensor AVHRR, apenas queimadas com no mínimo 900m² podem ser detectadas (ANTUNES, 2000). Outro ponto a contribuir para a omissão de registro é o ângulo de visada, que quanto maior, mais difícil a detecção (MORISSETTE et al., 2005). Esses resultados podem levar ao entendimento de que as queimadas nessas regiões normalmente não atingem grandes proporções, bem como se encerram e/ou são combatidas rapidamente. A considerar as 34 ocorrências que coincidiram com FC da mesma data ou com 1 dia de diferença, 9 (26,5%) abrangeram áreas urbanizadas, 10 (29,4%) o entorno de 1km e 22 (64,7%) estiveram mais distante do que isso. Das 312 ocorrências que não coincidiram temporalmente com FC, 210 (67,3%) abrangeram áreas urbanizadas, 105 (33,7%) o entorno de 1 km e 66 (21,2%) estiveram mais distante do que isso. Observa-se que a proporção de coincidências aumenta com o distanciamento das áreas urbanizadas. As informações não coincidentes

aumentaram com a aproximação dessas áreas (Fig.5).

A baixa coincidência temporal entre FC e queimadas, apesar do alto índice de queimadas confirmadas em campo, realça a baixa eficiência de identificação dos incêndios com as características dos aqui estudados. Além dos fatores causadores de omissões já apontados anteriormente, deve-se ressaltar que a contiguidade das queimadas também influencia na detecção (MORISSETTE et al., 2005). Os inúmeros incêndios em áreas pequenas, não foram detectados pelos métodos analisados. Isso leva a crer que, nas áreas urbanas e proximidades, as ações de combate não contribuem para a redução dos registros de FC. Devido à arquitetura espacial da biomassa combustível em locais entremeados por edificações e afins, dificilmente ocorrem frentes de fogo com extensão captável pelos produtos convencionais. A contiguidade entre diferentes queimadas simultâneas fica impedida pelas diversas barreiras existentes. Alia-se a esses fatores a possibilidade das ocorrências serem eliminadas rapidamente, devido à facilidade de acesso dos combatentes. Outro item a ser considerado é o tempo de notificação e resposta aos eventos. Quanto mais próximo de áreas urbanizadas, maior o fluxo populacional e maior a

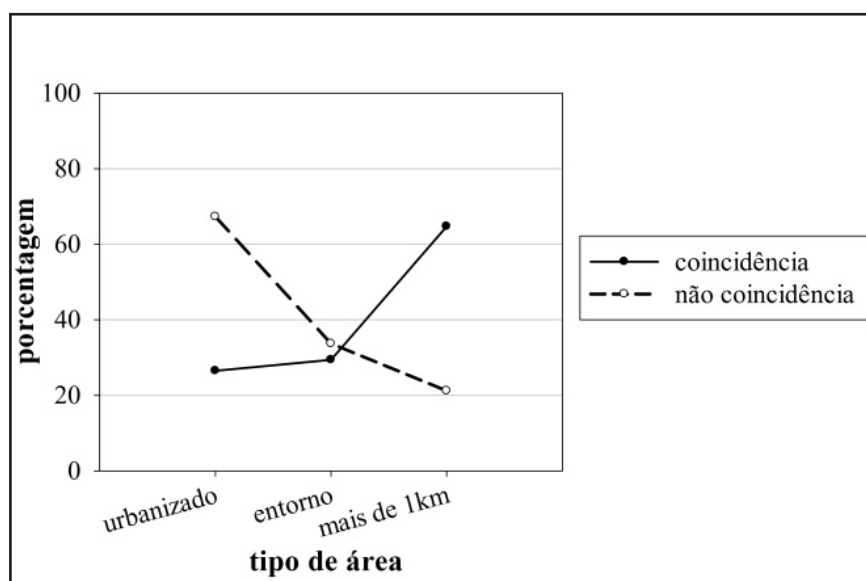


Figura 5 – Porcentagem de coincidências e não coincidências entre FC e ocorrências de incêndios nas áreas urbanizadas, no entorno de 1km e em locais mais distantes

Tabela 3 – Incêndios detectados pelos FC dos mesmos dias ou com 1 dias de diferença, nos diferentes tamanhos representativos dos pixels

| Intervalo entre o incêndio e o FC | Tamanho representativo do pixel (km) | | | | | | | | | Total |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| mesmo dia | 16 | 12 | 6 | 5 | 3 | 2 | 6 | 1 | 2 | 27 |
| um dia de diferença | 4 | 2 | 4 | 0 | 4 | 2 | 4 | 1 | 2 | 13 |
| Total acumulado | 19 | 14 | 9 | 5 | 6 | 3 | 9 | 2 | 4 | 34 |

probabilidade das brigadas serem acionadas ainda no início do fogo, aumentando as chances de extinção do mesmo, antes de ele atingir maiores intensidades. Todos esses fatores contribuem para dificultar o registro desses eventos pelos métodos convencionais. Ademais, os danos relacionados às queimadas podem ser reduzidos, porém não eliminados.

