



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**EVOLUÇÃO TEMPORAL DO COMPORTAMENTO  
ESPECTRAL DE ÁREA QUEIMADA EM FORMAÇÃO  
CAMPESTRE DO CERRADO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 57**

Otávio Augusto de Araujo Pessoa

**Brasília  
2014**

Otávio Augusto de Araujo Pessoa

# **EVOLUÇÃO TEMPORAL DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ÁREA QUEIMADA EM FORMAÇÃO CAMPESTRE DO CERRADO**

Dissertação de mestrado submetida ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Geociências Aplicadas.

Área de concentração: Geoprocessamento e Análise Ambiental

Orientador: Dr. Paulo Roberto Meneses

Co-orientador: Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

Banca examinadora:

Dr. Paulo Roberto Meneses – Orientador  
Instituto de Geociências – Universidade de Brasília

Dra. Tati de Almeida – Membro Interno  
Instituto de Geociências – Universidade de Brasília

Dr. Alberto Waingort Setzer – Membro Externo  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

**Brasília  
2014**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de  
Brasília. Acervo 1015240.

P475e Pessoa, Otávio Augusto de Araujo.  
Evolução temporal do comportamento espectral de área  
queimada em formação campestre do cerrado / Otávio  
Augusto de Araujo Pessoa. -- 2014.  
xiii, 104 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação  
em Geociências Aplicadas, 2014.

Inclui bibliografia.

Orientação: Paulo Roberto Meneses ; Co-orientação: Gustavo  
Macedo de Mello Baptista.

1. Cerrados. 2. Incêndios florestais. 3. Sensoriamento  
remoto. 4. Espectrometria. I. Meneses, Paulo Roberto.  
II. Baptista, Gustavo Macedo de Mello. III. Título.

CDU 502.57(81:251)

## AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente aos meus pais Conceição e Augusto, por terem dado condições para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

À minha namorada Irina, por todo apoio, dedicação e compreensão ao longo desta caminhada.

Ao Instituto de Geociências, por ter propiciado os meios para a realização deste trabalho.

Ao professor Paulo Roberto Meneses, pela orientação no trabalho (sempre presente nos levantamentos de campo) e pela contribuição em minha formação acadêmica.

Ao professor Gustavo Baptista, pela co-orientação e pela contribuição em minha formação acadêmica.

À professora Tati de Almeida, pelo auxílio nos levantamentos de campo e pela ajuda com o espectrorradiômetro.

À ESRI e a Exelis pela disponibilização do pacote de ferramentas que compõem a Família ArcGis 10 e Envi por intermédio do contrato N° 2011 MLK 8733 e à IMAGEM e Sulsoft pelo apoio e viabilidade da concretização do termo de uso entre o IG-UnB.

À CPRM pela aquisição do espectrorradiômetro FieldSpec pelo projeto: Desenvolvimento de tecnologia exploratória e caracterização mineralógica e geoquímica de rochas fosfáticas e de inclusões em diamantes.

À CAPES, pela concessão da Bolsa de Estudos.

## RESUMO

A utilização de imagens de satélite na identificação de áreas queimadas no Cerrado depende da resolução temporal das imagens, visto que as evidências da ocorrência do fogo normalmente desaparecem em poucos dias. Esta situação pode limitar a identificação de queimadas mais antigas se imagens tais como as Landsat TM, que possuem resolução temporal de 16 dias, forem utilizadas. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar, por meio de espectrorradiometria de campo, a existência de padrões na evolução temporal do espectro de reflectância de uma área queimada, com o objetivo de auxiliar no desenvolvimento de métodos de identificação de áreas queimadas por meio de imagens de satélite, especialmente queimadas mais antigas. Para este estudo, foi considerada uma área no Distrito Federal, Brasil, com cerca de 3,5 hectares de extensão, coberta por vegetação do tipo campo limpo, a qual foi afetada por um incêndio no dia 05 de agosto de 2012. As medições espectrorradiométricas foram realizadas nos dias 07 e 27 de agosto, 17 de setembro e 10 de outubro, compreendendo um período de 66 dias. As medições evidenciaram interessantes padrões na evolução temporal, padrões estes, relacionados à redução das cinzas negras e o conseqüente aumento na exposição do solo, e à rebrota da vegetação. Estes padrões foram utilizados como guia para a criação de dois métodos, ambos baseados em classificador Árvore de Decisão, destinados à identificação de áreas queimadas em imagens Landsat TM. Um método foi baseado no índice NDVI e o outro foi baseado no índice NBR e ambos foram aplicados na classificação de uma imagem TM referente ao final da temporada de queimadas. Embora ambos os métodos tenham sido capazes de identificar áreas queimadas, o método baseado no índice *NDVI* apresentou resultados significativamente superiores. O método baseado no *NDVI* apresentou um índice de acertos de 80,6%, tendo sido capaz de identificar mais de 90% das queimadas com cerca de 96 dias de ocorrência. O método baseado no *NBR* apresentou índice de acertos de apenas 34,8%. No que diz respeito aos erros de omissão, o método baseado no *NDVI* também se mostrou superior, tendo apresentado um índice de 19,4%, contra 65,2% referentes ao método baseado no *NBR*. Apenas em relação aos erros de comissão o método baseado no *NDVI* se mostrou pior, tendo apresentado um índice de 30,2%, contra apenas 14,3% relativo ao método baseado

no *NBR*. Apesar dos resultados satisfatórios para o método baseado no *NDVI*, o elevado índice de erros de comissão sugere que estudos semelhantes a este sejam realizados a fim de contribuir para refinamento do método proposto ou até mesmo, para a sugestão de novos métodos também baseados na evolução temporal do comportamento espectral de áreas queimadas.

Palavras-chave: comportamento espectral, incêndios florestais, campo limpo, espectrorradiometria de campo.

## ABSTRACT

The use of satellite images to identify burned areas in the Cerrado depends on the temporal resolution of the images, since fire evidences normally disappear in a few days. Such situation may limit the identification of old burned areas if images as Landsat, which have 16 days of temporal resolution, are used. Thus, this study aimed to evaluate, through the use of field spectroradiometry, the existence of temporal evolution patterns in the reflectance spectra of a burned area, in order to help with the development of methods to identify burned areas through satellite image, especially older burned areas. For such study, an area in the Distrito Federal, Brazil, was considered, with about 3,5 hectares of extension and recovered by grassland vegetation, which was affected by a fire on August, 5th 2012. The spectral radiometric measurements were collected on August 7th, September 27th, October 17th and October 10th, encompassing a period of 66 days. They have evidenced interesting temporal evolution patterns related with the reduction of the black ashes and the consequent increase of soil exposition, and vegetation regrowth. These spectral patterns were used as a guide to create two methods, both based on Decision Tree classifier, to identify burned areas in Landsat TM images. One method was based on the NDVI index and the other based in the NBR and both methods were applied to classify a TM image at the end of the fire season. Although both methods were capable to identify burned areas, the NDVI based method has shown significantly better results. The method based on the NDVI index presented an 80,6% success, being capable to identify more than 90% of the fires after 96 days of its occurrence. The method based on the NBR index presented a success rate of only 34,8%. Regarding omission errors, the method based on the NDVI index indicated better results, with a 19,4% error against 65,2% of the NBR based method. Only regarding commission errors has the NDVI based method displayed a worse result, with a 30,2% rate, against a 14,3% rate of the NBR based method. Although with satisfactory results for the NDVI index based method, the high rate for commission errors suggests that further studies similar to this one should be done to contribute to the present method or to suggest new methods also based on the temporal evolution of the spectral behavior of burned areas.

Keywords: spectral behavior, forest fires, grassland vegetation, field spectroradiometry.



## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 Objetivo .....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
2.1 Vegetação do Cerrado: visão geral sobre as fitofisionomias .....	18
2.1.1 Formações florestais .....	18
2.1.2 Formações savânicas .....	20
2.1.3 Formações campestres .....	22
2.2 O Fogo no Cerrado .....	23
2.3 Sensoriamento Remoto Aplicado ao Monitoramento de Incêndios Florestais .....	27
2.3.1 Identificação de áreas queimadas .....	28
2.3.1.1 Comportamento espectral de áreas afetadas pelo fogo .....	30
2.4 Espectrorradiometria de Reflectância .....	41
2.4.1 Espectrorradiometria de campo .....	43
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>47</b>
3.1 Levantamentos espectrorradiométricos de campo .....	49
3.1.1 Área de Estudo .....	49
3.1.2 Procedimento de coleta dos espectros .....	51
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>54</b>
4.1 Padrões dos Espectros de Campo .....	54
4.2 Evolução temporal dos espectros .....	65
4.2.1 Evolução temporal dos espectros de campo reamostrados para o sensor TM .....	74
4.3 Aplicação dos padrões espectrais no processo de identificação de áreas queimadas .....	78
4.3.1 Método I – NDVI .....	83
4.3.2 Método II – NBR .....	87
4.3.3 Comparação entre os resultados obtidos pelos métodos I e II .....	90
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>98</b>

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. EXEMPLOS DE FITOFISIONOMIAS DO TIPO MATA CILIAR (A), MATA DE GALERIA (B), CERRADÃO (C) E MATA SECA (D).....20
- FIGURA 2. EXEMPLOS DE FITOFISIONOMIAS DO TIPO CERRADO SENTIDO RESTRITO (A) E VEREDA (B).....22
- FIGURA 3. EXEMPLOS DE FITOFISIONOMIAS DO TIPO CAMPO SUJO (A), CAMPO LIMPO (B) E CAMPO RUPESTRE (C). .....23
- FIGURA 4. EFEITOS DO FOGO NOS ESTRATOS HERBÁCEO E LENHOSO DE UMA ÁREA OCUPADA PELO CERRADO SENTIDO RESTRITO. VERIFICA-SE QUE OS EFEITOS DO FOGO SÃO MAIORES NO ESTRATO HERBÁCEO, O QUAL FOI COMPLETAMENTE QUEIMADO. NO ESTRATO LENHOSO, APENAS ARBUSTOS MENORES FORAM AFETADOS, AO PASSO QUE AS ÁRVORES PRATICAMENTE NÃO FORAM, FATO QUE PODE SER COMPROVADO PELA PRESENÇA DE FOLHAS.....24
- FIGURA 5. COMPORTAMENTOS ESPECTRAIS DE AMOSTRAS DE VEGETAÇÃO SECA E DE CARVÃO COLETADOS NO PARQUE NACIONAL KRUGER, NA ÁFRICA DO SUL. *ADAPTADO DE: ROY & LANDMANN, 2005.*.....31
- FIGURA 6. SIMULAÇÃO DA MISTURA DE ELEMENTOS NA COMPOSIÇÃO DE UM MESMO PIXEL DE UMA IMAGEM. *ADAPTADO DE: ROGAN & FRANKLIN, 2001.*.....32
- FIGURA 7. COMPORTAMENTOS ESPECTRAIS OBTIDOS A PARTIR DE MISTURAS DE SOLO E CARVÃO. A LINHA NO EXTREMO SUPERIOR, EM VERMELHO, REPRESENTA O COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE CADA SOLO PURO, JÁ A LINHA NO EXTREMO INFERIOR, EM AZUL, REPRESENTA O COMPORTAMENTO DO CARVÃO PURO. AS DEMAIS LINHAS REPRESENTAM DIFERENTES PROPORÇÕES DE CARVÃO ADICIONADAS AOS SOLOS, DE FORMA QUE ESTA PROPORÇÃO CRESCE EM DIREÇÃO AO COMPORTAMENTO PURO DO CARVÃO. A APARENTE ALTERAÇÃO NO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO CARVÃO EM ALGUNS DOS GRÁFICOS SE DEVE AO FATO DESTES ESTAREM REPRESENTADOS EM ESCALAS DIFERENTES. *ADAPTADO DE: SMITH ET AL. (2010).* .....33
- FIGURA 8. COMPARAÇÃO ENTRE A EVOLUÇÃO DA APARÊNCIA DE ÁREAS QUEIMADAS NO AMBIENTE DE FLORESTA BOREAL – IMAGENS (A) A (D) – E NO AMBIENTE SAVÂNICO DO CERRADO – IMAGENS (E) A (G).....35
- FIGURA 9. VISUALIZAÇÃO DE UMA MESMA ÁREA QUEIMADA A PARTIR DE IMAGENS DO SENSOR MODIS (A) E DO SENSOR TM (B). SÃO NÍTIDAS AS DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AO NÍVEL DE DETALHES MOSTRADOS POR CADA UMA DAS IMAGENS. A IMAGEM MODIS PERMITE APENAS A IDENTIFICAÇÃO, COM BAIXA PRECISÃO, DA ÁREA AFETADA, JÁ A IMAGEM TM (B), ALÉM DE PERMITIR A MELHOR DELIMITAÇÃO DA ÁREA AFETADA, PERMITE A IDENTIFICAÇÃO DE DETALHES NÃO VISÍVEIS NA IMAGEM MODIS, TAIS COMO UM FRAGMENTO DE VEGETAÇÃO NÃO QUEIMADA (1) E O INÍCIO DO PROCESSO

DE REBROTA (2). A IMAGEM MODIS É REFERENTE AO DIA 22 DE SETEMBRO DE 2010, JÁ A IMAGEM TM É REFERENTE AO DIA 23 DE SETEMBRO DO MESMO ANO.....	38
FIGURA 10. RÁPIDA ALTERAÇÃO NA APARÊNCIA DE UMA ÁREA QUEIMADA NO PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA APÓS A OCORRÊNCIA DE CHUVA. ....	39
FIGURA 11. COMPARAÇÃO ENTRE AS RESOLUÇÕES ESPECTRAIS DOS SENSORES TM E AVHRR NA REGIÃO ÓPTICA DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO. ....	40
FIGURA 12. ESPECTRO DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO OBTIDO POR ESPECTRORRADIÔMETRO (A) E ESPECTRO DA VEGETAÇÃO REAMOSTRADO PARA O SENSOR LANDSAT TM (B), A PARTIR DO ESPECTRO OBTIDO PELO ESPECTRORRADIÔMETRO.....	42
FIGURA 13. TRANSMITÂNCIA ATMOSFÉRICA CONSIDERANDO APENAS O VAPOR DE ÁGUA (H <sub>2</sub> O). ADAPTADO DE: ASD (2010). ....	45
FIGURA 14. DETERMINAÇÃO DO CAMPO DE VISADA DO ESPECTRORRADIÔMETRO EM FUNÇÃO DA ABERTURA ANGULAR DO SENSOR E DA ALTURA DO SENSOR EM RELAÇÃO À SUPERFÍCIE.....	46
FIGURA 15. COMPARAÇÃO ENTRE AS RESOLUÇÕES ESPECTRAIS DOS SENSORES LISS 3 (RESOURCESAT 1), TM E ETM+ (LANDSAT 5 E 7, RESPECTIVAMENTE) E OLI (LANDSAT 8). NO CASO DOS SENSORES ETM+ E OLI, NÃO SE ENCONTRAM REPRESENTADAS AS BANDAS PANCRÔMICAS. ....	48
FIGURA 16. APROXIMAÇÃO DOS LIMITES DA ÁREA QUEIMADA CONSIDERADA NO LEVANTAMENTO DE CAMPO E A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DOS ESPECTROS DEFINIDOS NO PRIMEIRO DIA DO LEVANTAMENTO. A IMAGEM UTILIZADA SE REFERE A UMA DATA ANTERIOR À OCORRÊNCIA DO INCÊNDIO. ....	49
FIGURA 17. FOTOGRAFIA PANORÂMICA DA ÁREA DE ESTUDO.....	50
FIGURA 18. PRESENÇA DO RUÍDO NOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM TORNO DE 1400NM, 1900NM E 2500NM, CAUSADO PELA PRESENÇA DO VAPOR D'ÁGUA NA ATMOSFERA. ..	52
FIGURA 19. COMPORTAMENTOS ESPECTRAIS OBTIDOS NO DIA 07 DE AGOSTO DE 2011. ENCONTRAM-SE REPRESENTADOS OS ESPECTROS MÍNIMO (VERMELHO), MÉDIO (PRETO), MÁXIMO (AZUL) E O ESPECTRO REFERENTE AO SUBSTRATO ROCHOSO PURO (ALARANJADO). ....	55
FIGURA 20. IMAGENS REFERENTES AOS ESPECTROS MÍNIMO (A) E MÁXIMO (B). A FIGURA (A) REPRESENTA UM CONTEXTO COM A SUPERFÍCIE COMPLETAMENTE COBERTA POR MATERIAL CARBONIZADO, ENQUANTO A FIGURA (B) SE REFERE A UM CONTEXTO CARACTERIZADO PELA MISTURA DE MATERIAL CARBONIZADO E SUBSTRATO.....	56
FIGURA 21. COMPORTAMENTOS ESPECTRAIS OBTIDOS NO DIA 27 DE AGOSTO DE 2011. ENCONTRAM-SE REPRESENTADOS OS ESPECTROS MÍNIMO (VERMELHO), MÉDIO (PRETO), MÁXIMO (AZUL) E OS ESPECTROS REFERENTES AO SUBSTRATO ROCHOSO PURO (ALARANJADO) E VEGETAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA (VERDE). ....	57
FIGURA 22. IMAGENS REFERENTES AOS ESPECTROS MÁXIMO (A) E MÍNIMO (B). A IMAGEM (A) SE REFERE A UM CONTEXTO FORMADO POR CERCA DE 45% DE MATERIAL	

