

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/6: 1131-1143
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MONITORAMENTO DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL APÓS EXTINÇÃO DO FOGO E UMA PROPOSTA PARA A DETECÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS EM VEGETAÇÃO CAMPESTRE DE CERRADO

*Monitoring of Spectral Reflectance after Fire Extinction and a Detection Proposal
of Burned Areas in a Grassland Vegetation in Cerrado*

**Otávio Augusto de Araujo Pessoa; Gustavo Macedo de Mello Baptista;
Tati de Almeida & Paulo Roberto Meneses**

**Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências – IGD**

Campus Universitário Darcy Ribeiro, ICC - Ala Central, CEP 70.910-900, Caixa Postal 04465, Brasília - Brasil
otaviogeaunb@gmail.com, {gmbaptista, pmeneses, tati_almeida}@unb.br

*Recebido em 11 de Março, 2014/ Aceito em 10 de Maio, 2015
Received on March 11, 2014/ Accepted on May 10, 2015*

RESUMO

A efemeridade dos indícios da ocorrência de incêndios florestais no Cerrado dificulta a identificação, por meio de imagens de sensoriamento remoto, das áreas afetadas, restringindo esta identificação às queimadas mais recentes e forçando a utilização de imagens com baixa resolução espacial e alta resolução temporal. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo monitorar a reflectância espectral de uma área queimada formada por vegetação campestre no Cerrado, a fim de identificar a existência de indicadores que pudessem ser utilizados na elaboração de um método capaz de identificar, de forma automatizada, as áreas queimadas, especialmente as mais antigas. Para tanto, a evolução do comportamento espectral da área de estudo foi acompanhada por meio de espectrorradiometria de campo. Por meio dos espectros reamostrados para as configurações do sensor TM foi possível identificar padrões em sua evolução temporal, padrões estes que foram utilizados na elaboração de um método de identificação de queimadas baseado no índice *NDVI*. O método foi aplicado na classificação de uma imagem TM (órbita/ponto 221/071) referente a dia 09 de outubro de 2010 (final da temporada de queimadas), a fim de permitir uma avaliação a respeito da potencialidade do método. O método proposto apresentou resultados significativos, apresentando altos índices de acerto para queimadas com diferentes idades, inclusive para queimadas ocorridas há mais de 90 dias. Diante dos bons resultados obtidos para a área de estudo, novos estudos aplicando o mesmo método, em outras áreas de Cerrado, podem ser realizados a fim de averiguar a validade e confiabilidade do método para a identificação de áreas queimadas em fitofisionomias campestres do Cerrado.

Palavras chave: Comportamento Espectral, Incêndios Florestais, Vegetação Campestre, Espectrorradiometria de Campo.

ABSTRACT

The ephemeral nature of the evidences of the occurrence of forest fires in Cerrado hinders the identification, by remote sensing imagery, of the burned areas, restricting the identification of oldest burned areas and forcing the use of images with low spatial resolution and high temporal resolution. Thus, this study aimed to monitoring the spectral reflectance

of a burned area covered by grassland vegetation, in order to identify the existence of indicators that could be used in developing method able to identify burned areas, specially the oldest burned areas. Therefore, the evolution of the spectral behavior of the study area was monitored by field spectroscopy. Through the spectra resampled to the settings of TM sensor was possible to identify patterns in their evolution. These patterns were used in development of a method of identifying burned areas based on NDVI index. The method was applied to the classification of a TM image (path/row 221/071) from 09 October 2010 (end of the burning season) in order to allow an evaluation regarding the potential of the method. The proposed method showed significantly results, with high levels of accuracy for fires with different ages, including fires with more than 90 days old. Considering the good results obtained for the study area, new studies using the same method could be performed in other Cerrado areas to ascertain the validity and reliability of the method for the identification of burned areas in grassland of the Cerrado.

Keywords: Spectral Behavior, Forest Fires, Grassland Vegetation, Field Spectroscopy.

1. INTRODUÇÃO

Diante dos impactos causados pelos incêndios florestais em diferentes ecossistemas do planeta, muitos esforços têm sido empregados com o intuito de melhorar a compreensão a respeito destes eventos. Neste sentido, o sensoriamento remoto, devido a temporalidade de aquisição dos dados, tem se mostrado uma excelente ferramenta (CHUVIECO *et al.*, 2002; CHUVIECO *et al.*, 2005; FRANÇA, 2000).

Dentre as contribuições do sensoriamento remoto está o mapeamento das áreas afetadas. A partir do conhecimento da extensão de uma área afetada por incêndio florestal, torna-se possível a estimativa da quantidade de biomassa queimada, e conseqüentemente, a da emissão de gases provenientes da queima (EVA & LAMBIN, 1998; ISAEV *et al.*, 2002; ZHANG *et al.*, 2003; PEREIRA, 2003). Além disso, a identificação da área afetada torna possível a verificação, pixel a pixel, das alterações causadas pelo fogo, possibilitando, desse modo, análises robustas, tais como a estimativa do grau de severidade dos incêndios (ESCUIN *et al.*, 2008; MILLER & THODE, 2007; ROY *et al.*, 2006).

No caso do Cerrado, assim como na maioria das savanas tropicais, a rápida remoção das cinzas negras, oriunda da queima completa da biomassa, e brancas, queima incompleta da biomassa, e do carvão provenientes da queima (PEREIRA, 2003; FRANÇA, 2000; MAILLARD *et al.*, 2009), bem como o rápido processo de rebrota da vegetação, faz com que os indícios da ocorrência do fogo sejam rapidamente atenuados ou eliminados, alterando o comportamento espectral típico de uma

queimada e dificultando sua identificação por meio do sensoriamento remoto.