Intersecções por satélite

Das 1.289 intersecções entre os FC e as ocorrências de incêndios, 77% envolveram os satélites AQUA_M-T, TERRA_M-T, GOES-12, NOAA-15 e AQUA-T (Tabela 4).

Os sensores cujos produtos de FC são disponibilizados pelo INPE têm resolução espacial nominal de 1,00 x 1,00km a 4,00 x 4,00km (Tabela 5), valores esses que podem aumentar nas bordas das imagens (INPE 2012). Mesmo com a possibilidade de deslocamento dos FC oriundos de erros de navegação ou georeferenciamento (JESUS; SETZER; MORELLI, 2011), pixels representativos de até 9 x 9km superam em mais do que o dobro o tamanho da área abrangida pelos sensores de menor resolução espacial.

Dessa forma, a atividade dos sensores mais ativos foi explorada separadamente. A Tabela 6 mostra as

intersecções correspondentes a FC e ocorrências de incêndios acontecidos no mesmo dia, com 1 dia de diferença, e com mais de 1 dia de diferença, para os 5 satélites mais representativos. Observa-se os sensores em questão apresentaram no mínimo 83,7% de registros que não representam a detecção precisa de incêndios, por apresentarem intervalos de 2 ou mais dias entre o FC e a ocorrência do incêndio no campo. TERRA_M-T e AQUA_M-T tiveram a maior capacidade de registro correto das queimadas, respectivamente com 9,9 e 9,0% de coincidência temporal exata, e com 6,3 e 2,5% com diferença temporal de 1 dia. À exceção de NOAA-15, os 4 outros satélites tiveram mais de 50% das interse-

Tabela 5 – Resolução espacial nominal na nadir dos satélites utilizados para registro de FC – adaptado de INPE (2012)

| Satélite | Resolução espacial (km) |
|------------|-------------------------|
| AQUA/TERRA | 1,00 X 1,00 |
| NOAA | 1,10 X 1,10 |
| GOES | 4,00 X 4,00 |

Tabela 4 – Distribuição das intersecções entre FC e ocorrências de incêndios, conforme tamanho representativo dos pixels e satélites registradores.

| Satélite | Tamanho representativo do polígono quadrado (km) | | | | | | | | | Total |
|------------------------|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| AQUA_M-M | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 1 | 3 | 2 | 5 | 23 |
| AQUA_M-T | 32 | 44 | 23 | 23 | 29 | 24 | 31 | 33 | 38 | 277 |
| AQUA-M | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| AQUA-T | 21 | 19 | 14 | 9 | 23 | 17 | 16 | 6 | 18 | 143 |
| GOES-12 | 28 | 17 | 5 | 21 | 16 | 11 | 25 | 32 | 20 | 175 |
| GOES-13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 |
| METEOSAT-02 | 1 | 1 | 1 | 2 | 6 | 0 | 0 | 0 | 6 | 17 |
| NOAA-15 | 8 | 14 | 7 | 22 | 22 | 22 | 23 | 25 | 9 | 152 |
| NOAA-16 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2 | 3 | 0 | 2 | 3 | 15 |
| NOAA-16N | 0 | 1 | 8 | 11 | 3 | 4 | 1 | 2 | 6 | 36 |
| NOAA-18 | 1 | 3 | 1 | 2 | 5 | 1 | 0 | 0 | 4 | 17 |
| NOAA-19D | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| TERRA_M-M | 3 | 1 | 7 | 6 | 4 | 7 | 9 | 9 | 3 | 49 |
| TERRA_M-T | 19 | 27 | 19 | 28 | 30 | 27 | 32 | 32 | 38 | 252 |
| TERRA-M | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| TERRA-T | 5 | 7 | 6 | 10 | 7 | 10 | 13 | 12 | 6 | 76 |
| TRMM | 1 | 3 | 7 | 4 | 6 | 5 | 6 | 11 | 7 | 50 |
| <i>Total acumulado</i> | <i>121</i> | <i>143</i> | <i>100</i> | <i>142</i> | <i>160</i> | <i>132</i> | <i>161</i> | <i>167</i> | <i>163</i> | <i>1.289</i> |

ções ocorridas com 1 dia de diferença registradas nos pixels representativos de 5km ou mais. Isso torna essas intersecções incertas, pois pode tanto mostrar que os incêndios se deslocaram por distâncias consideráveis entre as datas de registro da ocorrência e as de registro dos FC, quanto revelar que esses FC não correspondiam àqueles incêndios combatidos, incrementando assim os erros de comissão.