CARBONIZADO, 45% DE SUBSTRATO E 10% DE VEGETAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA. JÁ A IMAGEM (B) SE REFERE A UM CONTEXTO COM PREDOMÍNIO DE MATERIAL CARBONIZADO, REPRESENTANDO 75% DO MATERIAL ENCONTRADO, COMPLEMENTADO POR CERCA DE 13% DE SUBSTRATO E 12% VEGETAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA.....	58
FIGURA 23. FEIÇÕES DE ABSORÇÃO E REFLEXÃO RESSALTADAS PELA REMOÇÃO DO CONTÍNUO ESPECTRAL.....	59
FIGURA 24. COMPORTAMENTOS ESPECTRAIS REFERENTES AO DIA 17 DE SETEMBRO DE 2011. ENCONTRAM-SE REPRESENTADOS OS ESPECTROS MÍNIMO (VERMELHO), MÉDIO (PRETO), MÁXIMO (AZUL) E OS ESPECTROS REFERENTES AO SUBSTRATO ROCHOSO PURO (ALARANJADO) E À VEGETAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA (VERDE).....	61
FIGURA 25. IMAGENS REFERENTES AOS ESPECTROS MÍNIMO (A) E MÁXIMO (B). A IMAGEM (A) SE REFERE A UM CONTEXTO FORMADO POR CERCA 20% DE SUBSTRATO ROCHOSO, 70% DE MATERIAL CARBONIZADO E 10% DE REBROTA. A IMAGEM (B) SE REFERE A UM CONTEXTO FORMADO POR CERCA DE 43% DE SUBSTRATO, 45% DE MATERIAL CARBONIZADO E 12% DE REBROTA. ....	61
FIGURA 26. DESTAQUE PARA A FEIÇÃO DE ABSORÇÃO PRESENTE EM TORNO DE 2200NM, EVIDENCIADA PELA REMOÇÃO DO CONTÍNUO ESPECTRAL E CONFIRMANDO A INFLUÊNCIA DO SUBSTRATO NA COMPOSIÇÃO DOS ESPECTROS. ....	62
FIGURA 27. IMAGENS REFERENTES AOS ESPECTROS MÍNIMO (A) E MÁXIMO (B). A IMAGEM (A) SE REFERE A UM CONTEXTO FORMADO POR 85% DE SUBSTRATO E 15% DE REBROTA. JÁ A IMAGEM (B) SE REFERE A UM CONTEXTO FORMADO POR 90% DE SUBSTRATO E 10% DE REBROTA, SENDO QUE, EM COMPARAÇÃO COM O CONTEXTO DA IMAGEM (A), A IMAGEM (B) APRESENTA UM SUBSTRATO MAIS CLARO. ....	63
FIGURA 28. COMPORTAMENTOS ESPECTRAIS REFERENTES AO DIA 10 DE OUTUBRO DE 2012. ENCONTRAM-SE REPRESENTADOS OS ESPECTROS MÍNIMO (VERMELHO), MÉDIO (PRETO), MÁXIMO (AZUL) E OS ESPECTROS REFERENTES AO SUBSTRATO ROCHOSO PURO (ALARANJADO) E À VEGETAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA (VERDE).....	64
FIGURA 29. ESPECTROS MÉDIOS REFERENTES AOS DIAS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO E ESPECTROS PUROS REFERENTES AOS ELEMENTOS QUE COMPÕE OS CONTEXTOS VERIFICADOS EM CAMPO. ....	66
FIGURA 30. ESPECTRO REFERENTE AO DIA 07 DE AGOSTO.....	67
FIGURA 31. EVOLUÇÃO TEMPORAL DO ESPECTRO MÉDIO DA ÁREA DE ESTUDO ATÉ O DIA 27 DE AGOSTO. ....	68
FIGURA 32. COMPORTAMENTOS ESPECTRAIS DOS DIAS 07 E 27 DE AGOSTO, DA VEGETAÇÃO PURA E DO SUBSTRATO PURO APÓS A REMOÇÃO DO CONTÍNUO ESPECTRAL APRESENTADOS SEM ESCALA DE REFLECTÂNCIA COM O INTUITO DE FACILITAR A VISUALIZAÇÃO. ....	69
FIGURA 33. EVOLUÇÃO TEMPORAL DO ESPECTRO MÉDIO DA ÁREA DE ESTUDO ATÉ O DIA 17 DE SETEMBRO.....	70

FIGURA 34. COMPORTAMENTOS ESPECTRAIS DOS DIAS 27 DE AGOSTO E 17 DE SETEMBRO APÓS A REMOÇÃO DO CONTÍNUO ESPECTRAL, EVIDENCIANDO A SIMILARIDADE ENTRE OS PADRÕES DE REFLECTÂNCIA DE AMBOS OS ESPECTROS.....	71
FIGURA 35. EVOLUÇÃO TEMPORAL DO ESPECTRO MÉDIO DA ÁREA DE ESTUDO ATÉ O DIA 10 DE OUTUBRO.....	72
FIGURA 36. ESPECTROS DA VEGETAÇÃO PURA E ESPECTROS DE CADA DIA DE LEVANTAMENTO APRESENTADOS SEM ESCALA DE REFLECTÂNCIA.....	73
FIGURA 37. EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS ESPECTROS REAMOSTRADOS PARA O SENSOR TM. ....	74
FIGURA 38. DESTAQUE PARA OS VALORES DE REFLECTÂNCIA NA BANDA 5. O ALTO VALOR DE REFLECTÂNCIA DA BANDA 5, NO ESPECTRO DO SUBSTRATO, EM CONTRAPOSIÇÃO AO BAIXO VALOR DE REFLECTÂNCIA DESSA MESMA BANDA NO ESPECTRO DA VEGETAÇÃO, JUSTIFICA A AFIRMAÇÃO DE QUE O AUMENTO DA REFLECTÂNCIA NESSA BANDA, NOS ESPECTROS DO DIA 07 DE AGOSTO AO DIA 10 DE OUTUBRO, É RESULTADO DO AUMENTO DA INFLUÊNCIA DO SUBSTRATO NA COMPOSIÇÃO DOS ESPECTROS. ....	77
FIGURA 39. ESQUEMA DOS DOIS MÉTODOS PROPOSTOS A PARTIR DOS INDICADORES ENCONTRADOS NA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS ESPECTROS DE CAMPO REAMOSTRADOS PARA O SENSOR TM.....	79
FIGURA 40. ESQUEMA DO PROCESSO DE VALIDAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE (PONTOS VERMELHOS INDICADOS POR SUA NUMERAÇÃO).....	82
FIGURA 41. DETALHAMENTO DO MÉTODO I, BASEADA NA EVOLUÇÃO DOS VALORES DO ÍNDICE NDVI.....	83
FIGURA 42. DETALHAMENTO DO MÉTODO II, BASEADO NA EVOLUÇÃO DOS VALORES DO ÍNDICE NBR.....	87

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS BANDAS 3 E 4 E DOS VALORES NDVI REFERENTES AOS ESPECTROS, REAMOSTRADOS PARA O SENSOR TM.....	75
TABELA 2. VALORES DE REFLECTÂNCIA NAS BANDAS 5 E 7 REFERENTES AOS ESPECTROS REAMOSTRADOS, EVIDENCIANDO A QUEDA DA REFLECTÂNCIA NA BANDA 7, EM RELAÇÃO À BANDA 5, A PARTIR DO DIA 27 DE AGOSTO.....	76
TABELA 3. EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA DAS BANDAS 4 E 7, BEM COMO A EVOLUÇÃO DOS VALORES REFERENTES AO CÁLCULO DO ÍNDICE <i>NBR</i> .	78
TABELA 4. VALORES MÍNIMO E MÁXIMO DOS INDICADORES “BANDA 5 – BANDA7”, <i>NDVI</i> E <i>NBR</i> .	80
TABELA 5. ERROS DE COMISSÃO, MOSTRADOS EM FUNÇÃO DA SUPERFÍCIE REAL A QUAL FOI ERRONEAMENTE CLASSIFICADA COMO QUEIMADA.	84
TABELA 6. PONTOS DE QUEIMADA CORRETAMENTE CLASSIFICADOS PELO MÉTODO I (NDVI) MOSTRADOS EM FUNÇÃO DAS DATAS DE IDENTIFICAÇÃO DAS RESPECTIVAS QUEIMADAS.....	85
TABELA 7. PONTOS DE QUEIMADAS OMITIDOS, MOSTRADOS EM FUNÇÃO DA DATA DAS QUEIMADAS, E RAZÃO ENTRE O NÚMERO DE PONTOS QUEIMADOS OMITIDOS E O NÚMERO TOTAL DE PONTOS DE CONTROLE REFERENTES A QUEIMADAS.	87
TABELA 8. PONTOS DE QUEIMADA CORRETAMENTE CLASSIFICADOS PELO MÉTODO II ( <i>NBR</i> ) MOSTRADOS EM FUNÇÃO DAS DATAS DE IDENTIFICAÇÃO DAS RESPECTIVAS QUEIMADAS.....	89
TABELA 9. PONTOS DE QUEIMADAS OMITIDOS, MOSTRADOS EM FUNÇÃO DA DATA DAS QUEIMADAS, E RAZÃO ENTRE O NÚMERO DE PONTOS QUEIMADOS OMITIDOS E O NÚMERO TOTAL DE PONTOS DE CONTROLE REFERENTES A QUEIMADAS.	89
TABELA 10. ERROS DE COMISSÃO, MOSTRADOS EM FUNÇÃO DA SUPERFÍCIE REAL A QUAL FOI ERRONEAMENTE CLASSIFICADA COMO QUEIMADA.	90
TABELA 11. RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE PONTOS CORRETAMENTE CLASSIFICADOS COMO QUEIMADA, POR CADA MÉTODO, E O NÚMERO TOTAL DE PONTOS DE CONTROLE REFERENTES A QUEIMADAS, AMBOS MOSTRADOS EM FUNÇÃO DA DATA DAS IMAGENS UTILIZADAS.....	92
TABELA 12. RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE PONTOS DE QUEIMADA OMITIDOS, POR CADA MÉTODO, E O NÚMERO TOTAL DE PONTOS DE CONTROLE REFERENTES A QUEIMADAS, AMBOS MOSTRADOS EM FUNÇÃO DA DATA DAS IMAGENS UTILIZADAS.	92
TABELA 13. ERROS DE COMISSÃO APRESENTADOS EM FUNÇÃO DA SUPERFÍCIE REAL ERRONEAMENTE CLASSIFICADA COMO QUEIMADA POR AMBOS OS MÉTODOS.....	93

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. MATRIZ DE CONFUSÃO REFERENTE AO RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO BASEADA NO MÉTODO PROPOSTO I. ....	83
QUADRO 2. MATRIZ DE CONFUSÃO REFERENTE AO RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO BASEADA NO MÉTODO PROPOSTO II. ....	88
QUADRO 3. NÚMERO TOTAL DE PONTOS CLASSIFICADOS COMO QUEIMADA E NÚMERO DE PONTOS ERRONEAMENTE CLASSIFICADOS COMO QUEIMADA PELOS MÉTODOS I E II.	93
QUADRO 4. VALORES DOS ÍNDICES DE EXATIDÃO GLOBAL, KAPPA E TAU APLICADOS AOS RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS I E II.....	94

## 1 INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, ocupando aproximadamente 24% do território nacional, no entanto, sua importância não se restringe apenas à sua dimensão. O Cerrado é caracterizado, também, por sua grande biodiversidade e altas taxas de endemismo. Com relação à sua flora, 44% das espécies são endêmicas, fato que faz do Cerrado, a savana tropical com a maior diversidade de flora de mundo (KLINK & MACHADO, 2005). Com relação à sua fauna, também são verificadas taxas de endemismo consideráveis, sendo de 30% no caso dos anfíbios e 20% no caso dos répteis (SILVA & BATES, 2002).

A questão hídrica é outro fator que confere grande importância ao Cerrado. Por estar localizado, em sua maior extensão, no Planalto Central do Brasil, o bioma Cerrado "... desempenha papel fundamental na distribuição da água pelo país" (LIMA & SILVA, 2008, p.93), pois abriga nascentes que contribuem para seis das oito grandes bacias hidrográficas brasileiras (LIMA & SILVA, 2008).

Além da questão ambiental, a diversidade social presente no Cerrado também é de grande relevância. O bioma abriga diferentes comunidades tradicionais, indígenas e quilombolas que trazem em suas culturas forte ligação com a terra e com os diferentes recursos naturais disponíveis na região (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2007).

Apesar da importância da preservação do Cerrado, seja do ponto de vista ambiental ou antropológico, a intensificação e expansão das atividades antrópicas no bioma têm contribuído para a intensificação dos impactos causados, sendo notável os recorrentes incêndios florestais. É importante salientar que quando se fala em incêndios florestais no Cerrado, é preciso considerar que tais eventos podem ocorrer de forma natural no bioma, considerado como um fator característico e tido como benéfico para algumas espécies de sua flora. No entanto, a intensificação da ocupação humana tem contribuído para a alteração do regime do fogo no bioma, aumentando sua frequência de ocorrência, a dimensão das áreas afetadas e consequentemente, aumentando os impactos causados por esses eventos.

Diante disso, diversos esforços têm sido empregados com o intuito de melhorar a detecção desse fenômeno no Cerrado, bem como nos demais biomas do planeta. Nesse sentido, o sensoriamento remoto orbital, devido às suas



potencialidades, tem sido responsável por grandes contribuições, permitindo, dentre outras análises, a identificação das áreas afetadas pelo fogo e avaliações a respeito dos seus impactos. No entanto, no Cerrado, assim como na maioria das savanas tropicais, a remoção das cinzas e do carvão provenientes da queima, bem como a rebrota da vegetação ocorre em poucos dias após a queimada, fazendo com que os indícios da ocorrência do fogo sejam rapidamente atenuados ou eliminados, dificultando ou até mesmo impedindo a identificação das áreas afetadas.

A efemeridade da permanência dos indícios da ocorrência do fogo no Cerrado tem contribuído para o uso de imagens de alta resolução temporal (tais como a MODIS) na detecção de áreas queimadas nesse bioma, pois desse modo, aumenta-se consideravelmente a probabilidade de que uma área queimada seja imageada em um momento em que os indícios da ocorrência do fogo ainda estejam perceptíveis. Contudo, o uso desse tipo imagem dificulta a detecção de áreas queimadas de dimensões reduzidas, bem como análises em maior escala de detalhes, uma vez que imagens de alta resolução temporal normalmente possuem baixas resoluções espaciais.

Um maior detalhamento pode ser alcançado por meio do uso de imagens de média resolução espacial (em torno dos 30 metros), tais como as imagens dos sensores TM ou ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) e OLI (*Operational Land Imager*), utilizados nas missões Landsat 5, 7 e 8, respectivamente. Além da maior resolução espacial, uma vantagem do uso dessas imagens é o fato de que são distribuídas de forma gratuita, possibilitando a realização de análises históricas das áreas queimadas, bem como o monitoramento atual, sem custos para a aquisição das imagens necessárias. No entanto, no caso do Cerrado, a resolução temporal dessas imagens, de 16 dias, pode não ser suficiente para transpor o problema da efemeridade dos indícios da ocorrência do fogo, algumas vezes podendo prejudicar a identificação das áreas queimadas.

Diante disso, o conhecimento sobre a evolução temporal do comportamento espectral de áreas queimadas no Cerrado pode auxiliar na identificação de padrões que permitam a identificação dessas áreas mesmo na ausência dos indícios mais evidentes da ocorrência do fogo, auxiliando, dessa forma, a superar o problema da defasagem temporal entre a ocorrência do incêndio e o imageamento da área afetada. Isso inclusive, poderá contribuir para o desenvolvimento de metodologias

automatizadas que possibilitem o uso sistemático das imagens TM, ETM e OLI nos estudos relativos aos incêndios florestais ocorridos no bioma Cerrado.

### **1.1 Objetivo**

O objetivo desta pesquisa é avaliar, por meio de espectrorradiometria de campo realizada em uma área queimada formada por vegetação campestre, a existência de padrões na evolução temporal dos espectros de reflectância, que possam ser utilizados no desenvolvimento de métodos capazes de identificar queimadas por meio de imagens de satélite, especialmente as queimadas mais antigas.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Vegetação do Cerrado: visão geral sobre as fitofisionomias**

Diversos são os fatores relacionados à ocorrência dos incêndios florestais, porém o tipo de vegetação é decisivo na incidência destes eventos, visto que representa o combustível que torna possível a ocorrência do fogo. Diante disso, uma melhor compreensão a respeito dos incêndios florestais pressupõe o conhecimento a respeito da vegetação afetada.

O Cerrado, assim como as demais savanas tropicais do mundo, apresenta grande diversidade de fitofisionomias (COUTINHO, 2006), caracterizada por uma gradação que vai desde campos abertos até densas florestas. Porém, de modo geral, é possível distinguir dois estratos de vegetação diferentes no Cerrado: o estrato rasteiro, formado por subarbustos e ervas, e o estrato lenhoso, formado por árvores e grandes arbustos (OLIVERIA-FILHO & RATTER, 2002). Com relação às fitofisionomias do Cerrado, estas são classificadas de diferentes formas, e diante disso, considerando que o presente estudo não possui o objetivo de discutir essas diferentes classificações, e visando evitar confusões conceituais, aqui será adotada a classificação disponível em Ribeiro & Walter (2008).

A classificação proposta por Ribeiro & Walter (2008) diferencia as fitofisionomias com base, primeiramente, na fisionomia, a qual é definida pelos fatores estruturais, formas de crescimento dominantes e por mudanças estacionais, quando existirem. Além da fisionomia, a classificação adotada também considera, posteriormente, fatores relacionados ao ambiente e à composição florística. Desse modo, Ribeiro & Walter (2008), assim como Coutinho (2006), classificaram as fitofisionomias do Cerrado em formações florestais, savânicas e campestres, compondo a gradação anteriormente citada.

#### **2.1.1 Formações florestais**

As formações florestais do Cerrado são aquelas onde se verifica os tipos de vegetação com predominância de espécies arbóreas, responsáveis pela formação

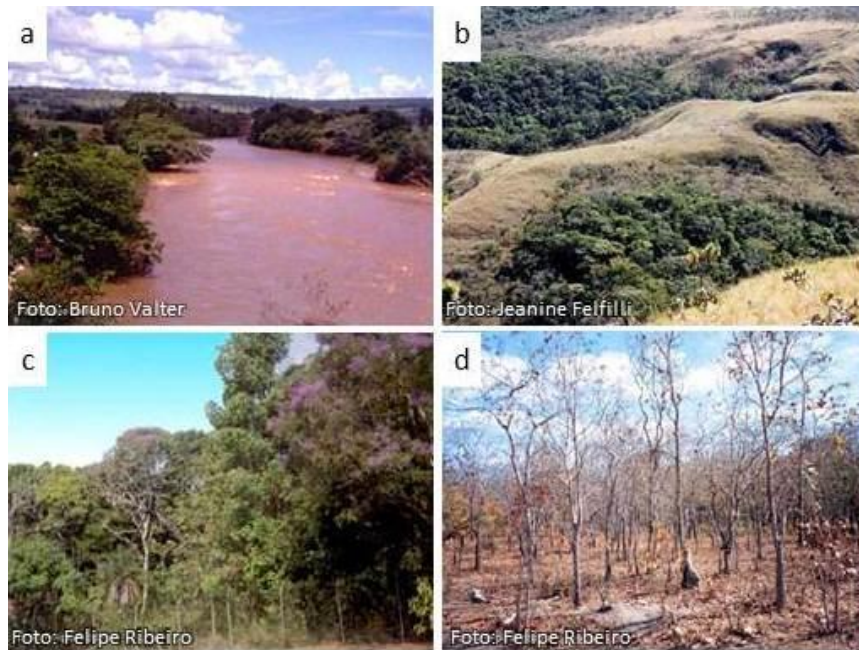
de dossel contínuo. As fitofisionomias que se enquadram como formações florestais são: Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão, sendo que as duas primeiras estão associadas a cursos d'água, enquanto as duas últimas estão associadas a locais bem drenados.