As alterações no comportamento espectral das áreas queimadas, verificadas ao longo do tempo, fazem com que o tempo decorrido desde o momento da ocorrência do incêndio até o momento do imageamento da área afetada, seja crucial para o bom desempenho de metodologias dependentes do comportamento espectral típico de uma queimada. De modo geral, quanto maior a defasagem temporal entre a ocorrência do incêndio e o imageamento da área, menor é a probabilidade de que a área queimada seja identificada (CORONA *et al.*, 2008), podendo resultar em erros de omissão no mapeamento de áreas queimadas (HUDAK & BROCKETT, 2004), gerando dados subestimados. Este problema é ainda mais sério no caso das savanas, pois devido à maior efemeridade dos sinais da ocorrência dos incêndios nestes contextos, o bom desempenho da identificação de áreas queimadas se torna dependente de imageamentos frequentes (PEREIRA, 2003).

No entanto, essa dependência de imageamentos frequentes representa uma limitação, pois sensores capazes de prover imagens com alta repetitividade, tais como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) possuem baixa resolução espacial, inviabilizando a realização de mapeamentos de queimadas em escalas mais detalhadas e, conseqüentemente, inviabilizando a realização de estimativas mais acuradas em relação aos impactos causados pelo fogo.

Por outro lado, a utilização de imagens de média resolução tais como a TM (*Thematic*

Mapper) ou OLI (*Operational Land Imager*), apesar de apresentar uma resolução espacial satisfatória, apresentam resolução temporal relativamente baixa, de 16 dias, tempo que pode ser suficiente para que os indícios da ocorrência de uma queimada tenham sido eliminados ou atenuados, dificultando a identificação da área afetada (LOPES DA SILVA & BAPTISTA, 2015).

Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo monitorar a reflectância espectral após a extinção do fogo e propor uma metodologia de detecção de áreas queimadas em formação campestre de cerrado possibilitando a utilização em imagens de média resolução temporal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração do presente estudo foi selecionada uma área queimada no DF e foram adotadas as etapas metodológicas descritas a seguir.

2.1 Área de Estudo

A espectrorradiometria de campo foi realizada em uma área queimada com cerca de 3,5 hectares de extensão, localizada na região central do Distrito Federal (Figura 1) e formada por vegetação campestre. A escolha pela fitofisionomia campestre foi motivada pela impossibilidade de se elevar o espectrorradiômetro à altura da copa de formações arbóreas.

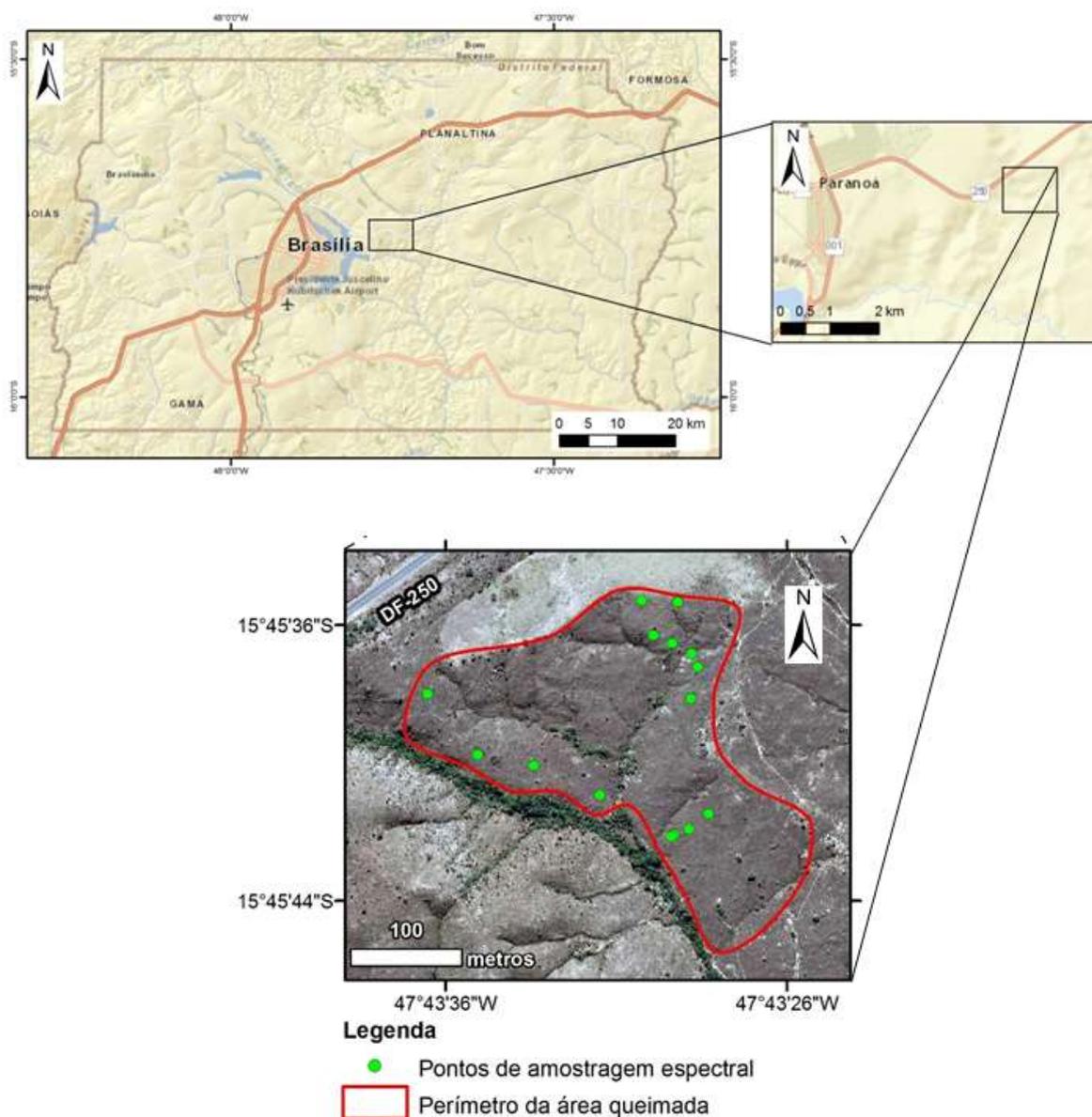


Fig. 1 – Localização da área de estudo e pontos amostrados.

