

Acurácia dos sensores AVHRR, GOES e MODIS na detecção de incêndios florestais e queimadas a partir de observações aéreas no estado do Acre, Brasil

Nara Vidal Pantoja^{1,2}
Irving Foster Brown^{1,3}

¹ Universidade Federal do Acre, Parque Zoobotânico, Setor de Estudos do Uso da Terra e Mudanças Globais - UFAC/PZ/SETEM
Caixa Postal 500 - 69915-900 - Rio Branco - AC, Brasil
nvpantoja@yahoo.com.br

² Universidade Federal do Acre, Departamento de Ciências Agrárias, Curso de Engenharia Florestal – UFAC/DCA/ENGF e Departamento de Geografia, Laboratório de Geoprocessamento – UFAC/DEGEO/LAGEOP
Caixa Postal 500 - 69915-900 - Rio Branco - AC, Brasil

³ Woods Hole Research Center - WHRC
Caixa Postal 296 - 02543 - Woods Hole - MA, Estados Unidos
fbrown@uol.com.br

Abstract. Hot pixels are an important indicator for analysis of wild fires in the Amazon. A severe drought in 2005 resulted in numerous such fires in eastern Acre, Brazil. Georeferenced oblique aerial photos of 171 fires in open areas (57) and in forests (118) from nine overflights during late September and early October 2005 were compared with hot pixels generated from the AVHRR, GOES and MODIS sensors. No inclusion errors were observed and an aggregate omission error of 65% occurred for open area fires, using the combined sensors. GOES-12 had the highest detection rate of 28% of the observed open area fires, followed by MODIS (16%, U. of Maryland) and NOAA-12 (12%). Only 4% of aggregated hot pixels were associated with forest fires; these fires go essentially undetected. For similar situations as eastern Acre where small producer fires dominate, a rough estimate of the number of open area fires would be to double the sum of all hot pixels of the three sensors.

Palavras-chave: accuracy, fire detection, satellites products, Amazon, acurácia, detecção de fogo, produtos de satélites, Amazônia.

1. Introdução

As queimadas ocorrem tradicionalmente na região Amazônica todos os anos e tem se tornado uma atividade cada vez mais preocupante devido à variabilidade climática que altera o padrão de chuvas na região. Em 2005, a Amazônia Ocidental sofreu uma seca prolongada que propiciou grandes queimadas em áreas abertas e incêndios florestais, atingindo mais de 400.000 ha no leste do Acre Brown et al. (2006a,b).

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) produz diariamente dados críticos para a detecção de queimadas, riscos de fogo e previsão de chuvas (<http://www.cptec.inpe.br>). Em 2005, estes dados foram usados diariamente para direcionar equipes de bombeiros da Coordenadoria Estadual de Defesa Civil durante a Situação de Emergência decretada pelo governador do Acre ao longo da segunda quinzena de setembro e primeira quinzena de outubro Brown et al. (2006a). O interesse do público em tais informações aumentou desde 2005, dado que a estação de seca prolongada e o nível do Rio Acre mais baixo dos últimos 34 anos tornaram as florestas da região susceptíveis ao fogo.

A verificação *in situ* de eventos de fogo gera informações para validar os produtos de detecção de queimadas disponibilizados pelo CPTEC derivados a partir dos sensores satelitais Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) e Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). A acurácia das estimativas de fogo é importante para a credibilidade dessas informações, não apenas para Defesa Civil como também para os profissionais da mídia e representantes de governo que cada vez mais têm utilizado essa informação na tomada de decisões. A validação permite estimar a quantidade de queimadas que os diferentes sensores conseguem detectar. Pantoja et al. (2005) concluíram que dados de detecção de fogo dos sensores NOAA-12, NOAA-16, GOES-12 e MODIS, quando analisados individualmente, subestimaram entre 92 a 100% os eventos de queimadas observados durante um estudo de caso envolvendo 38 observações no ano de 2004.

Neste artigo, devido ao desastre de queimadas e incêndios em 2005, procura-se responder as seguintes perguntas: a) qual a acurácia na detecção de queimadas em áreas abertas e de incêndios florestais por diferentes sensores? b) qual é a confiabilidade dos focos de calor derivados de sensores orbitais para fins de monitoramento e combate aos incêndios florestais e queimadas? As hipóteses *a priori* são: o número de focos de calor subestimaria o de queimadas, pois no Acre a maioria destas é de dimensões menores do que um *pixel* do NOAA (1 km x 1 km ou 100 ha), por exemplo, e que os incêndios florestais são de difícil detecção devido a sua forma linear abaixo da copa da floresta.