A **Mata Ciliar** é a vegetação que acompanha os rios de médio e grande porte, formada por árvores predominantemente eretas, com alturas variando entre 20 e 25 metros e alguns indivíduos podendo atingir 30 metros (figura 1a). As espécies típicas são predominantemente caducifólias (perdem as folhas em algum período do ano), porém, verifica-se a presença de espécies sempre verdes, conferindo à Mata Ciliar caráter semidecíduo. Apresenta cobertura arbórea variando entre 50% e 90%, dependendo do período do ano.

A **Mata Galeria** é a vegetação que acompanha os rios de pequeno porte e córregos, formada por árvores com altura média variando entre 20 e 30 metros, as quais formam uma galeria sobre os cursos d'água, fornecendo cobertura arbórea variando entre 70% e 95% (figura 1b). Formada por espécies perenifólias (que não perdem as folhas), a Mata de Galeria apresenta alta umidade relativa mesmo nos períodos de seca. Na maioria das vezes, este tipo de fitofisionomia se apresenta circundada por formações não florestais, apresentando transições bruscas.

O **Cerradão** (figura 1c) é um tipo de formação florestal que apresenta características esclerófilas, ou seja, apresenta grande ocorrência de órgãos vegetais rígidos, especialmente folhas. É formado por dossel contínuo, resultando em uma cobertura arbórea variando entre 50% a 90%. O estrato arbóreo possui altura média variando entre 8 e 15 metros, favorecendo a formação de estratos arbustivo e herbáceo, devido às condições de luminosidade. O padrão geral das espécies presentes no Cerradão é o semidecíduo, porém, podendo ser encontradas espécies perenifólias e caducifólias.

A **Mata Seca** (figura 1d), assim como o Cerradão, é uma formação florestal que não possui associação com cursos d'água. A altura média do estrato arbóreo varia entre 15 e 25 metros, propiciando cobertura arbórea variando entre 70% e 95% no período chuvoso, podendo chegar a valores inferiores a 35% no período seco, em formações onde se verifica maior caducifolia.



**Figura 1.** Exemplos de fitofisionomias do tipo Mata Ciliar (a), Mata de Galeria (b), Cerradão (c) e Mata Seca (d). Fonte: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG0167911200585234.html>>, acessado em: 05 de agosto de 2013.

### 2.1.2 Formações savânicas

As formações savânicas do Cerrado englobam as fitofisionomias Cerrado Sentido Restrito (ou *strictu senso*), Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda.

O **Cerrado Sentido Restrito** possui estratos arbóreo e arbustivo-herbáceo bem definidos, sendo que as espécies arbóreas são encontradas distribuídas de forma aleatória e em diferentes densidades, não formando dossel contínuo (figura 2a). As árvores presentes são baixas e tortuosas, e geralmente, possuem troncos cobertos por cascas espessas (cortiças). Os arbustos e subarbustos se encontram espalhados, sendo que algumas espécies possuem órgãos subterrâneos perenes (chamados xilopódios), os quais permitem a rebrota do indivíduo após corte ou mesmo queimada.

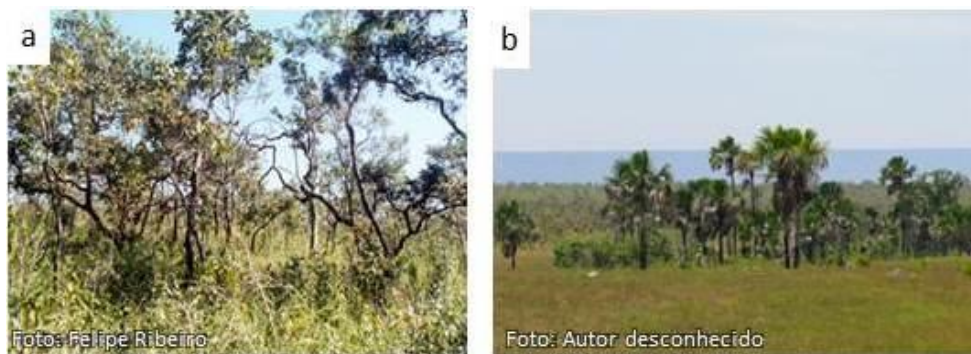
O Cerrado Sentido Restrito ainda é dividido em quatro subtipos: Cerrado Denso, Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre. O Cerrado Denso é um subtipo predominantemente arbóreo, com altura média variando entre 5 e 8 metros e apresentando cobertura arbórea variando entre 50% e 70%, fato que pode explicar o menor adensamento dos estratos arbustivo e herbáceo. O Cerrado Típico é uma

forma intermediária entre o Cerrado Denso e o Cerrado Ralo, sendo predominantemente arbóreo-arbustivo, com cobertura arbórea variando entre 20% e 50% e altura média entre 3 e 6 metros. O Cerrado Ralo, predominantemente arbóreo-arbustivo, representa a formação mais baixa e menos densa do Cerrado Sentido Restrito (altura média entre 2 e 3 metros e cobertura arbórea entre 5% e 20%), apresentando estrato arbustivo-herbáceo mais proeminente do que o observado nos demais subtipos. Por fim, o Cerrado Rupestre possui estrutura semelhante ao Cerrado Típico e Cerrado Ralo, porém, se diferencia de ambos devido ao substrato em que ocorre, o qual é caracterizado por solos rasos com afloramentos rochosos.

O **Parque de Cerrado** se caracteriza pela ocorrência de agrupamentos de árvores em pequenas elevações do terreno, conhecidas como “murundus”. Nessas elevações, a altura média das árvores varia entre 3 e 6 metros, resultando em uma cobertura arbórea variando entre 50% e 70%. Nas regiões de depressão, predomina o estrato herbáceo, onde a cobertura arbórea é praticamente nula.

O **Palmeiral** é a fitofisionomia caracterizada pela presença marcante de uma única espécie de palmeira arbórea, podendo haver espécies de dicotiledôneas, porém, em baixas frequências. As espécies mais comuns de palmeiras encontradas no Cerrado são: o Babaçu, a Gueroba, a Macaúba e o Buriti, formando, respectivamente, os chamados Babaçuzal, Guerobal, Macaubal e Buritizal. À exceção do Buritizal, o qual está associado a terrenos mal drenados, os demais tipos de Palmeiral são encontrados em terrenos bem drenados.

A **Vereda**, assim como o Buritizal, é formada por palmeiras do tipo Buriti, porém, ao contrário do que ocorre no Buritizal, na Vereda não se forma dossel, além disso, a Vereda está associada à formação de estrato arbustivo-herbáceo, característica não presente no Buritizal (figura 2b).



**Figura 2.** Exemplos de fitofisionomias do tipo Cerrado Sentido Restrito (a) e Vereda (b). *Fonte:* (a), disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01\\_52\\_911200585234.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_52_911200585234.html)> (b), disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/projetojalapao/pt/biodiversidade-3/fitofisionomias.html?showall=&st art=5>>, acessados em: 05 de agosto de 2013.

### 2.1.3 Formações campestres

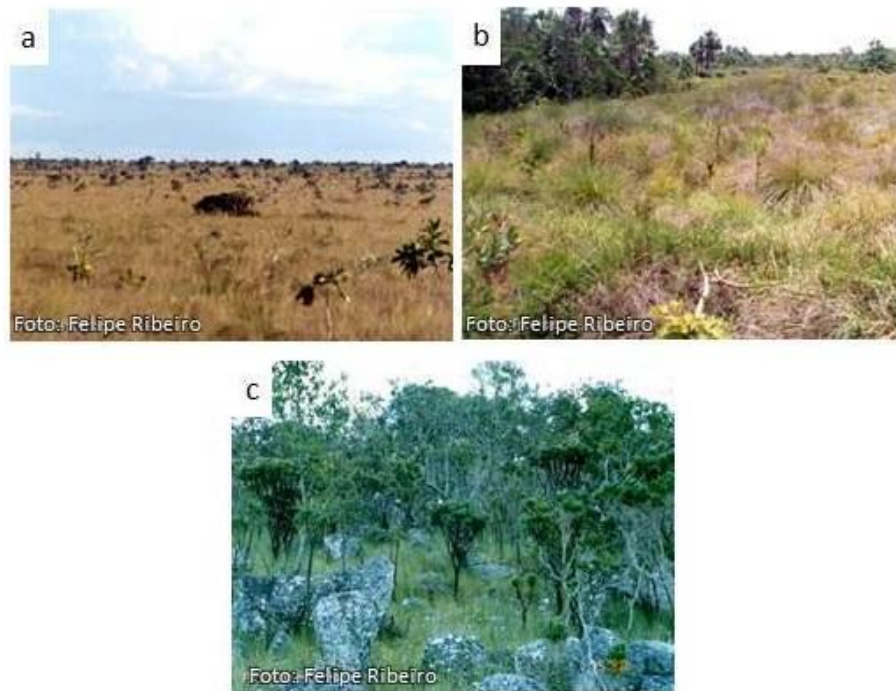
As principais fitofisionomias que se enquadram como formações campestres são: Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre.

O **Campo Sujo** é uma fitofisionomia exclusivamente arbustivo-herbácea, apresentando arbustos e subarbustos esparsos, os quais, muitas vezes, são formados por indivíduos menos desenvolvidos das espécies arbóreas presentes no Cerrado Sentido Restrito (figura 3a).

Já o **Campo Limpo** se apresenta como uma fitofisionomia predominantemente herbácea, com raros arbustos e total ausência de árvores (figura 3b). Ocorrendo geralmente em solos dos tipos Neossolo Litólico, Cambissolo e Plintossolo Pétrico, este tipo de fitofisionomia ocorre com maior frequência em regiões de encostas, chapadas, nascentes, em torno de veredas e nas bordas de matas galeria, mas podendo ser encontrado em outros tipos de ambientes. Dentre as espécies comumente encontradas, estão os seguintes táxons: Cyperaceae, Poaceae, Polygaceae, Droseraceae, dentre outros.

O **Campo Rupestre** (figura 3c) é uma fitofisionomia predominantemente herbáceo-arbustiva, onde se verifica a presença eventual de árvores pouco desenvolvidas, com altura de até dois metros. Geralmente, este tipo de fitofisionomia é encontrado em afloramentos rochosos, sendo que algumas espécies podem crescer em fendas rochosas, sem a presença de solo. Além das condições do substrato, a ocorrência do Cerrado Rupestre está relacionada a locais com ventos

constantes e grande variação de temperatura, condições que contribuem para a ocorrência de muitos endemismos e plantas raras.



**Figura 3.** Exemplos de fitofisionomias do tipo Campo Sujo (a), Campo Limpo (b) e Campo Rupestre (c).

## 2.2 O Fogo no Cerrado

Assim como na maioria das savanas, os incêndios florestais no Cerrado são caracterizados como incêndios de superfície, onde se verifica a queima do combustível fino<sup>1</sup> presente no estrato herbáceo da vegetação (MIRANDA *et al.*, 2002). Em relação ao combustível fino, presente no estrato herbáceo, este representa 97% da quantidade de combustível disponível no campo sujo, 90% no Cerrado sentido restrito e 85% no Cerradão (MIRANDA *et al.*, 2002).

Já em relação ao estrato lenhoso (grandes arbustos e árvores), sua queima é restrita devido à alta quantidade de água na biomassa viva, à alta velocidade de deslocamento da frente de fogo e à altura atingida pelas chamas durante o incêndio,

<sup>1</sup> O combustível fino é definido por Luke e McArthur *apud* Miranda *et al.* (2002) como gramíneas vivas e mortas, além de folhas e caules com diâmetro inferior a 6mm.



as quais variam entre 0,8 e 2,8 metros (MIRANDA *et al.*, 2002). Como resultado deste tipo de comportamento, é comum que em incêndios florestais ocorridos no Cerrado, o impacto do fogo seja maior no estrato rasteiro, fazendo com que árvores e grandes arbustos não tenham suas folhas queimadas, conforme mostrado na figura 4.



**Figura 4.** Efeitos do fogo nos estratos herbáceo e lenhoso de uma área ocupada pelo Cerrado Sentido Restrito. Verifica-se que os efeitos do fogo são maiores no estrato herbáceo, o qual foi completamente queimado. No estrato lenhoso, apenas arbustos menores foram afetados, ao passo que as árvores praticamente não foram, fato que pode ser comprovado pela presença de folhas.

O fogo é elemento comum no Cerrado, assim como na maioria das savanas (MIRANDA *et al.*, 2002). Ao longo de milhares de anos o fogo tem atuado como fator co-determinante na seleção de características morfológicas e fisiológicas, fazendo do Cerrado um bioma resistente ao fogo e ao mesmo tempo dependente dele (COUTINHO, 2006; PIVELLO, 2011). Porém, diante da intensificação das atividades antrópicas, tem-se verificado uma alteração no regime natural do fogo no Cerrado (HOFFMAN, 1999; RAMOS-NETO & PIVELLO, 2000).

Neste processo de alteração, a intensificação e expansão da agricultura e da pecuária possuem papel bastante relevante. Em ambas as atividades, o uso do fogo é prática comum, tendo como objetivo auxiliar na remoção da vegetação nativa com o intuito de preparar o espaço para o plantio ou para a formação de pastos. Além disso, durante o período da estiagem, momento em que há uma diminuição da disponibilidade de alimento para o gado, o fogo é empregado com o intuito de

estimular a rebrota do capim, contribuindo para a renovação dos pastos (KLINK & MACHADO, 2005; PIVELLO, 2011). Nestas ações não são raros os casos onde práticas inadequadas sejam responsáveis pela perda de controle do fogo, o qual acaba se propagando além dos limites desejados, afetando a vegetação nativa e podendo causar incêndios de proporções consideráveis (SOARES, 1992; PIVELLO, 2011).

As atividades antrópicas, além de alterarem a frequência de ocorrência do fogo, alteram também, seu período de ocorrência e, conseqüentemente, a intensidade de seus efeitos. Enquanto o fogo de origem natural, normalmente associado à ocorrência de raios, ocorre geralmente na transição entre a estiagem e o período chuvoso, o fogo de origem antrópica ocorre durante o período da estiagem. Ramos-Neto e Pivello (2000), em estudo realizado no Parque Nacional das Emas, no Estado de Goiás, ao monitorarem a ocorrência de incêndios, entre junho de 1995 e maio de 1999, constataram que enquanto a maioria dos incêndios de origem antrópica ocorreu no período da estiagem, a maioria dos incêndios naturais ocorreu no período chuvoso e na transição entre a estiagem e o período chuvoso.

Outra constatação obtida por Ramos-Neto e Pivello (2000) diz respeito à dimensão da área afetada pelo fogo em relação ao seu período de ocorrência. Constatou-se que os incêndios ocorridos no período da estiagem afetaram áreas maiores do que os incêndios ocorridos no período de transição e no período úmido. Esta situação pode ser explicada pelo fato de a chuva e a umidade atuarem como barreiras para a propagação do fogo, barreiras estas que inexistem no período da estiagem, criando um cenário favorável para a propagação do fogo, fazendo com que os impactos sejam maiores.

São relatados diferentes efeitos oriundos da alteração do regime natural do fogo no Cerrado. Estudos têm demonstrado que o aumento na frequência de ocorrência do fogo, em áreas ocupadas por vegetação lenhosa, resulta no aumento na taxa de mortalidade de indivíduos (MIRANDA & SATO, 2005; MEDEIROS & MIRANDA, 2004). Além disso, outros estudos apontam a redução na densidade e tamanho das espécies lenhosas (HOFFMAN, 1999), bem como o favorecimento do domínio de espécies herbáceas e de fitofisionomias abertas (MIRANDA & SATO, 2005; PIVELLO, 2011).

De acordo com Frizzo *et al.* (2011), enquanto os efeitos do fogo sobre a vegetação do Cerrado são relativamente bem conhecidos, o mesmo não acontece em relação aos efeitos sobre sua fauna, de modo que o pequeno número de estudos, aliado à grande diversidade de fauna existente no Cerrado, dificulta ainda mais a compreensão a respeito do tema. Apesar da baixa disponibilidade de estudos, Frizzo *et al.* (2011) afirmam que os impactos do fogo sobre a fauna dependem, dentre outros fatores, da frequência e da intensidade do fogo.

Os estudos referentes aos impactos do fogo, em especial em relação à sua frequência, não se restringem ao meio biótico. Em relação ao meio abiótico, o fogo é um importante fator na ciclagem de nutrientes (MIRANDA *et al.*, 2002). Sabe-se, por exemplo, que o ciclo do nitrogênio é particularmente sensível às mudanças ocasionadas pela ocorrência frequente do fogo (NARDOTO & BUSTAMANTE, 2003). Em estudo realizado em uma região formada por Cerrado aberto, Pivello e Coutinho (1992) estimaram que a ocorrência sucessiva do fogo, com intervalos de três anos entre cada ocorrência, é necessária e adequada para que a ciclagem dos nutrientes ocorra sem que haja impacto negativo sobre o balanço nutricional, podendo ser inferido, portanto, que ocorrências com intervalos menores, como tem acontecido devido à ação do homem, interferem negativamente neste balanço de nutrientes.

Quando se fala em impactos causados pelo fogo, talvez o ponto mais abordado seja aquele referente às emissões de gases e partículas. A atenção dada a este tema está diretamente relacionada com a questão do aquecimento global, porém, sem entrar no mérito da existência ou não de tal fenômeno, não se pode negar o fato de que os incêndios florestais influenciam na emissão de gases e partículas, representando uma perturbação do ambiente, situação agravada pela alteração da dinâmica dos incêndios florestais. A emissão de gases e partículas provenientes dos incêndios florestais representa um sério problema de saúde pública, especialmente em parte da região Norte e no Centro-Oeste do país, regiões onde a emissão de poluentes, provenientes das queimadas, contribui fortemente para a diminuição da qualidade do ar, refletindo no aumento do número de internações provocadas por problemas respiratórios em épocas da seca (IBGE, 2010).