2.2 Espectrorradiometria de campo

Os levantamentos de campo foram realizados com o espectrorradiômetro *FieldSpec® 3 (Analytical Spectral Devices – ASD)*, o qual é capaz de coletar a radiação eletromagnética na faixa entre 350nm e 2500nm, cobrindo praticamente toda a região óptica do espectro eletromagnético, com resolução espectral de 1,4nm na faixa espectral entre 350 e 1000nm e de 2nm na faixa espectral entre 1000 e 2500nm.

Todas as medidas de campo foram realizadas com visada a nadir, sendo que durante todas as medições, o sensor foi posicionado a cerca de 1,5 metro acima da superfície, distância que, em conjunto com a abertura angular de 25° do sensor, permitia o levantamento de uma área de, aproximadamente, 70 cm de diâmetro.

O horário de coleta dos dados foi definido próximo ao horário de passagem das dos satélites da série Landsat (aproximadamente 11:00), a fim de manter a semelhança nas condições de iluminação nos dados de campo e nas imagens, no entanto, para se obter uma amostragem mais detalhada, o horário das coletas estendeu-se até às 14 horas.

Em virtude da forte absorção da radiação eletromagnética pelo vapor d'água nas bandas centradas em 1400 e 1900nm e pelas características do espectrorradiômetro gerar fortes ruídos na região espectral acima

de 2400nm, as radiâncias espectrais obtidas foram consideradas ruídos e não permite a determinação da reflectância da superfície *in situ*. Assim, os dados referentes a essas regiões foram desconsiderados, mais precisamente os dados entre 1340 e 1425nm, entre 1790 e 1960nm e entre 2400 e 2500nm.

A coleta dos dados foi realizada no dia 07 de agosto (dois dias após a extinção do fogo) e nos dias 14 e 27 de agosto, 17 de setembro e 10 de outubro de 2012, compreendendo um intervalo de pouco mais de dois meses de acompanhamento.

No primeiro dia de levantamento foram escolhidos 15 pontos de amostragem para a coleta de espectros, sendo um desses pontos, referente ao substrato da região. A escolha desses pontos iniciais foi realizada considerando os diferentes contextos encontrados, visando entender as variações entre diferentes concentrações de substrato aparente, carvão e cinzas. Nos levantamentos dos dias seguintes verificou-se a necessidade de se considerar pontos de coleta adicionais, visto que, com o início do processo de rebrota, novos contextos foram formados. Cada ponto de coleta foi identificado por coordenadas geográficas e estaca, a fim de garantir a revisita dos pontos. Para cada ponto de coleta foi obtido um espectro de reflectância médio resultante de 10 coletas, além da obtenção de fotografias para posterior análise do contexto considerado, conforme apresentado na Figura 2.

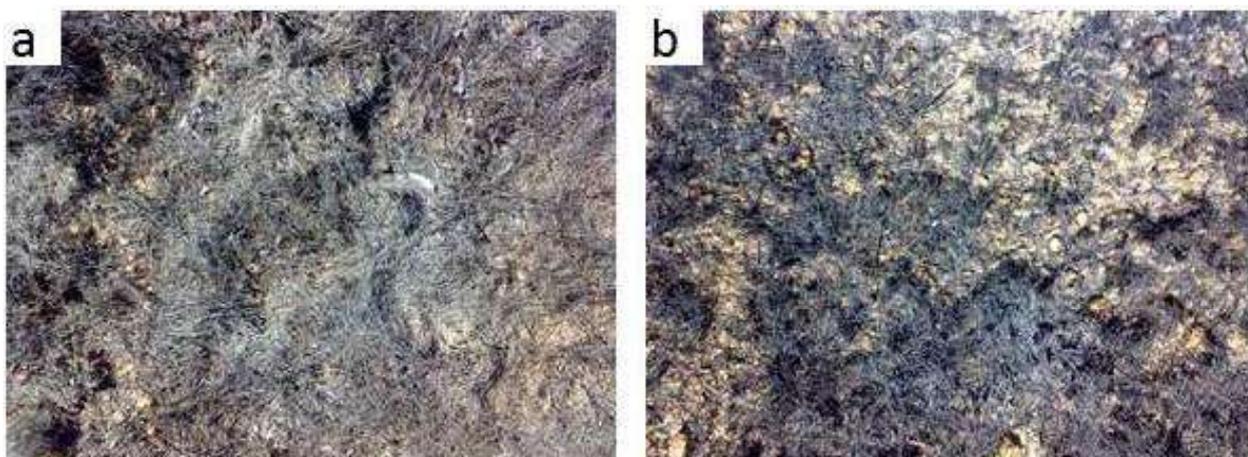


Fig. 2 - Fotografias de pontos de obtenção dos espectros no dia 07 de agosto de 2011 das áreas queimadas a) totalmente e b) parcialmente queimadas.

Posteriormente, foi obtido um espectro médio para cada dia de coleta, considerando todos os pontos de amostragem levantados em cada dia. Esse procedimento foi realizado com o intuito de minimizar as consequências da diferença de resolução espacial entre o levantamento de campo (70 cm) e as imagens (30m), Sendo assim, ao se obter o espectro médio a partir de todos os pontos amostrados em campo para cada dia, aumenta-se a compatibilidade entre as áreas amostrais consideradas em campo e nas imagens. Além da questão da área amostral, a utilização da sequência de espectros médios, para cada dia, permite visualizar sua evolução temporal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos permitiram observar as alterações dos espectros após o evento do fogo e que representaram a rebrota da vegetação. Além disso, os mesmos são discutidos à luz da literatura consultada.