2. Conceitos Empregados

A queimada é uma prática agropastoril ou florestal que usa a queima controlada como instrumento de produção e o incêndio florestal é qualquer fogo sem controle que incide sobre a vegetação Ferreira et al. (2005).

A rapidez e a eficiência na detecção e monitoramento dos incêndios florestais são fundamentais para a viabilização do controle do fogo, a redução dos custos nas operações de combate e atenuação dos danos. Além disso, um conhecimento inadequado da localização do incêndio e extensão da área queimada prejudica a estimativa do impacto do fogo sobre o ambiente Batista (2004).

Para comparar focos de calor e queimadas/incendios é importante ressaltar que estes são variáveis em tamanho e formato. No caso do Acre, as observações de sobrevôos indicam que a grande maioria de queimadas é de poucos hectares, típica de corte e queima de pequenos

produtores rurais. Neste caso, um pixel de um foco de calor pode teoricamente incluir várias queimadas.

Ocasionalmente, as queimadas são de dimensões de centenas de hectares. Neste caso, os focos de calor podem ser múltiplos para um evento de queimada. Os incêndios florestais podem ser de pequenas dimensões (dezenas a centenas de metros num formato alongado) ou extensivo de um quilômetro ou mais. Estes tendem a ocorrer abaixo da copa da floresta que impede a visibilidade das chamas.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado no leste do estado do Acre que abrange 11 municípios (**Figura 1**) e cobre cerca de 38.000 km² (Brown et al. 2006b) onde a maioria dos focos de calor é normalmente observada. Nesta região foram realizados dez sobrevôos de avião e helicóptero durante os meses de setembro e outubro de 2005, sendo registradas ocorrências de queimadas e incêndios florestais com uso de aparelhos receptores de Sistema de Posicionamento Global (GPS) e fotografias.

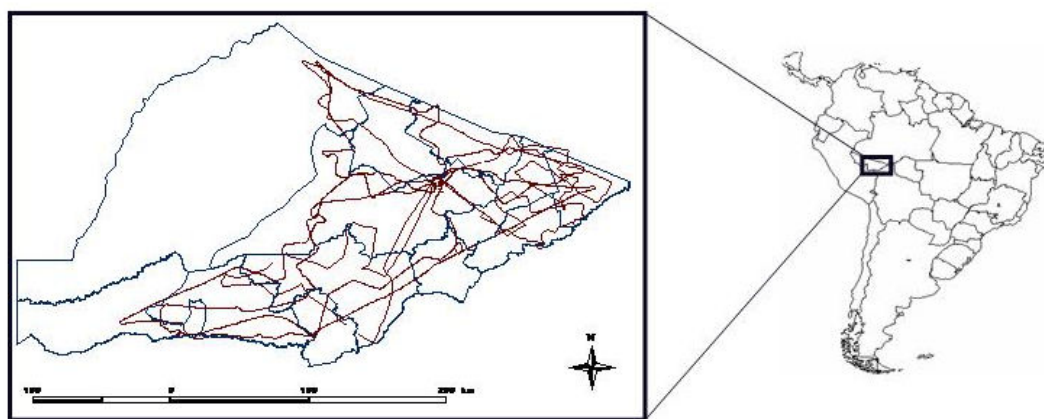


Figura 1. Localização da área de estudo. Limites municipais da região leste do estado do Acre, com a rota percorrida pelas aeronaves durante realização dos sobrevôos nos 11 municípios (em vermelho, *track* do GPS).

2.2. Uso de sensores na detecção de focos de calor

Atualmente, há vários sensores orbitais e aéreos que podem ser usados para a detecção de queimadas. Como estes sensores se baseiam em emissões de radiação termal, os eventos de alta emissão desta radiação são chamados de focos de calor, porque nem sempre a fonte desta radiação é uma queimada.

Durante a detecção podem ocorrer erros de omissão, que se refere às queimadas que aconteceram e o satélite não as identificou como focos de calor. Enquanto o erro de inclusão ou comissão diz respeito aos focos de calor detectados quando na realidade não houve nenhuma queimada Pantoja et al. (2005b).

Neste artigo foram considerados três sensores para validar focos de calor: AVHRR, dos satélites da série NOAA, MODIS, a bordo dos satélites TERRA e AQUA, e GOES-12. Os dados do MODIS são tratados com algoritmos diferentes pelo INPE e pela Universidade de Maryland, de modo que são denominados neste trabalho de MMODIS. Esporadicamente falta cobertura total para esta região com a exceção do GOES-12, o único em órbita geostacionária.