### **2.3 Sensoriamento Remoto Aplicado ao Monitoramento de Incêndios Florestais**

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, permitindo, por exemplo, uma melhor mensuração de seus impactos. Neste sentido, o Sensoriamento Remoto, devido às suas potencialidades, têm se mostrado uma excelente ferramenta, permitindo a realização de uma série de análises que têm aumentado, consideravelmente, a compreensão a respeito dos incêndios florestais.

Quando se fala em Sensoriamento Remoto aplicado ao monitoramento de incêndios florestais é possível distinguir duas vertentes: uma destinada à identificação de focos ativos de incêndios, e outra destinada à identificação das áreas afetadas pelos incêndios (SETZER *et al.*, 2007; FRASER *et al.*, 2000).

A identificação de focos ativos se baseia na detecção da radiação eletromagnética emitida pelas altas temperaturas atingidas nos incêndios florestais, sendo assim, este tipo de identificação somente é possível quando há coincidência entre o momento de passagem do sensor e o momento de ocorrência do incêndio (MARTÍN & CHUVIECO, 1995), fator que contribui para o aumento dos erros de omissão na quantificação dos incêndios (LENTILE *et al.*, 2006). Além disso, a detecção de focos ativos não permite, ao menos de forma direta, a quantificação da área afetada pelos incêndios detectados (GIGLIO *et al.*, 2009; ROY *et al.*, 2005), no entanto, fornece informações a respeito do local e do momento da ocorrência do fogo, permitindo a identificação de padrões espaciais e temporais em sua ocorrência (PEREIRA, 2003).

Já a identificação de áreas afetadas pelo fogo se baseia na detecção das alterações provocadas pelo incêndio, tais como a deposição de cinzas e carvão provenientes da queima da vegetação. Tais alterações permanecem detectáveis por tempo superior ao tempo de permanência do sinal de um foco ativo (FRASER *et al.*, 2000; BASTARRIKA *et al.*, 2011; EVA & LAMBIN, 1998), sendo assim, muitos dos incêndios não detectados sob a forma de focos ativos apresentam maior probabilidade de serem identificados sob a forma de áreas queimadas, permitindo a

realização de análises mais detalhadas do que as análises realizadas a partir de dados de focos ativos.

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 estimativa da emissão de gases provenientes da queima (EVA & LAMBIN, 1998a; 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 mais robustas, tais como aquelas destinadas a estimar o grau de severidade dos incêndios (ESCUIN *et al.*, 2008; MILLER & THODE, 2007).

### **2.3.1 Identificação de áreas queimadas**

Diante da importância da identificação de áreas queimadas, diferentes metodologias têm sido aplicadas nesta atividade. Dentre tais metodologias, a mais simples é a interpretação visual de imagens, onde um intérprete identifica e delimita, de forma manual, as áreas queimadas. Apesar dos bons resultados possíveis de serem obtidos por um intérprete bem treinado, a interpretação visual possui como desvantagens a subjetividade do intérprete e o grande tempo demandado (PEREIRA *et al.*, 1997; HUDAK & BROCKETT, 2004).

Como alternativa à interpretação visual, diversas metodologias automatizadas têm sido utilizadas, reduzindo o tempo demandado e eliminando a subjetividade das análises. Estas metodologias envolvem o uso de diferentes ferramentas, tais como árvores de decisão (SILVA *et al.*, 2005), análises de mistura espectral (QUINTANO *et al.*, 2006), modelos de regressão logística (KOUTSIAS & KARTERIS, 1998) e análises de principais componentes (HUDAK & BROCKETT, 2004).

Além destas ferramentas, bastante atenção tem sido dada ao uso dos índices espectrais, graças a sua simplicidade conceitual e ao seu bom desempenho computacional (VERAVERBEKE *et al.*, 2011). Diante disso, diferentes índices têm sido criados com a finalidade de identificar as áreas afetadas pelo fogo, tais como o *NBR – Normalized Burn Ratio* (QUINTANO *et al.*, 2011) e o *BAI – Burned Area Index* (CHUVIECO *et al.*, 2002), e até mesmo índices destinados ao estudo da vegetação

têm sido utilizados, como é o caso dos índices *NDVI – Normalized Difference Vegetation Index* (GARCÍA & CHUVIECO, 2004) e *SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index* (BOSCHETTI *et al.*, 2010). Apesar das vantagens, há referências ao fato de que limiares de índices espectrais determinados para a identificação de áreas queimadas, normalmente variam conforme a severidade do incêndio, tipo de vegetação, condições meteorológicas, sensores utilizados, dentre outros fatores (LI *et al.*, 2000; BOSCHETTI *et al.*, 2010; STROPPIANA *et al.*, 2012), dificultando a determinação de limiares que sejam universalmente válidos. Além disso, limiares inapropriados podem resultar em grande número de erros de omissão e comissão (VERAVERBEKE *et al.*, 2011).

De modo geral, as metodologias adotadas na identificação de áreas queimadas se baseiam nas alterações espectrais da superfície terrestre verificadas após a ação do fogo (PETROPOULOS *et al.*, 2011), e nesse sentido, tais metodologias podem ser classificadas como uni-temporais ou multi-temporais (QUINTANO *et al.*, 2006; PETROPOULOS *et al.*, 2011; STROPPIANA *et al.*, 2012).

Nas metodologias multi-temporais, a identificação das áreas queimadas se baseia na detecção das alterações espectrais verificadas por meio da comparação de imagens pré e pós-fogo. Sendo assim, a obtenção de bons resultados depende, dentre outros fatores, da realização de um registro preciso entre as imagens, a fim de garantir a comparação entre os mesmos pixels nos instantes pré e pós-fogo. Como vantagem, a abordagem multi-temporal permite a redução da confusão espectral comumente verificada entre as áreas queimadas e outros alvos considerados permanentes nas imagens, tais como corpos hídricos, sombras topográficas e áreas urbanas (ESCUIN *et al.*, 2008; QUINTANO *et al.*, 2006, BASTARRIKA *et al.*, 2011).

Por outro lado, nas abordagens uni-temporais, a identificação das áreas queimadas é realizada com base nas diferenças espectrais entre os elementos de uma mesma imagem pós-fogo (QUINTANO *et al.*, 2006). Ao contrário do que ocorre com as abordagens multi-temporais, nas uni-temporais são comuns os problemas relacionados à confusão entre as áreas queimadas e outros alvos permanentes com comportamentos espectrais semelhantes, problema que pode ser eliminado a partir do uso de máscaras. Como vantagem, o uso de apenas imagens pós-fogo reduz os custos e o tempo de processamento (ESCUIN *et al.*, 2008; PETROPOULOS *et al.*,

2011), tornando desnecessário o processo de registro entre as imagens nos instantes pré e pós-fogo.

Conforme já afirmado, as metodologias adotadas na identificação das queimadas são baseadas nas alterações espectrais causadas pelo fogo, sendo assim, em muitas dessas metodologias, especialmente naquelas baseadas em índices espectrais, o conhecimento a respeito do comportamento espectral das áreas afetadas pelo fogo é de grande importância.

### **2.3.1.1 Comportamento espectral de áreas afetadas pelo fogo**

O comportamento espectral de áreas queimadas está diretamente relacionado às alterações observadas após a ação do fogo, dentre as quais é possível citar a remoção ou redução da vegetação, as alterações em sua estrutura, a deposição de cinzas e carvão, a exposição do substrato e a rebrota da vegetação (ROY *et al.*, 2002; PEREIRA *et al.*, 1997; EPTING *et al.*, 2005; BOSCHETTI *et al.*, 2010). Dentre estas alterações, a deposição de cinzas e carvão é a única evidência irrefutável da ocorrência de um incêndio, visto que, os demais efeitos podem ser causados por outros fatores que não o fogo (PEREIRA *et al.*, 1997).

As cinzas e o carvão<sup>2</sup> são elementos provenientes de diferentes regimes de fogo. As cinzas, material de coloração branco-acinzentada, resultam da combustão completa da biomassa disponível, sendo observadas em regimes de fogo mais intensos, onde são atingidas temperaturas mais elevadas. Já o carvão, material com coloração mais escura, resulta da combustão incompleta, verificada em regimes de fogo menos intensos, onde são atingidas temperaturas menores (SMITH & HUDAK, 2005; PEREIRA *et al.*, 1997; STRONACH & McNAUGHTON, 1989).

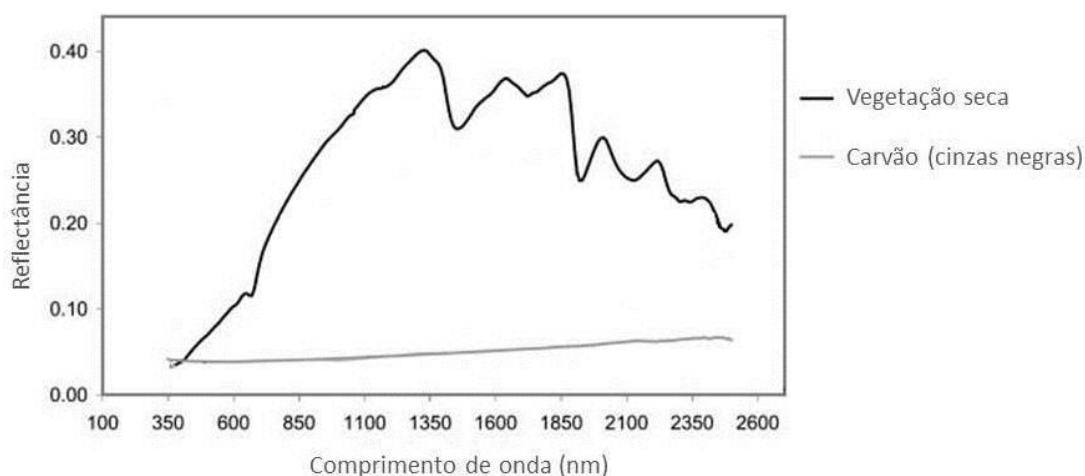
Apesar de cinzas e carvão serem observados em conjunto, geralmente as cinzas apresentam distribuição espacial desigual e descontínua (ROY *et al.*, 2010), limitando sua identificação por meio do sensoriamento remoto (SMITH *et al.*, 2010). Por outro lado, o carvão pode ser encontrado sob a forma de coberturas contínuas (ROY *et al.*, 2010), favorecendo sua identificação. Diante disso, o comportamento

---

<sup>2</sup> As cinzas e o carvão são comumente identificados na literatura como “cinza branca” (*white ash*) e “cinza negra” (*black ash*), respectivamente.

espectral do carvão tem servido de base para variadas metodologias destinadas à identificação de áreas queimadas.

O comportamento espectral do carvão é caracterizado por baixos valores de reflectância em toda a faixa óptica do espectro eletromagnético, apresentando valores mais baixos na região do visível e um pequeno aumento em direção ao infravermelho de ondas curtas. Além do comportamento referente ao carvão, a figura 5 apresenta, também, um exemplo do comportamento espectral de uma vegetação seca, fornecendo, desse modo, uma ideia dos comportamentos espectrais esperados nos instantes pré e pós-fogo.



**Figura 5.** Comportamentos espectrais de amostras de vegetação seca e de carvão coletados no Parque Nacional Kruger, na África do Sul. *Adaptado de: ROY & LANDMANN, 2005.*

Porém, o comportamento espectral do carvão apresentado na figura 5 se refere ao elemento puro, ou seja, este tipo de comportamento é esperado em situações onde a superfície esteja coberta somente pelo carvão, sem mistura com qualquer outro elemento. No entanto, imagens de sensoriamento remoto referentes a áreas afetadas por incêndios florestais, nem sempre apresentam pixels puros compostos apenas pelo carvão, principalmente quando tais imagens apresentam baixa resolução espacial. Na verdade, é comum que tais pixels sejam formados por misturas envolvendo além do carvão, vegetação seca, exposição do substrato (solo ou rocha), parcelas de vegetação não queimada, dentre outros tipos de cobertura (EVA & LAMBIN, 1998; SMITH *et al.*, 2010; VERAVERBEKE *et al.*, 2012) (figura 6).



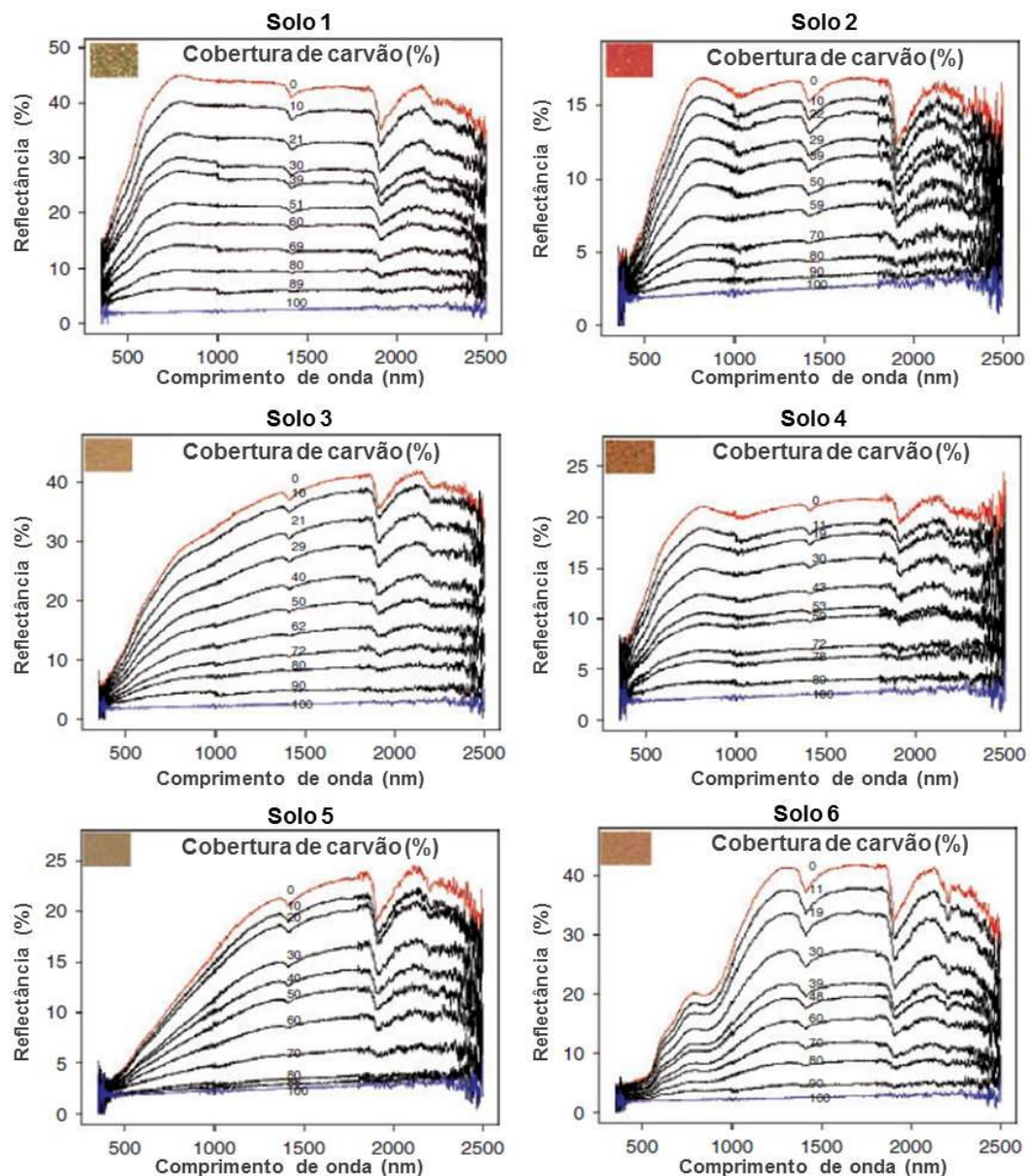


**Figura 6.** Simulação da mistura de elementos na composição de um mesmo pixel de uma imagem. Adaptado de: ROGAN & FRANKLIN, 2001.

O estudo realizado por Smith *et al.* (2010) fornece um panorama interessante a respeito dessa questão da mistura de alvos, porém, envolvendo apenas o carvão e diferentes tipos de solo. Neste estudo, em cada uma das seis amostras de solo utilizadas foram adicionadas diferentes porcentagens de cobertura de carvão, a fim de obter o comportamento espectral de cada um dos cenários construídos. Conforme pode ser visto na figura 7 - onde estão representados os comportamentos espectrais referentes aos diferentes cenários testados - os comportamentos espectrais referentes aos cenários cobertos somente pelo carvão são bastante parecidos com o comportamento do carvão apresentado na figura 5. No entanto, com a redução da cobertura de carvão e o consequente aumento da exposição do solo, o comportamento típico do carvão passa a ser fortemente influenciado pelo comportamento do solo, situação que pode comprometer o desempenho de metodologias de identificação de áreas queimadas baseadas na identificação do comportamento espectral típico do carvão.

Além da influência da mistura de elementos, o comportamento espectral de áreas queimadas também é fortemente influenciado por alterações observadas com o aumento do tempo decorrido desde o incêndio. Em uma área recentemente afetada pelo fogo, espera-se um cenário caracterizado pelo acúmulo de cinzas e carvão provenientes da queima da vegetação, porém, com o tempo, este material tende a ser removido pelo vento ou pela chuva (TRIGG & FLASSE, 2000; GIGLIO *et al.*, 2009), aumentando a exposição do substrato da região e, contribuindo para que o comportamento espectral da área queimada se diferencie cada vez mais do

comportamento típico do carvão. Além disso, o início do processo de rebrota também contribui para o aumento da mistura de alvos e para a alteração do comportamento espectral das áreas afetadas (CORONA *et al.*, 2008; BOSCHETTI *et al.*, 2010; EVA & LAMBIN, 1998a; JUSTICE *et al.*, 2002), podendo comprometer ainda mais as análises que dependem do reconhecimento dos sinais da presença do carvão.