3.1 Mudanças Espectro-Temporais após a Extinção do Fogo

No dia 07 de agosto, primeiro dia de coleta dos espectros e dois dias após a ocorrência da queimada, o contexto da área de estudo estava coberto apenas por cinzas e substrato (solo). O espectro médio referente a este dia apresentou um padrão crescente, atingindo valor de reflectância máximo na banda 7, igual a cerca de 11% (Figura 3). Os baixos valores de reflectância observados no dado relacionam-se à grande quantidade de cinzas, material responsável pela diminuição do albedo do espectro da área.

Já no dia 27 de agosto, segundo dia de coleta e 22 dias após a ocorrência do incêndio, observou-se presença de rebrota de forma homogênea na área de estudo. A constituição da área analisada passou a ser formada por cinzas, solo e vegetação de rebrota. O espectro coletado indica a redução na quantidade de cinzas e aumento incipiente na contribuição do substrato devido ao aumento do albedo entre os espectros dos dias 27 de agosto em relação ao espectro do dia 07. Nas regiões do espectro eletromagnético do vermelho (banda 3) e do infravermelho próximo (banda 4) o espectro do dia 07 de agosto, a resposta obtida foi de 5,3%

e 6,7%, respectivamente, indicando a diferença de 1,4%. Já no caso do espectro do dia 27, as reflectâncias nestas bandas foram iguais a 5,4% e 7,8% (diferença de 2,4%), sendo observado um aumento da declividade.

Outra diferença sutil, mas perceptível, está na relação entre as bandas 5 e 7. O espectro coletado no dia 07, apresenta reflectâncias de 11,2% e 11,5%, respectivamente para tais bandas. No entanto, no dia 27, a banda 5 assume valor igual a 11,9% e a banda 7 se mantém em 11,5%, ou seja, neste dia, a reflectância na banda 5 assume valor superior ao observado na banda 7.

No dia 17 de setembro, terceiro dia de coleta e 43 dias após a ocorrência do fogo, a rebrota vegetacional encontrava-se em estágio avançado. A redução na quantidade de cinzas e o aumento na exposição do solo é evidente na diferença no albedo (Figura 3).

Assim como no caso do dia 27 de agosto, no espectro do dia 17 de setembro está presente o aumento abrupto da reflectância entre as bandas 3 e 4. Apesar de não ser claramente perceptível nos espectros da figura 3, a diferença entre as reflectâncias nessas bandas aumentou no dia 17 de setembro em relação ao dia 27 de agosto, passando de 5,4% e 7,8% para 8,1% e 11,6% nas bandas 3 e 4, respectivamente. Mantendo o padrão iniciado no dia 27 de agosto, no que diz respeito à relação entre as reflectâncias nas bandas 5 e 7, no dia 17 de setembro a diferença entre tais valores continuou aumentando, de forma que, as reflectâncias passaram de 11,9% e 11,5%, para 18,9% e 18,1%, mantendo o padrão decrescente do espectro nas bandas 5 e 7. A quarta e última coleta de espectros ocorreu no dia 10 de outubro, 66 dias após a ocorrência do incêndio. Entre o dia 17 de setembro e o dia 10 de outubro, teve início o período das chuvas, contribuindo para a redução da quantidade de cinzas depositadas sobre a superfície e o consequente aumento da exposição do substrato, além de contribuir para o progresso no processo de rebrota e o escurecimento do substrato em virtude da dissolução do material carbonizado. Com a redução da presença das cinzas e o consequentemente aumento da exposição do substrato, verifica-se um aumento considerável no albedo do espectro do dia 10 de outubro em relação aos dias anteriores (Figura 3).