A incerteza também se aplica às intersecções referentes a registros do mesmo dia, para os tamanhos de polígono quadrado representativo maiores do que o dobro da resolução espacial nominal dos sensores. Pereira et al. (2012) consideraram o grau de incerteza crescente de acordo com o aumento da distância. Nesse caso, NOAA-15 apresentou o menor grau de incerteza, visto que 85,7% das intersecções de mesmo dia ocorram nos pixels representativos de até o dobro de sua resolução espacial nominal, seguido por AQUA_M-T, que apresentou 68,0% na mesma condição.

Dada a grande quantidade de FC que não tiveram correspondência às queimadas combatidas, ou que permaneceram na incerteza, há de se inquirir sobre a causa dessas detecções. Uma das hipóteses pode ser o enquadramento como erros de comissão. Pode ter havido erro no computo da radiação refletida por corpos d'água com a radiação refletida com focos ativos (PIROMAL et al., 2008), visto a presença de lagos nas imediações e interior das regiões analisadas. Outros tipos de superfícies existentes em áreas urbanizadas poderiam ter efeito semelhante. Contudo, não é descartada a possibilidade de subatendimento e sub-registro por parte das brigadas de combate. Mesmo com a existência de outros grupamentos que não os que tiveram os dados analisados neste trabalho, dificilmente o efetivo seria capaz de

atender a todas as ocorrências acontecidas no período, ocorrências essas que podem ter sido as causas desses FC sem confirmação em campo. Isso traria uma estimativa de queimadas maior do que as 1,42 queimadas/km² na área urbana e 0,40 queimadas/km² no raio de 1km confirmadas pelos relatórios de ocorrência de incêndios.

À exceção de NOAA-15, os 4 outros satélites tiveram mais de 50% das intersecções ocorridas com 1 dia de diferença registradas nos pixels representativos de 5km ou mais. Isso torna essas intersecções incertas, pois pode tanto mostrar que os incêndios se deslocaram por distâncias consideráveis entre as datas de registro da ocorrência e as de registro dos FC, quanto revelar que esses FC não correspondiam àqueles incêndios combatidos, incrementando assim os erros de comissão.

A incerteza também se aplica às intersecções referentes a registros do mesmo dia, para os tamanhos de polígono quadrado representativo maiores do que o dobro da resolução espacial nominal dos sensores. Pereira et al. (2012) consideraram o grau de incerteza crescente de acordo com o aumento da distância. Nesse caso, NOAA-15 apresentou o menor grau de incerteza, visto que 85,7% das intersecções de mesmo dia ocorram nos pixels representativos de até o dobro de sua resolução espacial nominal, seguido por AQUA_M-T, que apresentou 68,0% na mesma condição.

Dada a grande quantidade de FC que não tiveram correspondência às queimadas combatidas, ou que permaneceram na incerteza, há de se inquirir sobre a causa dessas detecções. Uma das hipóteses pode ser o enquadramento como erros de comissão. Pode ter havido erro no computo da radiação refletida por corpos d'água com a radiação refletida com focos ativos (PIROMAL et al., 2008), visto a presença de lagos nas imediações e

Tabela 6 – Quantidade de intersecções entre FC e ocorrências de incêndios, conforme diferentes tamanhos representativos de pixels, satélites registradores e diferença temporal.