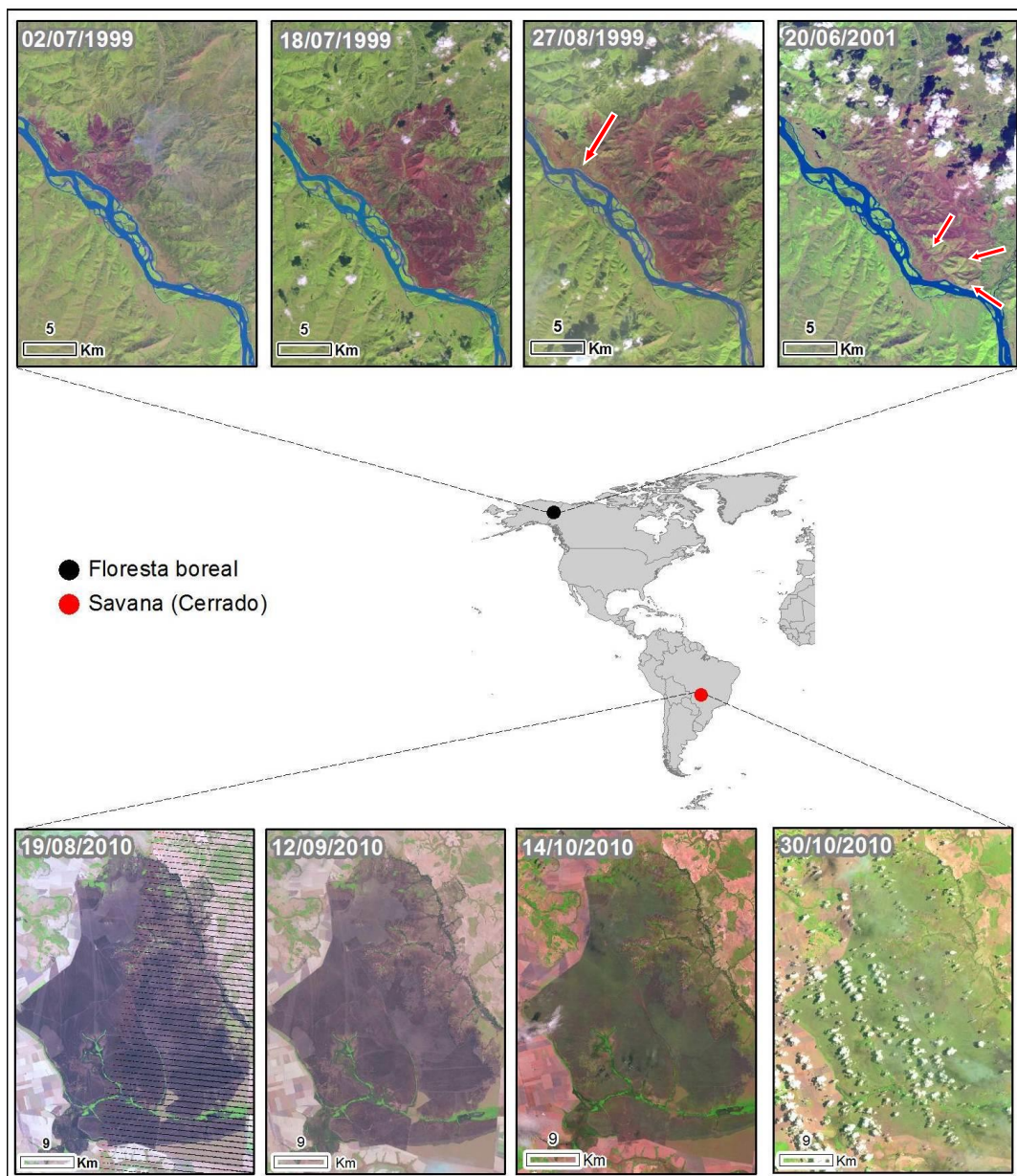
**Figura 7.** Comportamentos espectrais obtidos a partir de misturas de solo e carvão. A linha no extremo superior, em vermelho, representa o comportamento espectral de cada solo puro, já a linha no extremo inferior, em azul, representa o comportamento do carvão puro. As demais linhas representam diferentes proporções de carvão adicionadas aos solos, de forma que esta proporção cresce em direção ao comportamento puro do carvão. A aparente alteração no comportamento espectral do carvão em alguns dos gráficos se deve ao fato destes estarem representados em escalas diferentes. *Adaptado de: Smith et al. (2010).*

Tanto o processo de remoção das cinzas e do carvão quanto o processo de rebrota estão intimamente relacionados ao tipo de vegetação afetada. Em ambientes como as savanas, a baixa quantidade de biomassa disponível faz com que a quantidade de cinzas e carvão depositados seja pequena, e conseqüentemente, acabe sendo rapidamente removida pela chuva ou vento, ao passo que, em ambientes como as florestas temperada e boreal, a maior disponibilidade de biomassa faz com que uma maior quantidade de cinzas e carvão seja produzida, fazendo com que tais materiais permaneçam mais tempo na área queimada (PEREIRA, 2003). Com relação à rebrota, nas savanas este processo também ocorre de forma mais rápida do que nos ambientes das florestas temperada e boreal, visto que, nesses tipos de ambientes, a baixa produção primária líquida faz com que haja um retardo deste processo de recuperação da vegetação (PEREIRA, 2003), permitindo que o substrato fique exposto por mais tempo. Diante disso, áreas queimadas em ambientes como as florestas temperada e boreal permanecem identificáveis por mais tempo do que áreas queimadas em ambientes como as savanas (PEREIRA, 2003).

A figura 8 permite uma comparação entre a evolução de uma área queimada no ambiente de floresta boreal e a evolução de uma área queimada no ambiente savânico do Cerrado. O exemplo utilizado para floresta boreal se refere a um incêndio ocorrido no *Yukon-Charley Rivers National Preserve*, uma área de preservação ambiental localizada no Alasca, enquanto o exemplo utilizado para o Cerrado se refere a um incêndio ocorrido no Parque Nacional das Emas, também uma área de preservação ambiental, localizado no estado de Goiás.

O incêndio ocorrido no *Yukon-Charley Rivers National Preserve* teve início no dia 12 de junho de 1999 (EPTING *et al.*, 2005) e, apesar de não ser possível precisar em que momento houve a extinção do fogo, as imagens indicam que ela ocorreu entre os dias 02 e 18 de julho, pois após o dia 18, não houve aumento da área afetada. Uma análise da evolução da aparência da área queimada, considerando como ponto de partida a imagem referente ao dia 18 de julho, mostra que após 40 dias, no dia 27 de agosto, não ocorreram grandes alterações na aparência da área, exceto pelo início da rebrota (indicada pela seta vermelha) em uma região que já estava queimada no dia 02 de julho. Somente na imagem do dia 20 de junho de 2001, 703 dias após o dia 18 de julho de 1999, verifica-se a evolução

do processo de rebrota em outros pontos da área (indicados pelas setas), porém, ainda assim, é possível identificar sinais da ocorrência do incêndio (apesar da cobertura parcial de nuvens).



**Figura 8.** Comparação entre a evolução da aparência de áreas queimadas no ambiente de Floresta Boreal – imagens (a) a (d) – e no ambiente savânico do Cerrado – imagens (e) a (g).

Já o incêndio ocorrido no Parque Nacional das Emas teve início no dia 13 de agosto de 2010<sup>3</sup> e a data da extinção do fogo foi estimada, com base nas imagens, para o intervalo entre os dias 13 e 19 de agosto de 2010. Em um intervalo de 24 dias, entre os dias 19 de agosto e 12 de setembro, não se observa alterações entre as imagens, porém, entre o dia 12 de setembro e o dia 14 de outubro, a aparência da área sofreu uma mudança significativa, ainda sendo possível identificar a presença do carvão devido ao tom mais escuro da área, porém, a rebrota se evidencia em toda a área. Já no dia 30 de outubro, 78 dias após o início do incêndio, a área se encontra praticamente toda recuperada, sem evidências aparentes da ocorrência do fogo.

Ao se comparar a evolução da área queimada no ambiente de Floresta Boreal com a evolução no ambiente savânico do Cerrado, é nítida a diferença em relação ao tempo de recuperação. No Cerrado, a área sofreu mudanças significativas em um intervalo de 56 dias (entre os dias 19 de agosto e 14 de outubro de 2010), não havendo mais indícios visuais da ocorrência do fogo após 72 dias, contados a partir do dia 19 de agosto. Já no caso da Floresta Boreal, a área queimada somente apresentou evolução no processo de recuperação após 703 dias, e mesmo assim, este processo se restringiu a alguns pontos, sendo mantidos, na maior parte da área afetada, indícios da ocorrência do fogo.

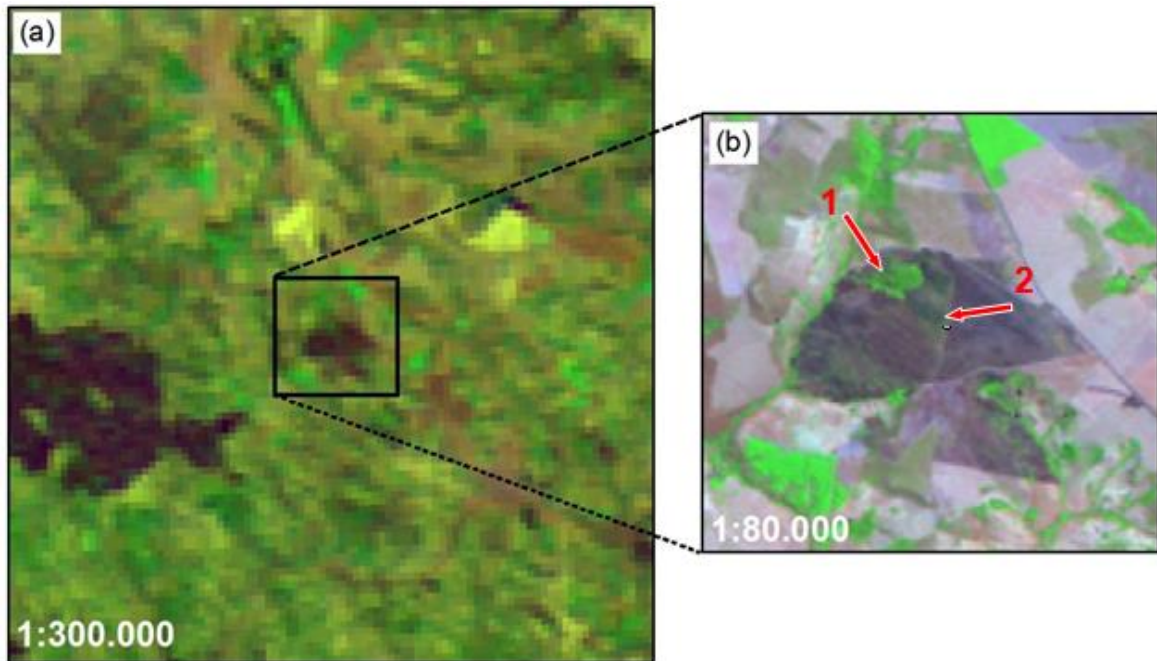
As alterações no comportamento espectral das áreas queimadas, verificadas ao longo do tempo, fazem com que o tempo decorrido desde o momento da ocorrência do incêndio até o momento do imageamento da área afetada, seja crucial para o bom desempenho de metodologias dependentes do sinal da presença do carvão. 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). Este problema é ainda mais sério no caso das savanas, pois devido à maior efemeridade dos sinais da ocorrência dos incêndios nestes contextos (conforme mostrado na figura 8), o bom desempenho da identificação de áreas queimadas se torna dependente de imageamentos frequentes (PEREIRA, 2003).

---

<sup>3</sup> Disponível em: <<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2010/08/incendio-atinge-parque-nacional-das-emas-em-goias.html>>, acessado em: 18 de agosto de 2013.

No entanto, essa dependência de imageamentos frequentes representa uma limitação na identificação de áreas queimadas, pois os 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. Atualmente, existem no mercado sistemas sensores capazes de prover imagens com alta resolução temporal e espacial, tais como os sensores *RapidEye*®, no entanto, o custo de tais imagens inviabilizaria um sistema de monitoramento contínuo de áreas queimadas baseado nestes tipos de imagens, além disso, a reduzida área coberta por cada cena demandaria grande quantidade de cenas.

A desvantagem do uso de sensores de baixa resolução espacial está demonstrada na figura 9, a qual apresenta uma mesma área queimada vista a partir de imagens MODIS e TM-5 (*Thematic Mapper*), com resolução espacial de 250 metros e 30 metros, respectivamente. Conforme pode ser visto na figura 9, as imagens apresentam níveis de detalhamento bastante diferenciados. Enquanto a imagem MODIS permite apenas a identificação, de forma grosseira, da área afetada, a imagem TM-5, além de permitir uma melhor delimitação da área afetada, permite também, a identificação de detalhes impossíveis de serem vistos a partir da imagem MODIS.

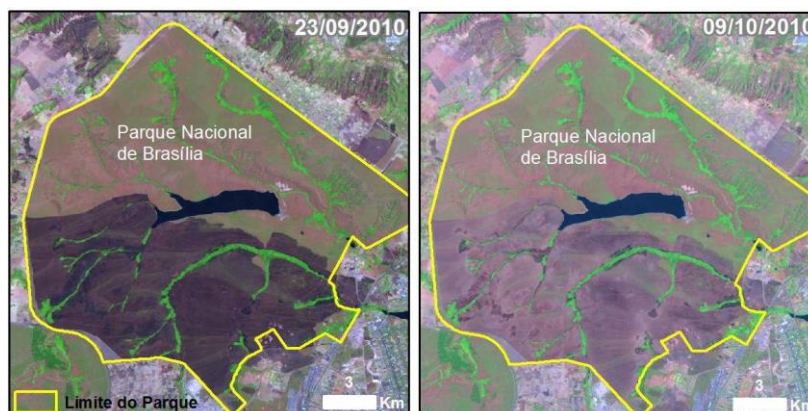


**Figura 9.** Visualização de uma mesma área queimada a partir de imagens do sensor MODIS (a) e do sensor TM (b). São nítidas as diferenças em relação ao nível de detalhes mostrados por cada uma das imagens. A imagem MODIS permite apenas a identificação, com baixa precisão, da área afetada, já a imagem TM (b), além de permitir a melhor delimitação da área afetada, permite a identificação de detalhes não visíveis na imagem MODIS, tais como um fragmento de vegetação não queimada (1) e o início do processo de rebrota (2). A imagem MODIS é referente ao dia 22 de setembro de 2010, já a imagem TM é referente ao dia 23 de setembro do mesmo ano.

Conforme mostrado na figura 9, as imagens de média resolução espacial, com configurações semelhantes à imagem TM, representam uma boa alternativa no mapeamento e no estudo de áreas afetadas por incêndios florestais, permitindo a realização de análises mais detalhadas a respeito dos efeitos do fogo. Em desvantagem, sensores tais como o TM apresentam resolução temporal relativamente baixa, característica que não representa problema no caso de estudos relativos a incêndios em ambientes como a Floresta Boreal, onde as evidências da ação do fogo permanecem por longo período de tempo, ao contrário do que ocorre em ambientes como as savanas, conforme mostrado na figura 8.

No caso sensor TM, sua resolução temporal era de 16 dias, tempo suficiente para que uma área queimada no Cerrado possa sofrer alterações significativas que possam dificultar ou até impedir sua identificação, principalmente em casos de ocorrência de chuva, situação claramente evidenciada pela figura 10. No imageamento realizado no dia 23 de setembro de 2010 foi identificada uma área

queimada na região sul do Parque Nacional de Brasília, no entanto, no imageamento seguinte, ocorrido 16 dias depois, no dia 09 de outubro, grande parte do carvão depositado na região havia sido removido com a contribuição da chuva, alterando completamente a aparência da área afetada.



**Figura 10.** Rápida alteração na aparência de uma área queimada no Parque Nacional de Brasília após a ocorrência de chuva.

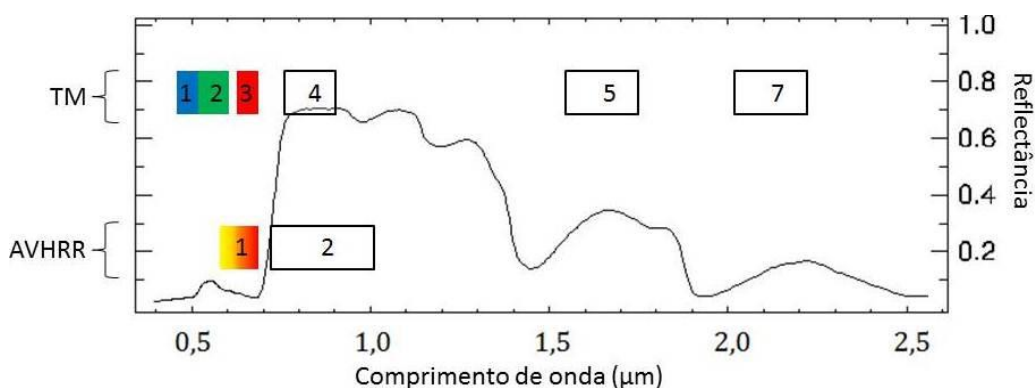
Mesmo com a desvantagem em relação à sua resolução temporal, as imagens TM apresentam grande importância para os estudos relativos a incêndios florestais devido à série histórica de imagens disponibilizadas gratuitamente pelo USGS (*United States Geological Survey*) e pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) no caso das imagens referentes ao Brasil. Além disso, encontra-se operacional o mais recente sensor da série de sensores da missão Landsat, o sensor OLI (*Operational Land Imager*), o qual apresenta muitas semelhanças em relação ao sensor TM, inclusive em relação à resolução temporal de 16 dias. Assim como as imagens do sensor TM (e dos demais sensores presentes na série de satélites Landsat), as imagens do sensor OLI são disponibilizadas gratuitamente pelo USGS.

Diante da disponibilidade da série histórica e das imagens atuais geradas pela missão Landsat, é de grande relevância o desenvolvimento de metodologias que permitam o máximo de aproveitamento destas imagens nos estudos relativos a incêndios florestais, seja em análises históricas, seja na operacionalização de sistemas de monitoramento contínuo de áreas queimadas. No caso do Cerrado, assim como nos demais ambientes savânicos, o uso destas imagens esbarra, muitas



vezes, na limitação relativa à sua resolução temporal, conforme já mostrado anteriormente. Diante disso, estudos destinados a contornar essa limitação temporal possuem grande importância, e nesse sentido, melhorar a compreensão a respeito do processo de evolução temporal do comportamento espectral de áreas queimadas pode representar um grande avanço, uma vez que a compreensão deste processo de evolução pode indicar a existência de padrões que permitam identificar áreas queimadas, em ambientes savânicos, mesmo dias após a ocorrência do fogo. Porém, poucos estudos têm se voltado para a compreensão deste processo de evolução.