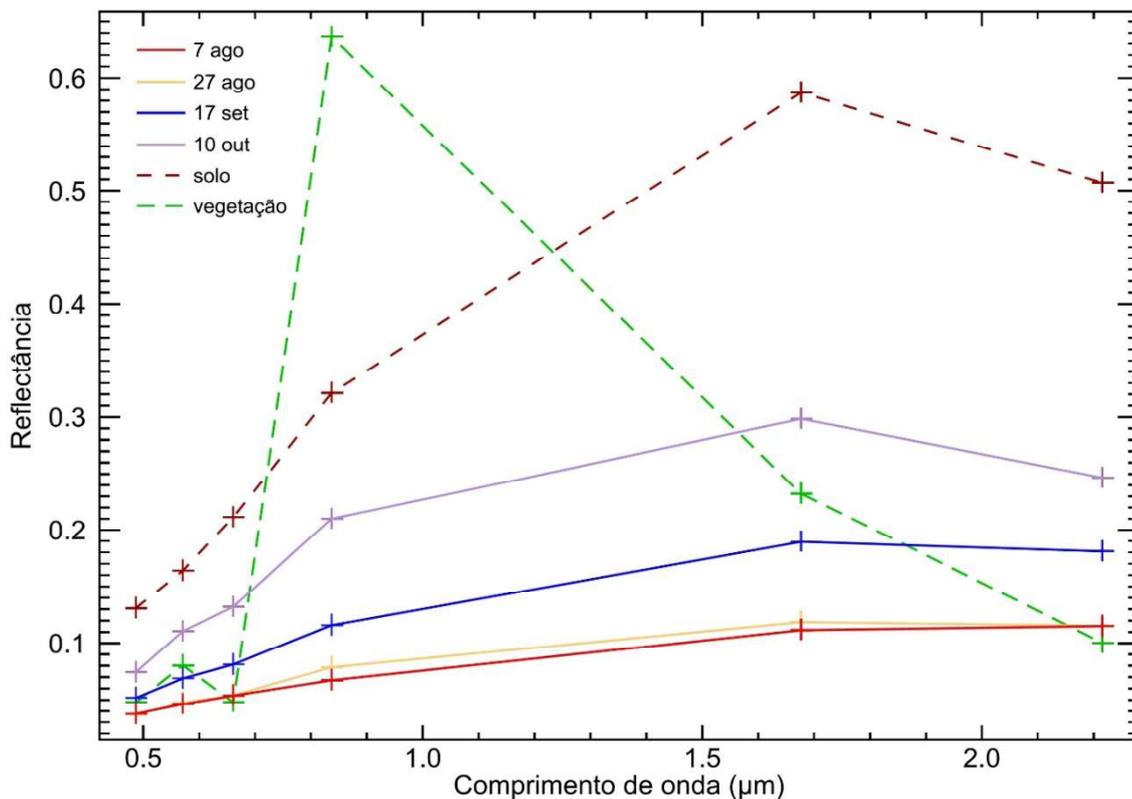


Fig. 3 - Análise multitemporal do comportamento espectral reamostrado para as bandas do Landsat TM5 da área queimada e espectros de referência de solo e vegetação.

Mantendo o padrão observado nas comparações anteriores o espectro do dia 10 de outubro apresenta aumento abrupto da reflectância entre as bandas 3 e 4. Na coleta dos dados do dia 27 de agosto essas bandas apresentavam 8,1% e 11,6% (diferença de 3,5%) na coleta do dia 10 de outubro a diferença entre as reflectâncias foi de 7,8% entre 13,2% e 21%.

Também é mantido o padrão relativo à reflectância nas bandas 5 e 7. Neste dia, a diferença entre as reflectâncias nestas bandas aumentou consideravelmente, passando de apenas 0,8% para 5,1%.

Outro ponto a respeito da evolução temporal pode ser observado ao se comparar o espectro do dia 10 de outubro com o espectro de solo. Neste dia, completaram-se 66 dias da ocorrência do incêndio, tempo suficiente para que houvesse uma substancial redução da cobertura de cinzas e exposição do substrato suficiente para elevar consideravelmente o albedo do espectro, especialmente na banda 5, região mais influenciada pela presença do

solo. Porém, como pode ser observado por meio da figura 6, a reflectância na banda 5 do espectro do dia 10 de outubro está bem abaixo da reflectância da mesma banda no espectro do solo, atingindo cerca de 30% de reflectância, enquanto na mesma banda do espectro do substrato esse valor se aproxima de 60%. Este fato pode estar relacionado ao escurecimento do substrato ocasionado pela dissolução das cinzas pelas chuvas, podendo representar um indicador importante na identificação de áreas queimadas.

3.2 Padrões na evolução temporal dos espectros reamostrados

A análise da evolução temporal dos espectros médios reamostrados evidenciou a existência de três padrões neste processo, sendo eles os seguintes:

3.2.1 Aumento da diferença entre as reflectâncias das bandas 3 e 4

Estas bandas são utilizadas no cálculo do conhecido índice de vegetação *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index* –

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). Com o aumento na diferença das reflectâncias nessas bandas, conseqüentemente, verifica-se um aumento nos valores do índice *NDVI* (Tabela 1).

Tabela 1: Evolução temporal dos valores de reflectância nas bandas 3 e 4 e no *NDVI*

Dia	Reflectância (%)		NDVI
	banda 3	banda 4	
07 de agosto 2 dias após o incêndio	5,30%	6,70%	0,12
27 de agosto 22 dias após o incêndio	5,40%	7,80%	0,18
17 de setembro 43 dias após o incêndio	8,10%	11,60%	0,18
10 de outubro 66 dias após o incêndio	13,20%	21%	0,23

3.2.2 Relação entre as Reflectâncias nas Bandas 5 e 7

No primeiro dia de coleta, a reflectância na banda 7 estava menor do que a reflectância na banda 5, mantendo um padrão crescente do espectro. A partir do dia 27 de agosto, segundo dia de coleta, a reflectância na banda 7 passou a apresentar valores inferiores aos observados na banda 5, padrão que se manteve até o último dia de coleta, momento em que a diferença entre a reflectâncias nestas bandas atingiu o valor máximo (Tabela 2).

Tabela 2: Valores de reflectância nas bandas 5 e 7

Dia	Reflectância (%)		banda 5 - banda 7
	banda 5	banda 7	
07 de agosto 2 dias após o incêndio	11,20%	11,50%	-0,30%
27 de agosto 22 dias após o incêndio	11,90%	11,50%	0,40%
17 de setembro 43 dias após o incêndio	18,90%	18,10%	0,80%
10 de outubro 66 dias após o incêndio	29,80%	25%	5,10%

3.2.3 Valor máximo de reflectância na banda 5

Não há nenhum padrão definido em relação à evolução dos valores da reflectância na banda 5, porém, o fato de o valor observado no dia 10 de outubro, 66 dias após a ocorrência

do incêndio, estar significativamente abaixo do valor observado nessa mesma banda para o espectro do substrato, pode representar um indicador importante para identificação de áreas queimadas, evitando ou minimizando a confusão de áreas queimadas com áreas predominantemente formadas pelo substrato. O valor da banda 5, verificado no espectro do dia 10 de outubro, foi igual a 29,8% (ou 0,298).

3.3 Elaboração de Método de Identificação de Áreas Queimadas por Meio da Árvore de Decisão

Considerando que os padrões observados são referentes a um período de 66 dias após a ocorrência do incêndio, buscou-se compreender que fatores podem ser identificados por meio de dados de sensoriamento remoto e que descreveriam o comportamento observado no período.

Convém salientar que o método aqui investigado se limita aos dados observados e que, para ajustar modelos mais abrangentes e que pudessem delimitar áreas queimadas, seria necessária uma investigação multitemporal, levando-se em conta, por exemplo, os impactos da sazonalidade.