A falta esporádica de cobertura pelos satélites também ocorre em outras regiões do País. Um exemplo foi apontado pelo Dr. Alberto Setzer (com. pessoal), referente ao dia 10 de junho de 2004, no estado do Mato Grosso (S 12°27', W56°56') quando uma queimada resultou em 147 focos do NOAA-12, 41 do GOES-12, 17 do NOAA-16 e nove do Aqua, porém nenhum do sensor MODIS. Casos similares podem ser encontrados para os outros satélites.

2.2.1. Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)

A utilização das técnicas de sensoriamento remoto no monitoramento de queimadas no País iniciou-se no INPE através de um sistema operacional de queimadas que utilizam dados do sensor Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration AVHRR/NOAA Krug et al. (1997).

O AVHRR é um dos sensores a bordo dos satélites da série NOAA, estes possuem órbita polar, resolução espacial de 1,1 km e usa a banda infravermelha (3,7 μm) para detecção. Cobre o Acre no final da tarde (20 – 22 UTC).

2.2.2. Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)

O GOES possui órbita geoestacionária e é usado operacionalmente para a detecção e o acompanhamento de incêndios em grandes áreas da superfície do globo. Os seus sensores operam em diferentes canais espectrais, de modo que para detecção de queimadas é na região do infravermelho (3,8 a 4,0 μm , 10,2 a 11,2 μm , 11,5 a 12,5 μm), com resolução espacial de 4 km (França, 2004).

Considera-se queimada qualquer píxel com albedo (refletividade) menor que 3%, com temperatura de brilho no canal 2 maior que 308 K (35°C) e no canal 4 maior que 263 K (-10°C), e com a diferença destas temperaturas maior que 16 K (16°C) Setzer e Yoshida (2004).

2.2.3. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

O MODIS é um dos sensores a bordo dos satélites TERRA e AQUA. A órbita do satélite TERRA está cronometrada de modo que passe do norte ao sul através do Equador de manhã, e o AQUA, do sul ao norte sobre o Equador no período da tarde. Ambos os satélites imageiam a superfície da terra inteira a cada 1 a 2 dias, adquirindo dados em 36 faixas espectrais com resolução espacial de 1 km EMBRAPA - Monitoramento por Satélites (2006).

2.3. Método adotado nos sobrevôos

Foram usados dados de nove sobrevôos que foram realizados em um monomotor que sobrevoava a uma velocidade de 180 a 200 km/h numa altitude de 700 a 1000 m. Para facilitar o registro das fotografias foi tirada a porta do lado bombordo, portanto a maioria das fotos é oblíqua na direção de 200 a 270° em relação à linha do vôo que foi georreferenciada usando unidades de GPS modelo Garmin 12 XL. A maioria das fotos foi tirada com uma máquina digital de dois megapixel, modelo Olympus D-520 Zoom (**Figuras 2 e 3**).

Figura 2. Fotografia aérea de um incêndio florestal registrado no dia 05 de outubro de 2005. Coordenadas geográficas: 09,898° S e 68,115° W, orientação Sul. Foto: Foster Brown.



Figura 3. Fotografia aérea de uma queimada em pasto no dia 13 de outubro de 2005. Coordenadas geográficas: 10,934° S e 69,266° W, orientação Norte. Foto: Mauro Maciel.



A decisão sobre quais fotografias e respectivos pontos utilizar neste estudo baseou-se na escolha a partir da visualização dos eventos de fogo registrados. Foi definido o número de observações para este estudo ($n=175$) a partir de uma seleção, escolhendo fotografias em que as chamas ou fumaça foram visíveis de dentro de 1 km do avião, sendo visualmente classificadas em eventos tipo 1 - fogo em áreas abertas (pasto, derrubada e roçados), definidas neste estudo como queimadas e eventos tipo 2 - fogo ou mais tipicamente fumaça em áreas de florestas, chamados de incêndios florestais.

2.4. Processamento e análise dos dados

Foram criados círculos em torno de cada foco de calor (buffers) apresentando raios de dimensões determinadas conforme a resolução espacial dos sensores. Para fazer verificação do georreferenciamento das fotografias aéreas foram usadas imagens oriundas de Google Earth que podem ser orientadas na mesma perspectiva das fotografias. A superposição de dados terrestres do GPS nestas imagens mostrou que o erro de posicionamento das imagens de Google Earth foi <200 m na região leste do Acre. Devido à velocidade do avião e o tempo

variável de marcar um ponto de GPS para as fotografias, foi estimado um erro de posicionamento das fotografias aéreas como < 1 km.