França e Setzer (2001) monitoraram durante 14 meses as mudanças causadas por um incêndio florestal ocorrido no Cerrado do Parque Nacional das Emas, a partir de análises baseadas nas bandas 1 (0,58-0,68  $\mu\text{m}$ ), 2 (0,72-1,1  $\mu\text{m}$ ) e 3 (3,55-3,93  $\mu\text{m}$ ) do sensor AVHRR (satélite NOAA-11) e em dados de NDVI. No entanto, a baixa resolução espacial deste sensor (1,1 quilômetro), resulta em dados bastante influenciados pela mistura espectral. Além disso, a baixa resolução espectral do sensor AVHRR em relação ao sensor TM, na região óptica do espectro eletromagnético, restringe os dados obtidos a apenas 2 bandas (figura 11).



**Figura 11.** Comparação entre as resoluções espectrais dos sensores TM e AVHRR na região óptica do espectro eletromagnético.

Trigg e Flasse (2001) analisaram a evolução temporal do comportamento espectral de uma área afetada por incêndio florestal em uma região de savana na Namíbia. Os dados foram obtidos ao longo de 13 dias após a ocorrência do incêndio, por meio de espectrorradiometria de campo. Apesar da potencialidade da

análise realizada no estudo, o acompanhamento durante apenas 13 dias não foi suficiente para revelar detalhes das alterações espectrais na região.

## **2.4 Espectrorradiometria de Reflectância**

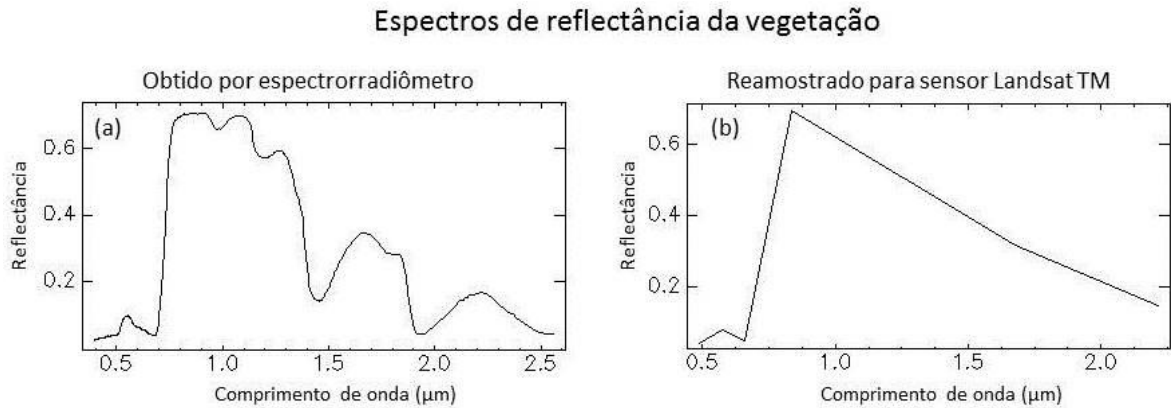
Com o advento das imagens multiespectrais e, mais recentemente, das imagens hiperspectrais, a caracterização espectral dos alvos presentes na superfície terrestre se tornou imprescindível para o sensoriamento remoto, e nesse sentido, a espectrorradiometria tem desempenhado uma papel de grande importância.

A espectrorradiometria, também conhecida como espectroscopia, pode ser definida como o estudo da radiação eletromagnética refletida, emitida ou espalhada por um material em função do comprimento de onda (CLARK, 1999), realizado com o objetivo de caracterizar o comportamento espectral dos diferentes materiais presentes na superfície da Terra. Quando esta caracterização se refere à região óptica do espectro eletromagnético (0,35 a 3,0 $\mu$ m), a espectrorradiometria é dita de reflectância. A reflectância é uma grandeza obtida a partir da razão entre a radiação eletromagnética refletida pelo alvo (radiância) e a radiação que incide no alvo (irradiância), sendo que, normalmente, a irradiância é medida indiretamente com o auxílio de uma placa de referência capaz de refletir praticamente 100% da radiação solar incidente, permitindo, desse modo, sua medição.

Os processos relacionados à interação entre a radiação eletromagnética e a matéria, e que, conseqüentemente, são responsáveis pelo comportamento espectral da matéria, podem ser classificados em interações macroscópicas – aquelas relacionadas com características físicas da matéria – e microscópicas – relacionadas com a constituição da matéria (MENESES, 2001a). Maiores detalhes a respeito destes processos podem ser obtidos em Meneses (2001b) e Clark (1999).

A grande vantagem da espectrorradiometria é a possibilidade de se medir a radiação refletida em centenas ou até mesmo milhares de intervalos de comprimento de onda, gerando como resultado, espectros de reflectância contínuos (figura 12a), os quais permitem análises bastante aprofundadas a respeito da matéria, inclusive a respeito de parâmetros biofísicos (MILTON, 1987). Além disso, a partir dos

espectros contínuos é possível realizar reamostragens que permitem simular espectros a partir das configurações de diferentes sistemas sensores (figura 12b).



**Figura 12.** Espectro de reflectância da vegetação obtido por espectrorradiômetro (a) e espectro da vegetação reamostrado para o sensor Landsat TM (b), a partir do espectro obtido pelo espectrorradiômetro.

A espectrorradiometria pode ser realizada em laboratório, em campo ou a partir de imagens. Em laboratório é possível obter espectros em condições controladas, eliminando, por exemplo, as influências da atmosfera. Neste caso, os valores de reflectância estão diretamente relacionados com as características químicas e físicas dos alvos, possibilitando a realização de análises a respeito da natureza do alvo (MENESES, 2001a).

Em levantamentos espectrorradiométricos de campo são utilizados equipamentos similares ao utilizados em levantamentos de laboratório, mas enquanto em levantamentos de laboratório se utiliza uma fonte de radiação artificial, em campo, a radiação utilizada é a emitida pelo Sol, fazendo com que tais levantamentos estejam sujeitos a interferências atmosféricas. Além disso, diversos fatores que podem ser controlados em laboratório, passam a influenciar os resultados obtidos em levantamentos de campo (NOVO, 2008).

Ao nível de imagem, a espectrorradiometria pode ser realizada a partir de imagens obtidas por sensores aerotransportados (tais como o sensor *AVIRIS – Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer*) ou por sensores orbitais (tais como o *Hyperion*), sendo que, em ambos os casos são obtidas imagens com centenas de bandas, permitindo a obtenção de espectros contínuos ao longo da região óptica do espectro eletromagnético. Os espectros obtidos por meio de imagens estão sujeitos

à influência dos efeitos da atmosfera, além de estarem sujeitos à questão da mistura espectral, dependendo da resolução espacial da imagem.

### **2.4.1 Espectrorradiometria de campo**

O desenvolvimento de sensores aerotransportados multiespectrais na década de 1960, estimulou o desenvolvimento dos primeiros equipamentos capazes de realizar medidas acuradas da reflectância em campo, porém, inicialmente esses equipamentos somente eram capazes de realizar as medições na região compreendida entre as faixas do visível e do infravermelho próximo (MILTON *et al.*, 2009). O primeiro espectrorradiômetro capaz de realizar medições do visível ao infravermelho de ondas curtas, compreendendo praticamente toda a região óptica do espectro eletromagnético (0,4 – 2,5 $\mu$ m), foi descrito por Goetz (1975).

A espectrorradiometria de campo tem sido utilizada com diferentes finalidades, e nem todas diretamente relacionadas ao sensoriamento remoto, como por exemplo, na caracterização de materiais em campo, como alternativa aos métodos tradicionais de laboratório (ASD, 2010). Em relação ao sensoriamento remoto, a espectrorradiometria de campo tem contribuído para a calibração de sensores aerotransportados e orbitais (MILTON *et al.*, 2009), além de contribuir para o aumento da precisão na interpretação e análise de imagens (ASD, 2010). Os levantamentos de campo também têm contribuído em análises destinadas a avaliar a viabilidade da identificação de materiais ou processos por meio do sensoriamento remoto, indicando as melhores configurações de resolução espacial e espectral para tal (ASD, 2010) e auxiliando, dessa forma, em pesquisas voltadas para o desenvolvimento de novos sistemas sensores.

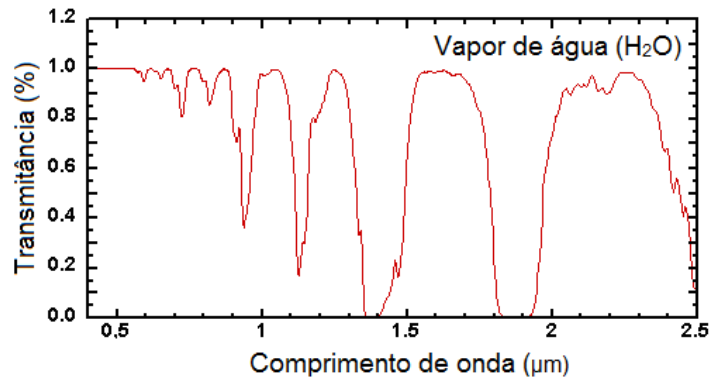
Em relação às suas vantagens, a realização de medidas espectrorradiométricas em campo evita problemas que podem ser gerados no processo de coleta e transporte de amostras para o laboratório, e que podem ocasionar alterações nos resultados obtidos (LONGSHAW, 1974). Em laboratório há o problema relacionado à simulação da iluminação natural (MILTON, 1987). Já em comparação com a espectrorradiometria de imageamento, a espectrorradiometria de campo possui como grande vantagem a independência em relação à disponibilidade

de imagens, viabilizando a execução de levantamentos mais frequentes e, conseqüentemente, permitindo o acompanhamento mais detalhado a respeito da evolução temporal do comportamento espectral dos alvos de estudo. Em campo também é possível obter o comportamento espectral de áreas amostrais muito menores do que o possibilitado pela resolução espacial das imagens.

Durante a realização da espectrorradiometria de campo, alguns fatores básicos devem ser considerados, sendo eles:

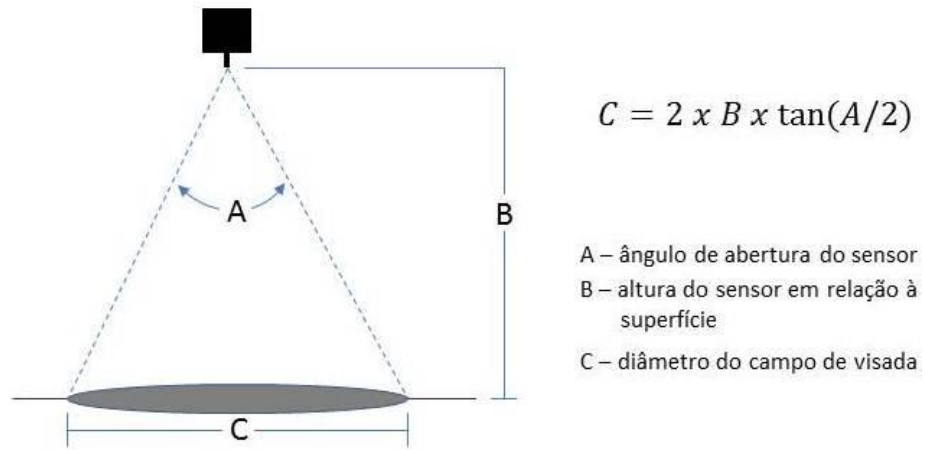
- (I) **Período do dia e do ano** – os períodos do dia e do ano estão relacionados com a posição do Sol, e conseqüentemente, são os principais fatores que controlam a geometria da iluminação solar direta (ASD, 2010). Sob condições de céu claro, a iluminação direta pode responder por até 90% da irradiância que atinge a superfície terrestre, porém, variações na posição do Sol (ângulo de elevação solar) podem alterar essa magnitude (JENSEN, 2009). Recomenda-se que, quando os dados obtidos pela espectrorradiometria de campo forem utilizados para interpretar imagens hiperespectrais, a coleta em campo deve ser realizada sob condições de iluminação semelhantes às condições presentes quando da aquisição das imagens (ASD, 2010).
  
- (II) **Condições atmosféricas** – dentre os constituintes atmosféricos, o vapor de água é o elemento que mais interfere na chegada de radiação eletromagnética à superfície terrestre, apresentando feições de absorção em diversas regiões da faixa óptica do espectro eletromagnético (figura 13). A presença do vapor de água na atmosfera apresenta grande variação ao longo do tempo, sendo assim, a quantidade vapor de água durante a medição da radiância pode ser diferente da quantidade presente durante a medição da irradiância, fazendo com que sejam inseridos erros nos valores de reflectância obtidos. Diante dessa grande variabilidade, reduzir o tempo entre as medições da radiância e irradiância contribui para que o erro introduzido pela presença do vapor de água seja diminuído, pois assim, há maior garantia de que ambas as medidas tenham sido realizadas

sob as mesmas condições atmosféricas (ASD, 2010; JENSEN, 2009). Além da presença do vapor de água, outro fator atmosférico que pode influenciar as medições de campo é o vento, o qual pode movimentar os alvos, introduzindo ruídos, especialmente quando o alvo em questão é vegetação (ASD, 2010; JENSEN, 2009).



**Figura 13.** Transmitância atmosférica considerando apenas o vapor de água (H<sub>2</sub>O). *Adaptado de: ASD (2010).*

- (III) **Geometria de visada e campo de visada** – a geometria de visada está relacionada ao posicionamento do sensor em relação aos alvos. A maior parte dos levantamentos é realizada utilizando a visada vertical em relação aos alvos, conhecida como *nadir* (MILTON *et al.*, 2009), porém, diante da possibilidade de se obter imagens com visadas oblíquas (fora do *nadir*), estudos tem sido realizados a fim de avaliar a reflectância a partir de diferentes geometrias de visada. Em casos onde o objetivo é comparar espectros de campo com espectros de imagem, é necessário que a geometria de visada do levantamento de campo seja similar à geometria de aquisição da imagem (ASD, 2010). Além da geometria de visada, o campo de visada também é um fator de grande importância nos levantamentos, pois representa a dimensão da área “vista” pelo sensor. O campo de visada varia conforme o ângulo de abertura do sensor e a altura do sensor em relação à superfície (figura 14).



**Figura 14.** Determinação do campo de visada do espectrorradiômetro em função da abertura angular do sensor e da altura do sensor em relação à superfície.

### 3 METODOLOGIA

A evolução temporal do comportamento espectral das áreas queimadas foi acompanhada por meio de espectrorradiometria de campo. O uso da espectrorradiometria de campo se justifica pelo fato de, no campo, ser possível conhecer e quantificar, com maior nível de detalhamento, os elementos responsáveis pelo comportamento espectral do objeto analisado. Assim, no presente estudo, a espectrorradiometria de campo foi utilizada com o intuito de fornecer uma melhor compreensão a respeito da relação entre as alterações observadas na área queimada ao longo do tempo e as consequentes alterações observadas em seu comportamento espectral.

Em um segundo momento, os comportamentos espectrais obtidos em campo foram reamostrados para as configurações do sensor TM 5, para a partir deles, ser analisada a existência de padrões na evolução temporal dos espectros que fossem úteis na identificação das áreas queimadas por meio da análise de imagens TM 5.

No período em que os levantamentos espectrorradiométricos de campo foram realizados, o único sensor multiespectral ativo e cujas imagens eram disponibilizadas gratuitamente era o sensor LISS 3, a bordo do satélite ResourceSat 1, sendo assim, uma comparação entre espectros de campo e das imagens, obtidos de forma simultânea, somente seria possível no caso do uso de imagens do referido sensor<sup>4</sup>. No entanto, em termos de resolução espectral, fator de fundamental importância para a presente pesquisa, o sensor LISS 3 apresenta certa limitação se comparado com outros sensores tais como o TM e o ETM+, visto que não possui a banda na região do azul e a banda na região do infravermelho de ondas curtas (figura 15). Essa banda do infravermelho é de grande importância para a identificação de áreas queimadas, sendo inclusive, utilizada na composição do índice NBR (*Normalized Burn Ratio*), o qual tem sido amplamente utilizado em estudos relacionados a queimadas. Portanto, no caso do uso de imagens do sensor LISS 3, a ausência da banda na região do infravermelho de ondas curtas representa uma redução significativa na potencialidade de identificação de áreas queimadas.

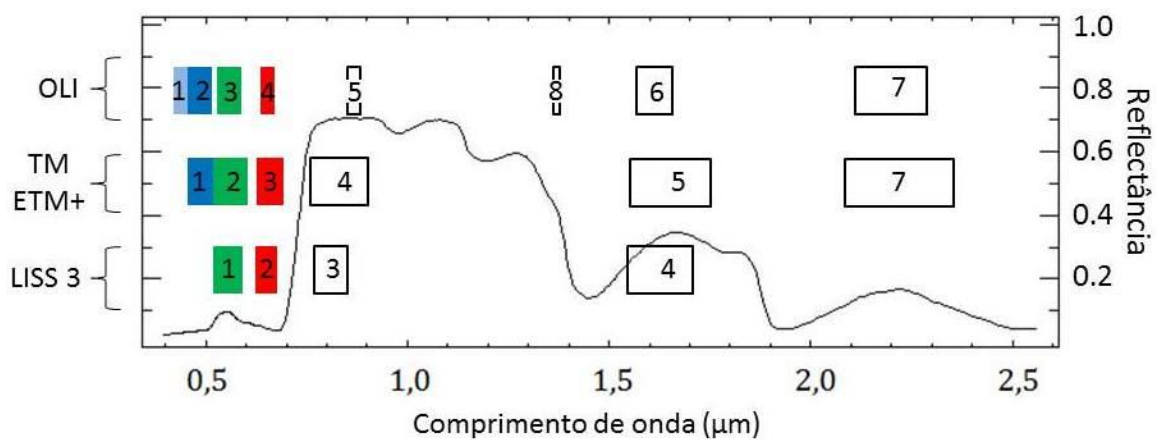
Diante dessa limitação espectral do sensor LISS 3, optou-se por utilizar as imagens do sensor TM, o qual apesar de estar inoperante, possui boa resolução

---

<sup>4</sup> Considerando apenas as imagens disponibilizadas gratuitamente.



espectral, permitindo uma melhor comparação entre os espectros de campo e os espectros das imagens. Outro fator que contribuiu para a escolha do sensor TM foi o fato deste apresentar semelhanças espectrais em relação ao mais recente sensor da série Landsat, o sensor OLI, a bordo do satélite Landsat 8 (figura 15), pois diante dessa semelhança, partiu-se do pressuposto de que os resultados da identificação de áreas queimadas obtidos por meio do uso de imagens TM, também poderiam ser obtidos no caso do uso das imagens OLI.