| Satélite | Coincidência temporal | Tamanho representativo do pixel (km) | | | | | | | | | % total por satélite |
|-----------|-----------------------|--------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| AQUA_M-T | Mesmo dia | 8 | 9 | 4 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 9,0 |
| | +/- 1 dia | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 2,5 |
| | >1 dia | 23 | 34 | 18 | 22 | 27 | 22 | 30 | 32 | 37 | 88,4 |
| AQUA-T | Mesmo dia | 1 | 3 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5,6 |
| | +/- 1 dia | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2,1 |
| | >1 dia | 19 | 16 | 11 | 9 | 22 | 16 | 15 | 6 | 18 | 92,3 |
| GOES-12 | Mesmo dia | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 2 | 0 | 4,0 |
| | +/- 1 dia | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,6 |
| | >1 dia | 28 | 16 | 5 | 21 | 16 | 11 | 20 | 30 | 20 | 95,4 |
| NOAA-15 | Mesmo dia | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2,0 |
| | +/- 1 dia | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4,6 |
| | >1 dia | 6 | 13 | 5 | 22 | 20 | 22 | 20 | 25 | 9 | 93,4 |
| TERRA_M-T | Mesmo dia | 7 | 6 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 9,9 |
| | +/- 1 dia | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 | 3 | 4 | 4 | 1 | 6,3 |
| | >1 dia | 12 | 20 | 15 | 24 | 26 | 23 | 26 | 28 | 37 | 83,7 |

interior das regiões analisadas. Outros tipos de superfícies existentes em áreas urbanizadas poderiam ter efeito semelhante. Contudo, não é descartada a possibilidade de subatendimento e sub-registro por parte das brigadas de combate. Mesmo com a existência de outros grupamentos que não os que tiveram os dados analisados neste trabalho, dificilmente o efetivo seria capaz de atender a todas as ocorrências acontecidas no período, ocorrências essas que podem ter sido as causas desses FC sem confirmação em campo. Isso traria uma estimativa de queimadas maior do que as 1,42 queimadas/km² na área urbana e 0,40 queimadas/km² no raio de 1km confirmadas pelos relatórios de ocorrência de incêndios.

Considerações finais

Cada sensor e método de detecção tem sua característica própria, que torna-o mais adequado para certos tipos de uso. O usuário é quem deve determinar qual a melhor ferramenta para atender às suas necessidades (MORISSETTE et al., 2005).

Apesar dos focos de calor serem uma das poucas ferramentas amplamente difundidas para o monitoramento de queimadas e incêndios, eles não mostraram viabilidade de uso para avaliação dos eventos que ocorrem em áreas urbanizadas e no entorno. Uma proporção muito grande dos eventos não é detectada, o que subestima a real dimensão dos problemas oriundos da combustão da vegetação nessas regiões. Além da pequena capacidade de registro, há de se destacar os erros que podem ser induzidos pela utilização dos focos de calor sem a respectiva confirmação em campo. Essas restrições evidenciam a fragilidade da utilização de dados com escala inapropriada em sistemas de monitoramento, fragilidade essa que pode ser dimensionada neste trabalho.

A grande quantidade de focos de calor não confirmados em campo sugere a necessidade de mais estudos, visto a existência de diversos fatores a serem esclarecidos, como: possibilidade de subatendimento das equipes de combates às ocorrências; melhor entendimento da dinâmica de queima e registro de focos; possibilidade de erros de comissão no registro dos focos de calor. Uma avaliação rigorosa da acurácia contribuiria para identificar erros sistemáticos e representa uma ferramenta valiosa para a melhoria do processo (POWELL et al., 2004) e do aperfeiçoamento tecnológico do monitoramento de queimadas (Morissette & Khoram, 2000). Desta forma, são diversos fatores que interferem na detecção remota de incêndios florestais (JAISWAL et al., 2002).

Por fim, estudos nessa linha contribuem para a avaliação, direcionamento e adequação das políticas públicas e ações de monitoramento e combates aos incêndios florestais. Existe clara necessidade de desenvolvimento e aprimoramento de recursos adequados ao estudo de queimadas principalmente no que concerne a áreas urbanizadas e arredores.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Tocantins e à Superintendência do IBAMA no Tocantins pelo apoio no desenvolvimento dos estudos.

Referências

Antunes MAH. Uso de satélites para detecção de queimadas e para avaliação do risco de fogo. *Ação Ambiental*. 2000; 12:24-27.

Boschetti L, Flasse SP, Brivio PA. Analysis of the conflict between omission and commission in low resolution dichotomic thematic products: The Pareto Boundary. *Remote Sensing of Environment*. 2004;91:280-292.

Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Tocantins (CEDEC). Boletins Meteorológicos Período de Estiagem. 2016. Available from: <http://defesacivil.to.gov.br/boletins-meteorologicos-periodo-de-estiagem/>. Accessed: 2016 março 27.

Crutzen PJ, Andreae MO. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*. 1990;250:1669-1678.

Foody GM. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*. 2002;80:185-201.