O método foi construído a partir de uma árvore de decisão formulada conforme esquema demonstrado na Figura 4. No primeiro nível, avaliou-se o valor da reflectância na banda 5, por ser a banda de maior variância e na qual a discriminação espectral de solo e vegetação apresenta maior contraste, o qual apresentou valor igual ou menor do que 0,298 (ou 29,8%). Esse valor foi definido com base no valor máximo da reflectância na banda 5 considerando os espectros médios de cada dia.

No segundo nível, o critério de avaliação foi a diferença entre as bandas 5 e 7 (banda 5 – banda 7), a banda pelos motivos supracitados e a banda 7 por ser a que menos sofre alterações nos espectros de vegetação quando a mesma é queimada. Nesse nível, o valor dos pixels da imagem encontrados foi maior ou igual a -0,011 e menor ou igual a 0,08.

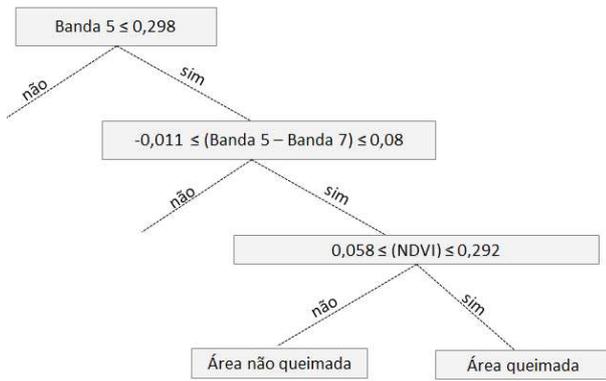


Fig. 4 - Árvore de decisão proposta.

Por fim, no terceiro nível foram considerados os valores mínimo e máximo do índice *NDVI*. Assim como no caso dos valores mínimo e máximo da diferença entre as bandas 5 e 7, os valores mínimo e máximo do índice *NDVI* utilizados foram os obtidos considerando os espectros dos dias 07 de agosto e 10 de outubro, seguindo a mesma lógica dos valores considerados no segundo nível da árvore de decisão.

3.3.1 Aplicação do Método de Identificação

Com o intuito de testar os limiares obtidos na árvore de decisão, aplicou-se na imagem Landsat TM 5 (órbita/ponto 221/071) do dia 09 de outubro de 2010, referente ao final da temporada de queimadas, antes do início da rebrota. Todas as imagens utilizadas foram georreferenciadas e passaram pelo processo de correção atmosférica *QUick Atmospheric Correction (QUAC)*.

O resultado obtido por meio da classificação foi avaliado com o auxílio de 1000 pontos de controle criados aleatoriamente sobre a área. Diante da impossibilidade de realizar, em campo, a aferição a respeito do tipo de cobertura do solo para os pontos de controle, esse processo foi realizado por meio da análise de imagens, considerando a própria imagem do dia 09 de outubro de 2010 e imagens de datas anteriores (05 de julho, 06 de agosto,

22 de agosto, 07 de setembro e 23 de setembro de 2010).

Por meio dessa análise da série temporal, foi possível avaliar se em algum momento do período analisado, os pontos de controle coincidiram com áreas queimadas. No caso de respostas positivas, registrava-se a data de identificação da queimada, caso contrário, registrava-se apenas o tipo de cobertura identificado na imagem do dia 09 de outubro.

Por meio da análise da série temporal das imagens, constatou-se que, dos 1000 pontos de controle considerados, 155 eram referentes a áreas de fato queimadas e foram utilizados para verificar a acurácia da árvore de decisão proposta.

O esquema da aferição do tipo de cobertura dos pontos de controle pode ser melhor compreendido por meio da Figura 5. No esquema são apresentados quatro exemplos: no ponto de controle 895, constatou-se uma queimada no dia 07 de setembro; o ponto 400, até o dia 23 de setembro encontrava-se coberto por vegetação, porém, no dia 09 de outubro encontrava-se coberto por sombra de nuvem; no ponto 209, constatou-se uma queimada no dia 23 de setembro; já o ponto 525, manteve-se inalterado ao longo do período analisado, estando coberto por vegetação.

3.3.2 Resultados da Árvore de Decisão Proposta

É importante destacar que, dos 1000 determinados aleatoriamente, apenas 15,5% foram determinados sob área de queimada. Porém, dos 155 pontos de controle referentes à queimadas, 125 foram corretamente classificados pelo método proposto, representando, um índice de acerto de 80,6%.

Em relação aos erros de omissão, ou seja, pontos de queimadas não classificados corretamente, foram constatados 30, representando 19,4% dos 155 pontos de controle

referentes a queimadas. No que diz respeito aos erros de comissão relacionados à identificação das áreas queimadas, este indicador se mostrou pior do que a omissão, visto que, dos 179 pontos de queimadas classificados pelo método, 54 não representavam, de fato, áreas queimadas, ou seja, 30% dos pontos foram erroneamente classificados como queimada.

Um detalhamento a respeito dos erros de comissão, com a especificação das classes de superfície real com ocorrência de confusão, encontra-se exposto na tabela 3.

Tabela 3: Erros de comissão, mostrados em função da superfície real erroneamente classificada como queimada

<i>Superfície real</i>	<i>Nº de pontos erroneamente classificados como queimada</i>
Água	1
Asfalto	3
Sombra de nuvem	6
Sombra topográfica	6
Solo exposto	12
Área urbana	13
Vegetação	13
TOTAL	54

Conforme pode ser observado, foram encontrados erros de comissão relacionados à água, asfalto, sombras topográfica e de nuvem, solo exposto, área urbana e vegetação, sendo que o maior número foi encontrado nas classes vegetação, área urbana e solo exposto. Casos de confusão são descritos por Escuin *et al.* (2008), Quintano *et al.* (2006) e Bastarrika *et al.* (2011) como sombra, área urbana e água, porém, as confusões com solo exposto e vegetação normalmente não são citadas.