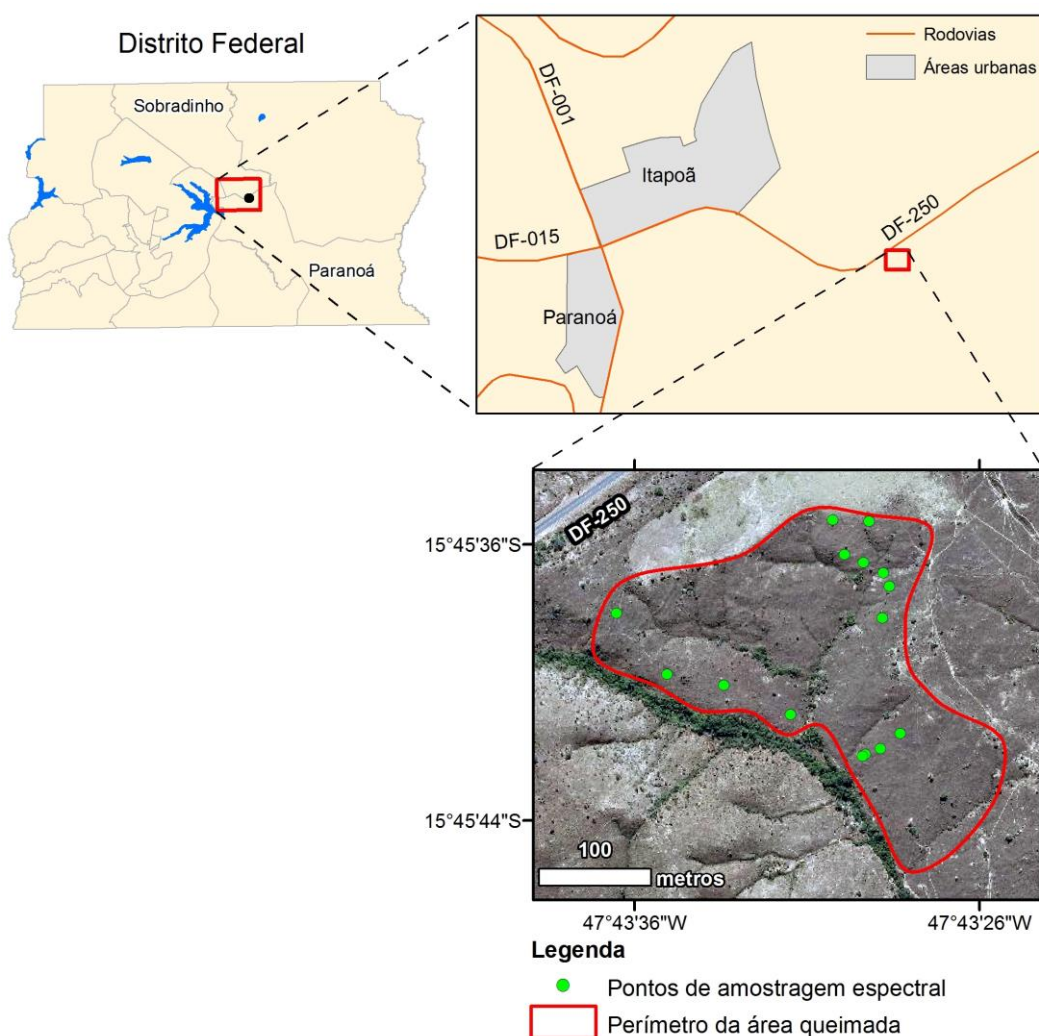
**Figura 15.** Comparação entre as resoluções espectrais dos sensores LISS 3 (ResourceSat 1), TM e ETM+ (Landsat 5 e 7, respectivamente) e OLI (Landsat 8). No caso dos sensores ETM+ e OLI, não se encontram representadas as bandas pancromáticas.

Diante do fato de o sensor TM estar inoperante durante a realização do estudo, não foi possível garantir que os dados de campo fossem obtidos de forma simultânea à obtenção das imagens. Sendo assim, a fim de minimizar as discrepâncias entre os dados de campo e os dados obtidos a partir das imagens e, permitir a comparação entre eles, a obtenção dos dados de campo foi realizada de modo a adequar, o máximo possível, suas condições de aquisição com as condições de aquisição das imagens, ou seja, buscando manter geometrias de visada e de iluminação similares.

### 3.1 Levantamentos espectrorradiométricos de campo

#### 3.1.1 Área de Estudo

A espectrorradiometria de campo foi realizada em uma área queimada com cerca de 3,5 hectares de extensão, localizada às margens da rodovia DF-250, próxima às áreas urbanas do Paranoá e Itapoã (figura 16). A vegetação presente na região era formada por fitofisionomia do tipo campo limpo, fato que pôde ser confirmado pela análise de imagens de alta resolução espacial do *software* Google Earth®.



**Figura 16.** Aproximação dos limites da área queimada considerada no levantamento de campo e a distribuição dos pontos de coleta dos espectros definidos no primeiro dia do levantamento. A imagem utilizada se refere a uma data anterior à ocorrência do incêndio.

A região na qual a área de estudo está inserida apresenta um relevo ondulado, com diferentes orientações de encosta (fig. 17). Além disso, o solo encontrado na região é o neossolo litólico, um tipo de solo pouco desenvolvido e, portanto, pouco profundo. Essas características contribuíram para que a área fosse utilizada como pastagem natural em períodos anteriores. Durante os levantamentos de campo, não foram encontradas evidências da existência da criação de gado na região, mesmo nas áreas não queimadas, fato que indica que a área de estudo não se encontrava influenciada pela presença de gado, uma vez que, a presença deste tipo de criação poderia interferir na resposta espectral obtida.



**Figura 17.** Fotografia panorâmica da área de estudo.

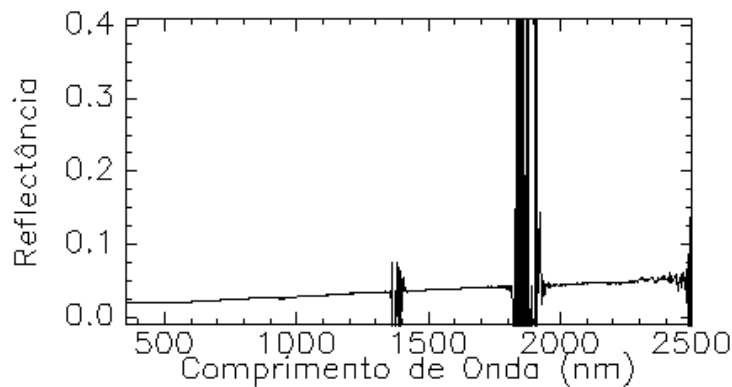
A escolha pela fitofisionomia do tipo campo limpo foi motivada pela impossibilidade de se elevar o espectrorradiômetro a uma altura suficiente para obter informações acima da copa das árvores. Conforme demonstrado anteriormente pela figura 4, em casos de incêndio em fitofisionomias com presença de espécies arbóreas e até mesmo arbustivas mais desenvolvidas, é comum que as copas não sejam atingidas pelo fogo e, nesses casos, seria necessário elevar o espectrorradiômetro acima da copa a fim de avaliar a influência das folhas não queimadas em relação ao comportamento espectral da área afetada.

### 3.1.2 Procedimento de coleta dos espectros

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. O equipamento utilizado pertence ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, tendo sido utilizado, pela primeira vez em campo, na realização do presente estudo, sendo assim, o equipamento encontrava-se em perfeitas condições de calibração, contribuindo para a aquisição de dados com qualidade.

As medições da irradiância – parcela da radiação incidente nos alvos e parâmetro necessário para o cálculo dos valores de reflectância – foram realizadas com o auxílio de uma placa de referência, confeccionada em *Spectralon®*, material que se aproxima de um refletor perfeito. A fim de minimizar os efeitos das variações das condições atmosféricas, a medição da irradiância foi realizada imediatamente antes de cada mediação da radiância – radiação refletida pelos alvos de interesse – procurando manter o menor tempo possível entre ambas as medições.

A presença de vapor d'água na atmosfera é responsável por uma considerável absorção da radiação em torno de 1400nm, 1900nm e 2500nm, causando interferências na reflectância medida nestas regiões (figura 18), sendo 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.



**Figura 18.** Presença do ruído nos comprimentos de onda em torno de 1400nm, 1900nm e 2500nm, causado pela presença do vapor d'água na atmosfera.

A fim de manter a similaridade com a geometria de visada do sensor TM, 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  $25^\circ$  do sensor, permitia o levantamento de uma área de, aproximadamente, 70 cm de diâmetro. A abertura angular (ou *field of view*) de  $25^\circ$  é a maior abertura oferecida pelo equipamento, e foi utilizada pois permite a medição do comportamento espectral de uma área maior.

A coleta dos dados teve início no dia 07 de agosto (dois dias após a extinção do fogo) e continuou 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. Inicialmente, a coleta de campo foi prevista para ocorrer com igual intervalo de tempo entre cada dia de coleta, porém, devido a limitações operacionais isso não foi possível. O horário de coleta dos dados foi definido para estar mais próximo ao horário de aquisição das imagens (em torno das 10 horas), 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. Além disso, os dados foram obtidos sempre com condições de céu claro, sem a presença de nuvens, sendo assim, em alguns casos foi necessário aguardar a melhora das condições do céu, fato que contribuiu para que o horário de coleta dos espectros tenha se estendido além do horário programado.

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 abarcar as variações existentes quanto às 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 foram obtidos 10 espectros de reflectância, a partir dos quais foi obtido um espectro médio por ponto.

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 e as imagens, visto que, devido a essa diferença, a área amostral considerada na imagem (o pixel) pode conter diferentes contextos referentes a cada um dos pontos amostrais de campo. 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 de espectros médios, para cada dia, facilita a avaliação da evolução temporal dos espectros e a análise referente à existência de padrões espectrais nesse processo de evolução. Em seguida, cada um dos espectros médios, referentes aos dias de levantamento, foram reamostrados para as características do sensor TM, para a posterior comparação entre espectros de campo e espectros das imagens.

Para cada um dos espectros obtidos, foi obtida uma fotografia do contexto observado. A fotografia foi utilizada posteriormente com o intuito de se estimar a quantidade dos elementos presentes em cada contexto (substrato, material carbonizado e rebrota). Essa estimativa foi realizada por meio da classificação supervisionada das fotografias no *software* ENVI®.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Padrões dos Espectros de Campo**

Inicialmente, os espectros obtidos em campo serão apresentados de forma a evidenciar a variação espectral existente em cada dia, para tanto, serão apresentados os espectros mínimo, médio e máximo de cada dia. Por espectro mínimo entende-se aquele com os menores valores de reflectância e por espectro máximo aquele com os maiores valores de reflectância, sendo que os demais espectros obtidos no dia apresentaram valores intermediários entre os valores mínimo e máximo. Já o espectro médio trata-se de um espectro calculado considerando os espectros de todos os pontos observados em cada dia.

#### **Dia 07 de agosto – 1º levantamento**

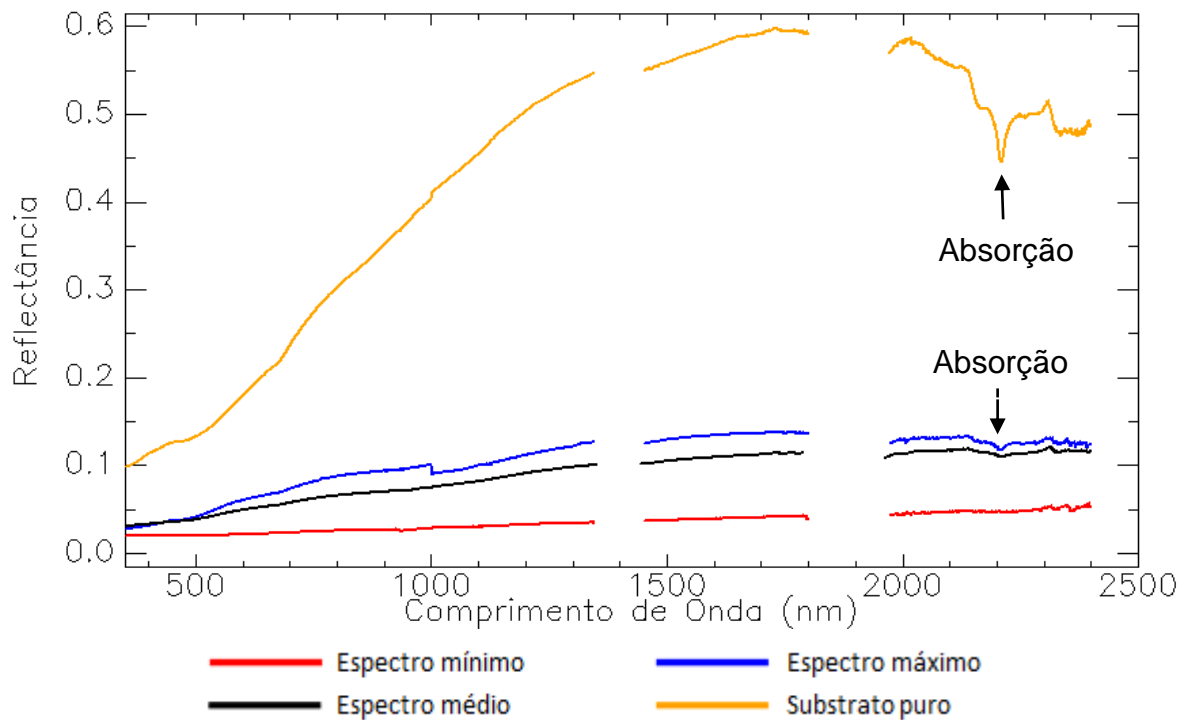
No dia 07 de agosto, dois dias após a ocorrência do incêndio, a superfície da área de estudo se encontrava coberta por substrato aparente (rocha/solo), cinzas e carvão, de forma que em cada um dos pontos de amostragem espectral, tais elementos se apresentavam em diferentes proporções.

No gráfico da figura 19 estão apresentados os espectros mínimo, médio e máximo do dia, além do espectro referente ao substrato puro. O espectro do substrato puro encontra-se representado devido à sua importância no sentido de auxiliar na avaliação a respeito da influência do substrato na composição dos espectros obtidos.

O espectro mínimo se refere a uma região totalmente coberta pelas cinzas e carvão (figura 20a). Este espectro se caracteriza por possuir baixos valores de reflectância em toda região óptica do espectro eletromagnético, apresentando valores mais baixos na faixa do visível e um pequeno crescimento, linearmente contínuo em direção ao infravermelho de ondas curtas, atingindo valores pouco superiores a 0,05 (ou 5%) nos pontos de máxima reflectância.

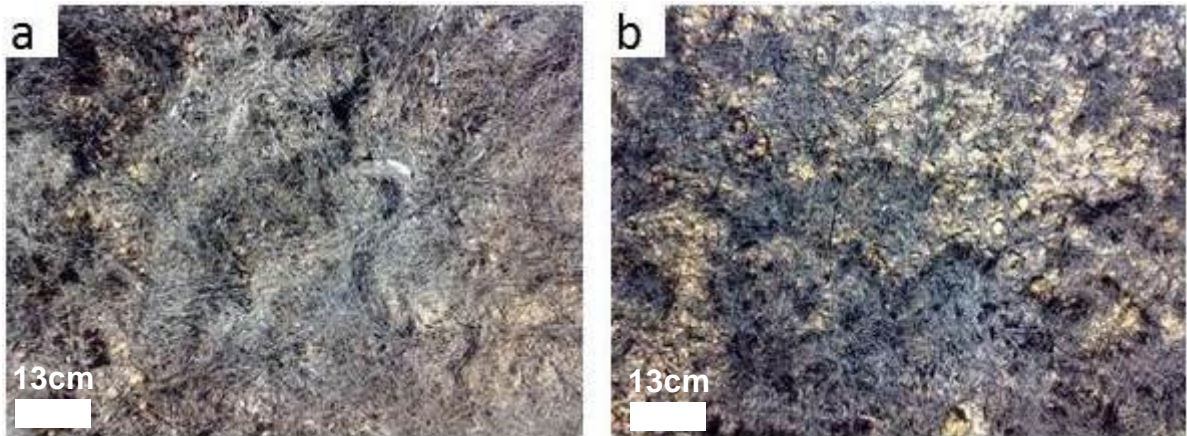
Já o espectro máximo se refere a um contexto caracterizado por cinzas e carvão e pela influência do substrato. Estimou-se, com base na classificação

realizada a partir da fotografia da figura 20b, uma cobertura superficial constituída por cerca de 85% de material carbonizado e apenas 15% de substrato, sendo esses 15% suficientes para influenciar no aumento dos valores de reflectância em toda a região óptica, ou seja, um aumento de albedo. Apesar da pequena quantidade do substrato aparente, sua influência fica clara devido à presença, no espectro máximo, de um suave pico de absorção em torno de 2200nm, mesma feição vista no espectro referente ao substrato.



**Figura 19.** Comportamentos espectrais obtidos no dia 07 de agosto de 2011. Encontram-se representados os espectros mínimo (vermelho), médio (preto), máximo (azul) e o espectro referente ao substrato rochoso puro (alaranjado).





**Figura 20.** Imagens referentes aos espectros mínimo (a) e máximo (b). A figura (a) representa um contexto com a superfície completamente coberta por material carbonizado, enquanto a figura (b) se refere a um contexto caracterizado pela mistura de material carbonizado e substrato.

A diferença entre os espectros mínimo e máximo reside, basicamente, na diferença de albedo e na sutil presença da feição de absorção em 2200nm. Porém, de modo geral, ambos os espectros apresentam um padrão de reflectância bastante similar, caracterizado pelo aumento da reflectância em direção ao infravermelho de ondas curtas. O desnível dos valores de reflectância no espectro do substrato e no espectro máximo, na região em torno de 1000nm, se refere a um ruído causado pela mudança dos detectores do espectrorradiômetro.