Analisou-se também a possibilidade de erros de inclusão, isto é, focos de calor sem uma queimada ou incêndio registrado, por meio da superposição dos *tracks* dos sobrevôos – assumindo uma detecção de 100% de queimadas/incêndios a uma faixa de ± 1 km do *track*. Assim, foi possível observar alguns focos nesta faixa sem registro de queimadas, por exemplo, dois focos do GOES-12 no dia 28 de setembro de 2005, mas subsequentemente concluiu-se que foram focos registrados depois da passagem do avião no mesmo dia. Não se notou erros de inclusão nos *tracks* analisados.

3. Resultados e Discussão

A partir das observações nos sobrevôos foi possível obter dados para validar os sensores AVHRR, GOES e MODIS, comparando a detecção dos diferentes sensores para incêndios florestais e queimadas. A **Tabela 1** mostra os 175 registros que foram usados na validação.

Tabela 1. Incêndios florestais e queimadas georreferenciados em nove sobrevôos, sendo que no dia 13 de outubro foram realizados dois sobrevôos. Data dos sobrevôos no formato *aaaa/mm/dd*.

Data do sobrevôo	Número de observações	
	Incêndios florestais	Queimadas
20050928	09	02
20051003	02	-
20051004	09	13
20051005	48	17
20051007	01	-
20051008	06	04
20051011	06	06
20051013	37	15
Total por classe	118	57
Total	175	

Os incêndios listados acima foram observados na floresta a partir da presença de fumaça e queimadas a partir de fumaça e chamas em áreas abertas. Somente 4% dos incêndios florestais foram detectados pelos satélites (**Tabela 2**). Os erros de omissão para incêndios florestais foram em torno de 90 a 100%, todos os satélites apresentaram pouco ou nenhum foco correspondente aos incêndios observados no período.

Tabela 2. Observações de incêndios florestais comparados com focos de calor de diferentes satélites. O total detectado (%) se refere ao número de focos detectados por cada satélite em relação ao número de incêndios observados nas diferentes datas de sobrevôos. As colunas com data referem-se às observações durante os sobrevôos e as linhas dos satélites referem-se aos focos associados aos incêndios. Total se refere a porcentagem de focos detectados em relação ao número de incêndios observados.

	Data dos sobrevôos								Soma	Total
	28/09	3/10	4/10	5/10	7/10	8/10	11/10	13/10		
Incêndios observados	9	2	9	48	1	6	6	37	118	

Incêndios detectados	0	0	1	0	0	0	2	2	5	
Incêndios não detectados	9	2	8	48	1	6	4	35	113	
Total detectado (%)	0%	0%	11%	0%	0%	0%	33%	5%	4%	
GOES-12	0	0	1	0	0	0	2	8	11	9%
MMODIS	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1%
NOAA-12	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1%
AQUA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
TERRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%

Em contraste com os incêndios florestais que estão mascarados em parte pelas copas das árvores, as queimadas em áreas abertas foram mais fáceis de observar. Em alguns casos, mais de um satélite detectou uma queimada que teoricamente poderia resultar em ter mais focos do que queimadas. Notou-se que em vários casos, dois ou três satélites tiveram focos associados a uma só queimada. Das 57 queimadas observadas, somente 20 (35%) foram detectadas por um ou mais satélites. Conseqüentemente, o erro de omissão foi 65%.

Em alguns casos, focos de dois ou três satélites foram associados com uma queimada. Por exemplo, no dia 28/09 focos do GOES-12 e de MMODIS foram associados a uma queimada. Neste caso, a proporção da soma do número de focos ao número de queimadas foi 150%. No entanto, os erros de omissão foram tão grandes que na média, a soma de focos de calor destes satélites foi somente 60% das queimadas observadas. Isto significa que mesmo usando a soma de todos os satélites, só um pouco mais do que a metade de queimadas está sendo detectada. Estes dados sugerem que multiplicando os focos de calor por um fator de dois haveria uma estimativa de queimadas em situações semelhantes às áreas observadas.

O satélite GOES-12 apresentou maior detecção das queimadas observadas no período (28%), cerca de um foco para cada quatro queimadas, seguido por MMODIS (16%), NOAA-12 (12%), AQUA (4%), enquanto que TERRA não detectou nenhuma das queimadas. Estes dados são consistentes com as observações de Pantoja et al. (2005) que notaram erros de omissão de 70 a 100%.

Tabela 3. Observações de queimadas comparadas com focos de calor de diferentes satélites. As colunas referem-se às observações de queimadas durante os sobrevôos e as linhas referem-se aos focos registrados pelos diferentes satélites. Às vezes focos de dois ou três satélites coincidiram com a queimada. Porém a maioria das queimadas observadas nos sobrevôos não foi detectada pelos satélites.