No caso da confusão com vegetação, a explicação pode estar relacionada ao fato deste método fazer uso da evolução do índice NDVI, sendo assim, os limiares utilizados foram responsáveis pela confusão, não tendo sido capaz de diferenciar um possível estágio avançado de rebrota de uma área queimada, da resposta de uma vegetação não queimada. Já no caso da confusão com solo exposto, o erro está

certamente relacionado aos demais indicadores, ou seja, valor máximo da banda 5 e diferença entre as bandas 5 e 7.

Análises interessantes também podem ser realizadas por meio da comparação entre os índices de acerto, erros de omissão e as datas nas quais as queimadas foram identificadas.

A tabela 4 apresenta o número de pontos de queimada identificados corretamente, em relação às datas nas quais as respectivas queimadas foram imageadas pela primeira vez, além de apresentar o número total de pontos de controle referentes a queimadas para cada imagem utilizada.

Em teoria, quanto mais recente uma queimada, maior a possibilidade desta ser identificada, especialmente no caso de utilização de metodologias uni-temporais (CORONA *et al.*, 2008), e, considerando que a classificação foi realizada com base na imagem do dia 09 de outubro, as queimadas mais próximas a essas datas deveriam apresentar maior número de pontos identificados, situação que de fato ocorre.

Apesar de, teoricamente, queimadas mais recentes possuírem maiores chances de serem identificadas, o método também se mostrou satisfatório em relação à identificação de queimadas mais antigas, pois como pode ser visto na tabela 4, dos 23 pontos de controle referentes a queimadas imageadas no dia 05 de julho, o método identificou corretamente 21 (mais de 90%), ou seja, mesmo 96 dias após o imageamento das queimadas, estas foram identificadas pelo método.

Além disso, deve-se ressaltar que tais queimadas certamente ocorreram antes do dia 05 de julho, aumentando ainda mais o hiato existente entre a real data de ocorrência do incêndio e a data da imagem utilizada para a realização da classificação. Conforme pode ser visto na tabela 4, o índice de classificação acima de 70% dos pontos de controle referentes a queimadas se repete em todos os dias.



Fig. 5 – Esquema do processo de validação dos pontos de controle (pontos vermelhos indicados por sua numeração).

No caso do presente estudo, o baixo número de omissões nas queimadas mais antigas reforça a ideia de que o método proposto apresenta bons resultados na identificação de áreas queimadas antigas, com mais de 2 meses de idade.

Em contrapartida, destaca-se o alto número de omissões de queimadas imageadas no dia 23 de setembro em relação aos demais dias; considerando o pequeno número de dias entre a data da imagem e a data da imagem utilizada na

Tabela 4: Pontos de queimada corretamente classificados pelo método proposto mostrados em função das datas de identificação das respectivas queimadas

<i>Data de identificação da queimada</i>	<i>Nº de pontos de queimada corretamente classificados</i>	<i>Nº total de pontos de controle referentes a queimadas</i>	<i>Razão entre pontos classificados e total (%)</i>
05 de julho de 2010	21	23	91,3
06 de agosto de 2010	15	17	88,2
22 de agosto de 2010	11	15	73,3
07 de setembro de 2010	29	37	78,4
23 de setembro de 2010	34	47	72,3
09 de outubro de 2010	15	16	93,8
TOTAL	125	155	80,6

Tabela 5: Pontos de queimada omitidos mostrados em função das datas de identificação das respectivas queimadas

<i>Data de identificação da queimada</i>	<i>Nº de pontos de queimada omitidos</i>	<i>Nº total de pontos de controle referentes a queimadas</i>	<i>Razão entre pontos omitidos e total (%)</i>
05 de julho de 2010	2	23	8,7
06 de agosto de 2010	2	17	11,8
22 de agosto de 2010	4	15	26,7
07 de setembro de 2010	8	37	21,6
23 de setembro de 2010	13	47	27,7
09 de outubro de 2010	1	16	6,3
TOTAL	30	155	19,4

classificação (16 dias), e partindo do pressuposto de que queimadas recentes são identificadas mais facilmente, o número de omissões no dia 23 de setembro deveria ser menor. Essa situação pode estar relacionada a alguma inconsistência na definição dos limiares, ou até mesmo, a algum problema no processo de correção atmosférica da imagem deste dia.

De modo geral, ao observar a razão entre o número de pontos de queimada omitidos e o número total de pontos de controle de queimada para cada imagem utilizada, nota-se que este valor está sempre abaixo de 30%, resultando no total de 19,4% de omissão citado anteriormente.

4. CONCLUSÕES

A espectrorradiometria de campo se mostrou uma poderosa ferramenta no estudo da evolução temporal do espectro da área queimada considerada no presente estudo. Conforme demonstrado, por meio dos espectros de campo reamostrados para as características do sensor TM, foi possível identificar indicadores úteis na elaboração de um método destinado à identificação de áreas queimadas em fitofisionomias campestres do Cerrado.

A aplicação do método proposto, na

classificação de uma imagem referente ao dia 09 de outubro de 2010 (final de temporada de queimadas), revelou bons resultados na identificação de queimadas com diferentes idades, inclusive, queimadas com mais de 90 dias de ocorrência. Essa potencialidade, em relação à identificação de áreas queimadas antigas, representa um ganho considerável para o processo de identificação de áreas queimadas no Cerrado, uma vez que a possibilidade de utilizar uma única imagem, referente ao final da temporada da estiagem para a identificação de áreas queimadas, minimiza os esforços necessários ao mapeamento das áreas afetadas.