Foody GM. Harshness in image classification accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*. 2008;29(11):3137-3158.

Gomes C. Geotecnologias da informação e remodelação do espaço urbano-regional: os sistemas de informação geográfica. *Interface*. 2006; (3): 7-28.

Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Manual do brigadista. 2010. 15 p.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO). Impactos do fogo na vegetação do Planalto do Itatiaia. Relatório técnico. 2007. 17 p.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Portal de Monitoramento de Queimadas e Incêndios. 2012. Available from: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>. Accessed: 2013 novembro 27.

Jaiswal RK, Mukherjee S, Raju KD, Saxena R. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2002;4:1-10.

- Jesus SC, Setzer AW, Morelli F. Validação de focos de queimadas no Cerrado em imagens TM/LANDSAT-5. In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011 Abril 30-Maio 5; Curitiba, Brasil. p. 8051-8058.
- Justino FB, Souza SS, Setzer A. A relação entre focos de calor e condições meteorológicas no Brasil. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002; Foz do Iguaçu, Brasil. p. 2086-2093. Available from: <http://www.cbmet.com/cbm-files/11-c89e8a4e7b3271429a0456aaa5367981.pdf>.
- Lazzarini GMJ, Ferreira LC C, Felicíssimo MFG, Lira RG, Justino AG, Gomes C, et al. Análise da distribuição de focos de calor no Tocantins entre 2002 e 2011. *Interface*. 2012;(5):24-35.
- Martinez LL, Fiedler NC, Lucatelli GJ. Análise das relações entre desflorestamento e focos de calor. Estudo de caso nos municípios de Altamira e São Félix do Xingu, no Estado do Pará. *Árvore*. 2007;31(4):695-702.
- Morisette JF, Giglio L, Csiszar I, Setzer A, Schroeder W, Morton D. et al. Validation of MODIS active fire detection products derived from two algorithms. *Earth Interactions*. 2005;9:1-25.
- Pereira AA, Pereira JAA, Morelli F, Barros DA, Acerbi Júnior FW, Scolforo JRS. Validação de focos de calor utilizados no monitoramento orbital de queimada por meio de imagens TM. *Cerne*. 2012;18(2):335-343.
- Piromal RAS, Rivera-Lombardi RJ, Shimabukuro YE, Formaggio AR, Krug T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. *Acta Amazonica*. 2008;38(1):77-84.
- Powell RL, Matzke N, Souza Jr C, Clark M, Numata I, Hess LL, et al. (2004). Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*. 2004;90:221-234.
- Razafimpanilo H, Frouin R, Iacobellis SF, Somerville RCJ. Methodology for estimating burned area from AVHRR reflectance data. *Remote Sensing of Environment*. 1995;54:273-289.
- Ribeiro H, Assunção JV. Efeitos das queimadas na saúde humana. *Estudos Avançados*. 2002;16(44):125-148.
- Schroeder W, Prins E, Giglio L, Csiszar I, Schmidt C, Morisette J, et al. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(5):2711-2726.
- Secretaria de Planejamento do Estado do Tocantins (SEPLAN). Base vetorial. 2012. Available from: <http://www.seplan.to.gov.br/Portal/governo/geo/bases-vetoriais>. Accessed: 2012 maio 7.
- Setzer AW. Operational satellite monitoring of fires in Brazil. *International Forest Fire News*. 1993;9:8-11.
- Setzer AW, Pereira MC, Pereira AC. O uso de satélites NOAA na detecção de queimadas no Brasil. *Climanálise*. 1992;7(8):40-53.
- Setzer AW, Pereira MC, Pereira AC. Satellite studies of biomass in Amazonia – some practical aspects. *Remote Sensing Reviews*. 1994;10:91-103.
- Sismanoglu RA, Setzer A, Justino F, Lima WFA. Avaliação inicial do desempenho do risco de fogo gerado no CPTEC. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002; Foz do Iguaçu, Brasil. p. 1991-1999. Available from: <http://www.cbmet.com/cbm-files/11-ff3a330a1c978afa7fb42940745768e5.pdf>.
- Tomzhinski GW, Coura PHF, Fernandes MC. Avaliação da detecção de focos de calor por sensoriamento remoto para o Parque Nacional do Itatiaia. *Biodiversidade Brasileira*. 2011;1(2):201-211.
- Vettorazzi CA, Ferraz SFB. Uso de sistema de informações geográficas aplicados à prevenção e combate a incêndios em fragmentos florestais. *Série Técnica IPEF*. 1998; 12(32): 11-115.