	Data dos sobrevôos							Soma	% Total
	28/09	4/10	5/10	8/10	11/10	13/10			
Queimadas observadas	2	13	17	4	6	15	57		
Queimadas detectadas	2	5	5	1	4	3	20		
Queimadas não detectadas	0	8	12	3	2	12	37		
Total detectado (%)	100%	38%	29%	25%	67%	20%	35%		
GOES-12	1	3	5		4	3	16	28%	
MMODIS	2	4	2	1	-	-	9	16%	
NOAA-12	-	3	2	-	2	-	7	12%	
AQUA	-	1	1	-	-	-	2	4%	

4. Conclusão

As análises mostraram que os satélites subestimam o número de incêndios florestais e queimadas no Acre e o uso de múltiplos satélites aumenta a possibilidade de detecção destes. Mesmo somando focos de todos os satélites este estudo mostrou uma subestimativa de número de queimadas e não foi observado nenhum erro de inclusão. O satélite GOES-12 apresentou maior detecção (28%) das queimadas, seguido por MMODIS (16%) e NOAA-12 (12%). Somente 4% de focos de calor foram associados aos incêndios florestais. Os incêndios são dificilmente detectados por todos os satélites. Isto sugere que novas abordagens precisam ser desenvolvidas para poder detectar a ocorrência de incêndios em florestas semelhantes as do Acre.

5. Agradecimentos

Ao apoio institucional do IMAC, IBAMA e Defesa Civil por conceder participação nos sobrevôos. Ao CNPq/Pibic, LBA (LC-02), LBA-ECO, USAID e Fundação Moore pelo apoio financeiro dos autores. Aos servidores do IMAC: Cynara França, Fernando Lima, Ivo Sena e Rodrigo Serrano; à equipe do SETEM e Laboratório de Geoprocessamento: Clarice Farias, Cláudio Cavalcante, Gilmara Ferreira, Giovano Domingos, Karla Rocha, Larissa Saraiva, Luis André Correa, Mônica De Los Rios, Renata Abreu, Diogo Selhorst (IBAMA-AC), Capitão Batista (Corpo de Bombeiros) e Mauro Maciel (SECOM) pela contribuição nos sobrevôos e edição das fotografias; ao Wilfrid Schroeder (Universidade de Maryland) e Alberto Setzer (INPE) pela discussão e fornecimento de informações.

Referências

- Batista, A. C. Detecção de Incêndios Florestais por Satélites. **Revista FLORESTA** 34 (2), Mai/Ago, 2004, 237-241, Curitiba, PR.
- Brown, I. F., Schroeder, W., Setzer A., Maldonado, M. J. R., Pantoja, N., Duarte, A. F., Marengo, J. Monitoring fires in Southwestern Amazônia rain forest. EOS, **Transaction American Geophysical Union**, 87 (26): 253-264, 2006a.
- Brown, I. F., Moulard, E. M. N. P., Nakamura, J., Schroeder, W., Maldonado, M. j. R., Vasconcelos, S. S., Serlhost, D. **Relatório preliminar do mapeamento de áreas de risco para incêndios no leste do Estado do Acre**. (UFAC/FUNTAC). Rio Branco, Brazil, 20p., 2006 b.
- EMBRAPA - Monitoramento por satélites. Disponível em: <<http://www.sat.cnpem.embrapa.br/texto/princ.html>> Acesso em: 09 out. 2006.
- Ferreira, D. A. C., Trancoso, R., Nogueira, S. P., Filho, A. C. O uso dos focos de calor imageados pelo satélite NOAA-AVHRR para identificação das áreas em processo de desflorestamento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 2145-2142. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.21.16/doc/3215.pdf>> Acesso em: 11 out. 2006.
- Pantoja, N.V., Selhorst, D., Rocha, K. da S., Lopes, F.M. da C., Vasconcelos, S.S. de & Brown, I.F. Observações de queimadas no leste do Acre: subsídios para validação de focos de calor derivados de dados de satélites. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3215-3222. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.21.16/doc/3215.pdf>> Acesso em: 23 out. 2006.
- Setzer, A., Yoshida, M. C. **Detecção de Queimadas nas Imagens do Satélite Geostacionário GOES-12**. Relatório Técnico, Versão 3.4, 03/Março/2004. DSA / CPTEC / INPE. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/queimadas/documentos/relat_goes.htm> Acesso em: 03 nov. 2006.