Além disso, a possibilidade de identificar queimadas, mesmo após mais de dois meses desde sua ocorrência, elimina a necessidade de utilização de imagens com alta resolução temporal e baixa resolução espacial, tornando viável a utilização de imagens com menores resoluções temporais e maiores resoluções espaciais, tais como as imagens TM ou OLI. Dessa forma, torna-se possível realizar mapeamentos de áreas queimadas em maiores escalas de detalhe, fornecendo dados mais precisos a respeito da extensão das áreas afetadas, dentre outros dados a respeito dos

efeitos causados pelos incêndios.

Vale ressaltar que os bons resultados foram obtidos para a região considerada no estudo, ou seja, a cena Landsat TM 221/071. Sendo assim, é importante que este método seja aplicado em outras regiões de Cerrado, a fim de avaliar sua potencialidade e o nível de confiança dos mapeamentos executados. Outro ponto a ser ressaltado, diz respeito ao método de correção atmosférica utilizado neste estudo. Conforme visto anteriormente, as imagens utilizadas aqui foram corrigidas utilizando-se a metodologia QUAC (QUick Atmospheric Correction), sendo assim, os resultados aqui expostos são válidos para imagens corrigidas por esta metodologia. É válido que o método de identificação de queimadas proposto seja testado em imagens calibradas por outros métodos de correção atmosférica, pois os resultados a serem obtidos podem apresentar diferenças que podem ser relevantes, resultando, por exemplo, em uma redução no número de erros de comissão.

Outro teste interessante a ser realizado é a aplicação do método na classificação de imagens OLI (a bordo do Landsat8) a fim de avaliar a potencialidade do método na identificação de queimadas em tais imagens. Apesar da semelhança entre imagens OLI e TM, a primeira a apresenta, p. ex., aumento na resolução radiométrica que pode propiciar resultados diferentes no processo de identificação das áreas queimadas. Esse teste é bastante relevante, uma vez que o OLI é o sensor que se encontra ativo.

Apesar dos bons resultados obtidos pelo método proposto, um ponto negativo em relação a este método é o número de erros de comissão, visto que, cerca de 30% dos pontos classificados como queimada pelo método não eram queimadas. Sendo assim, novos estudos similares a este podem ser efetuados com o intuito de aprimorar o método proposto ou até mesmo, sugerir novos métodos que reduzam este número de erros de comissão.

Recomenda-se que em estudos futuros, a espectrorradiometria de campo seja realizada em um período de tempo maior, de preferência abrangendo todo o período da estiagem, pois desse modo, aumenta-se o detalhamento a respeito das alterações ocorridas no comportamento espectral das áreas queimadas ao longo do tempo. Esse maior detalhamento

pode ser útil para o refinamento do método aqui proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASTARRIKA, A.; CHUVIECO E.; MARTÍN, P. Automatic Burned Land Mapping From MODIS Time Series Images: Assessment in Mediterranean Ecosystems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 9, p. 3401-3413, 2011.

BERNSTEIN, L.S.; JIN, X.; GREGOR, B.; ADLER-GOLDEN, S.M. Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades. **Optical Engineering**, v. 51, n. 11, p. 111719-1-111719-112012.

CHUVIECO, E.; MARTÍN, M. P.; PALACIOS, A. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 23, p. 5103-5110, 2002.

CHUVIECO, E.; MARTÍN, M. P.; PALACIOS, A.; GÓMEZ. Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 450-462, 2005.

CORONA, P.; LAMONACA, A.; CHIRICI, G. Remote sensing support for post fire forest management. **iForest**, v. 1, p. 6-12, 2008.

ESCUIN, S.; NAVARROR. FERNANDEZ, P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 4, p. 1053-1073, 2008.

EVA, H. & LAMBIN, E.F. Remote Sensing of Biomass Burning in Tropical Regions: Sampling Issues and Multisensor Approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, p. 292-315, 1998.

FRANÇA, H. **Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no Cerrado com imagens AVHRR/NOAA. 2000.** Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000. 121p.

- HUDAK, A.T. & BROCKETT, B.H. Mapping fire scars in a southern African savannah using Landsat imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n.16, p. 3231-3243, 2004.
- IDL. **Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide**. p. 1-44, 2009.
- ISAEV, A. S.; KOROVIN, G. N. ; BARTALEV, S. A. ; ERSHOV, D. V.; JANETOS, A. ; KASISCHKE, E. S.; SHUGART, H. H.; FRENCH, N. H. F.; ORLICK, B. E.; MURPHY; T. L. Using remote sensing to assess Russian forest fire carbon emissions. **Climatic Change**, v. 55, p. 235-249, 2002.
- LOPES DA SILVA, S.; BAPTISTA, G. M. M. Análise do Grau de Severidade de Áreas Queimadas na Estação Ecológica de Águas Emendadas por Meio de Dados do Landsat 8. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 2015 (no prelo).
- MAILLARD, P.; PEREIRA, D. B.; SOUZA, C. G. Incêndios florestais em veredas: conceitos e estudo de caso no Peruaçu. **Revista Brasileira de Cartografia (Impresso)**, v. 61, p. 321-330, 2009.
- MILLER, J.D. & THODE, A.E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). **Remote Sensing of Environment**, v. 109, p. 66-80, 2007.
- PEREIRA, J.M.C. Burned area mapping in Central Africa using ATSR data. **International Journal of Wildland fire**, v. 12, p. 259-270, 2003.
- QUINTANO, C.; FERNÁNDEZ- MANSO, A.; FERNÁNDEZ- MANSO, O. & SHIMABUKURO, Y. E. Mapping burned areas in Mediterranean countries using spectral mixture analysis from a uni-temporal perspective. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 4, p. 645-662, 2006.
- ZHANG, Y.H.; WOOSTER, M.J.; TUTUBALINA, O.; PERRY, G.L.W. Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 1-15, 2003.