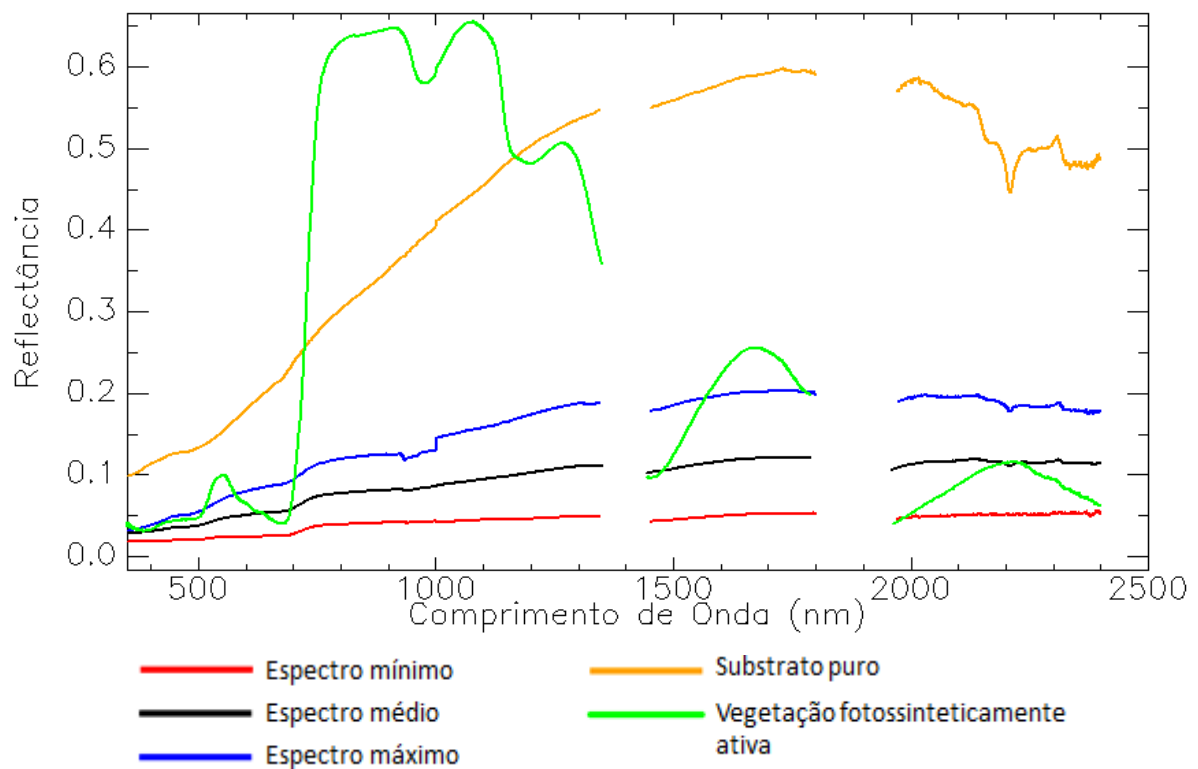
### **27 de agosto – 2º levantamento**

No dia 27 de agosto, 22 dias após a ocorrência do incêndio, já era possível notar a presença da rebrota, sendo assim, os espectros coletados passaram a resultar da mistura de material carbonizado, substrato rochoso e rebrota.

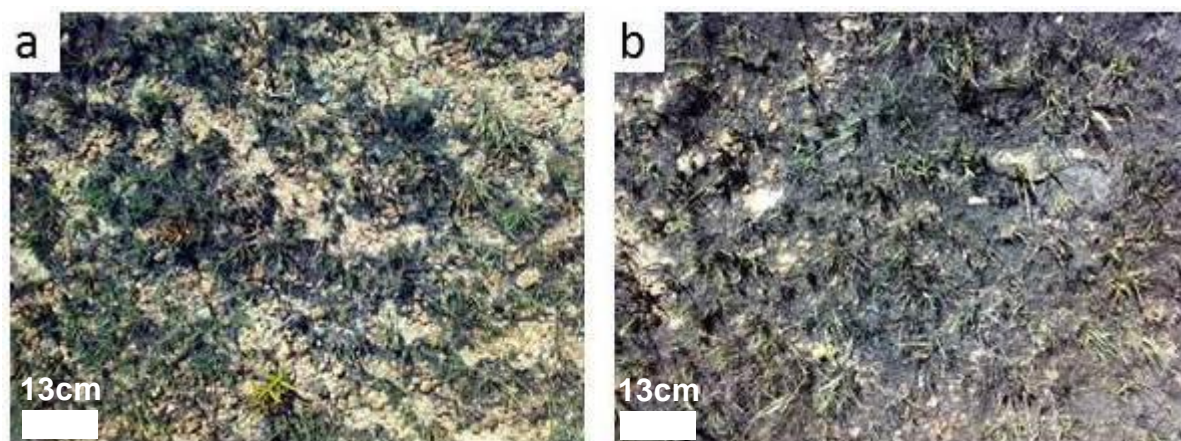
No gráfico apresentado na figura 21 encontram-se os espectros mínimo, médio e máximo, além dos espectros do substrato rochoso e de um exemplo de vegetação fotossinteticamente ativa, este último tendo sido obtido em laboratório. Os espectros referentes à vegetação e ao substrato rochoso são úteis na avaliação a respeito da influência dos referidos elementos na composição dos espectros do dia.

O espectro mínimo se refere a um contexto com predomínio de material carbonizado. Por meio da figura 22b estimou-se, para este contexto, uma cobertura

superficial composta por cerca de 75% de material carbonizado, 13% de substrato rochoso e 12% de rebrota. Essa predominância do material carbonizado resultou na diminuição do albedo do espectro, de modo que, mesmo nos pontos de maior reflectância, os valores não atingiram 0,1 (ou 10%). Em relação ao substrato rochoso, os 13% de participação não foram suficientes para influenciar, de forma significativa, o espectro, fato que pode ser constatado ao se comparar o espectro mínimo com o espectro referente ao substrato.



**Figura 21.** Comportamentos espectrais obtidos no dia 27 de agosto de 2011. Encontram-se representados os espectros mínimo (vermelho), médio (preto), máximo (azul) e os espectros referentes ao substrato rochoso puro (alaranjado) e vegetação fotossinteticamente ativa (verde).

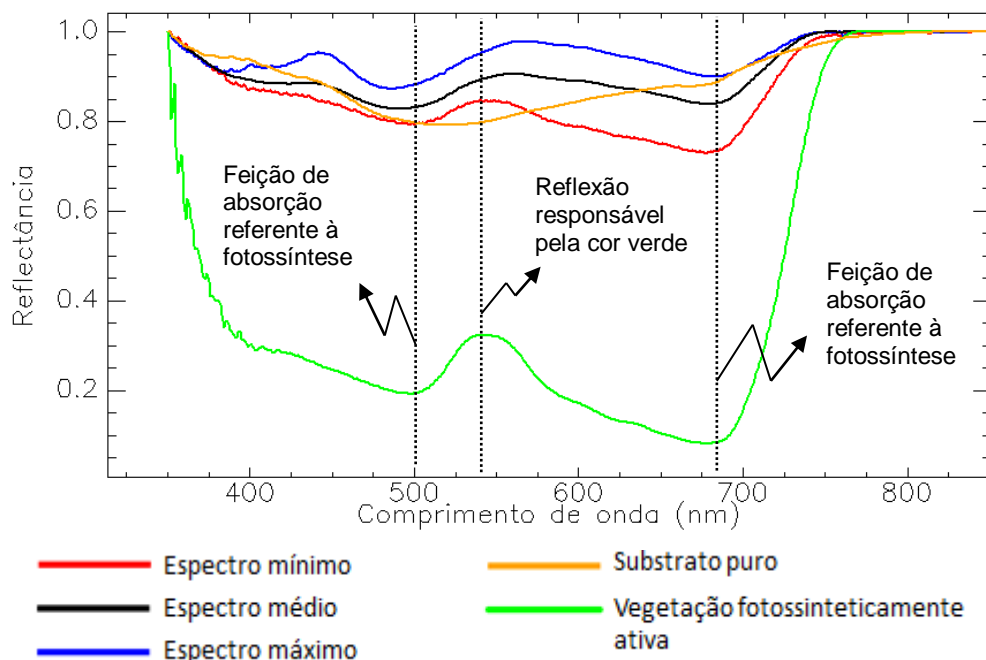


**Figura 22.** Imagens referentes aos espectros máximo (a) e mínimo (b). A imagem (a) se refere a um contexto formado por cerca de 45% de material carbonizado, 45% de substrato e 10% de vegetação fotossinteticamente ativa. Já a imagem (b) se refere a um contexto com predomínio de material carbonizado, representando 75% do material encontrado, complementado por cerca de 13% de substrato e 12% vegetação fotossinteticamente ativa.

No caso do espectro máximo, este se refere a um contexto caracterizado pelo equilíbrio entre as quantidades de material carbonizado e substrato. Para este contexto, estimou-se, por meio da figura 22a, uma cobertura superficial composta por 45% de material carbonizado, 45% de substrato aparente e apenas 10% de rebrota. A menor quantidade de material carbonizado e a maior quantidade de substrato aparente (em relação ao espectro mínimo) fez com que o espectro máximo apresentasse maior albedo do que o observado no espectro mínimo. Além do aumento do albedo, outro fator que evidencia o aumento da influência do substrato na composição do espectro máximo é a presença da feição de absorção em torno de 2200nm, feição fortemente presente no espectro do substrato puro.

Analisando os espectros mínimo, médio e máximo, é possível observar a presença de um pequeno, porém abrupto aumento da reflectância entre 680nm e 740nm (região de transição entre o vermelho e o infravermelho próximo). Este aumento é o comportamento típico observado em vegetação fotossinteticamente ativa, comportamento este que pode ser observado no espectro referente à vegetação fotossinteticamente ativa, apresentado na figura 21. A presença desta feição nos espectros do dia 27 de agosto indica a influência da rebrota na composição dos espectros deste dia. Tal influência pôde ser comprovada por meio da aplicação da remoção do contínuo espectral, técnica por meio da qual se torna possível destacar as feições de absorção presentes nos espectros. Conforme pode

ser observado na figura 23, o aumento abrupto entre 680nm e 740nm, observado nos espectros mínimo, médio e máximo, se mostra bastante evidenciado no espectro referente à vegetação fotossinteticamente ativa.



**Figura 23.** Feições de absorção e reflexão ressaltadas pela remoção do contínuo espectral.

As similaridades entre os espectros mínimo, médio e máximo e o espectro da vegetação não se limitam ao aumento abrupto da reflectância anteriormente citado. Também é possível se constatar semelhanças na região em torno de 500nm, onde tem-se uma feição de absorção referente à realização da fotossíntese e um pico de reflexão em torno de 540nm, responsável pela coloração verde da vegetação fotossinteticamente ativa. No caso do espectro mínimo, a feição de absorção encontra-se exatamente em 500nm, assim como no espectro da vegetação, porém, no caso dos espectros médio e máximo, tal feição encontra-se levemente deslocada para um comprimento de onda um pouco anterior aos 500nm. Em relação ao pico de reflexão responsável pela coloração verde, no caso do espectro mínimo este pico se encontra exatamente em 540nm, ao passo que nos espectros médio e máximo, tal feição encontra-se levemente deslocada, localizada em torno de 560nm.

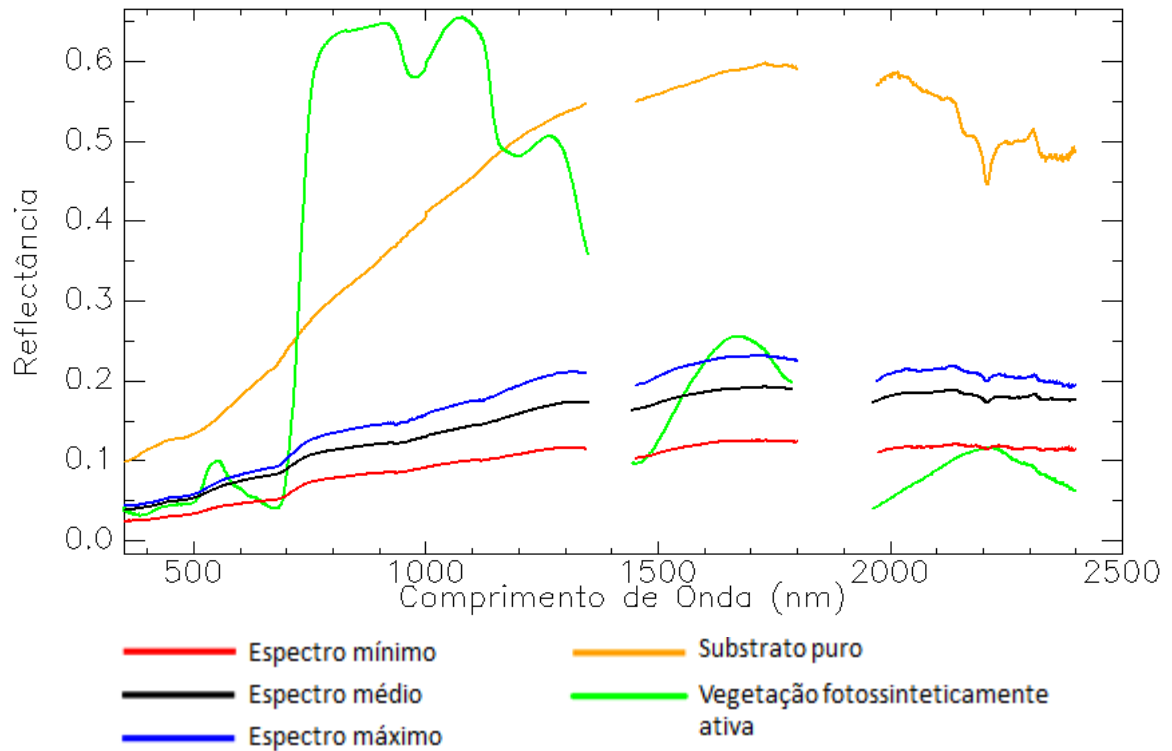
De modo geral, e conforme evidenciado pela figura 23, os espectros mínimo, médio e máximo, na região entre 440nm e 800nm, apresentam grande similaridade

com o espectro da vegetação. Já a partir de 800nm, tais espectros apresentam maior semelhança com o padrão do espectro do substrato, caracterizado por um padrão de reflectância crescente em direção ao infravermelho de ondas curtas. Assim como no caso dos espectros do dia 07 de agosto, os desníveis de reflectância verificados em torno de 1000nm (fig. 21) são provenientes de ruídos causados pela mudança de detectores.

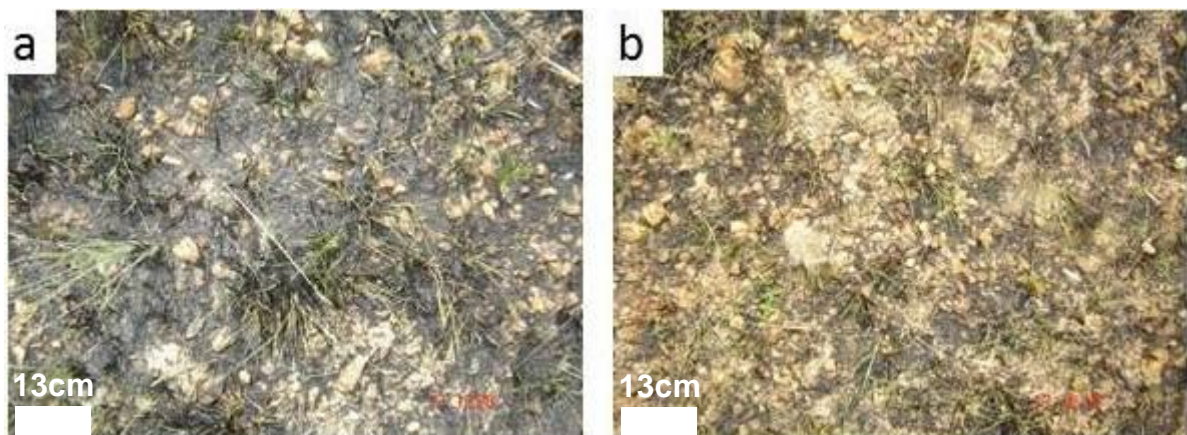
### **17 de setembro – 3º levantamento**

Assim como no dia 27 de agosto, os espectros do dia 17 de setembro também foram resultantes da mistura de material carbonizado, substrato aparente e rebrota. A figura 24 apresenta os espectros mínimo, médio e máximo do dia, além dos espectros referentes ao substrato e a rebrota.

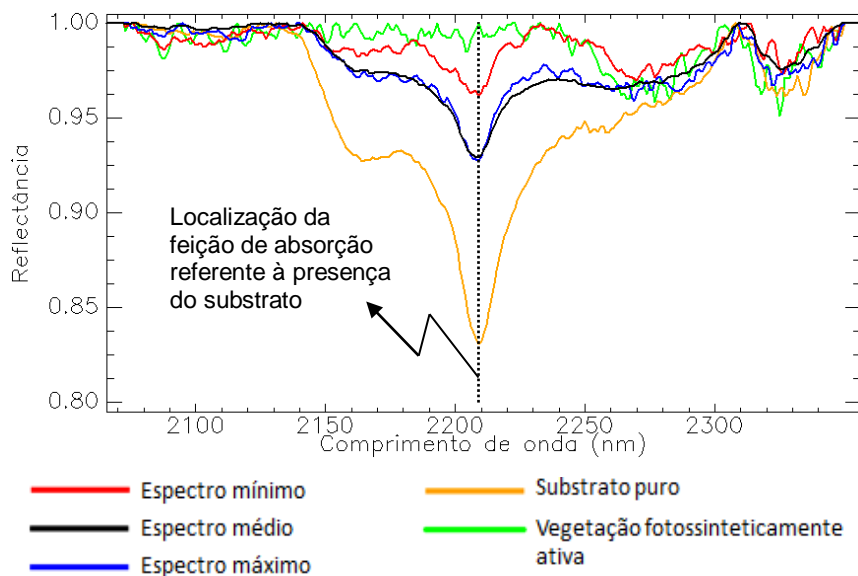
O espectro mínimo se refere a um contexto formado por 20% de substrato, 70% de material carbonizado e 10% de rebrota (figura 25a). Apesar da grande quantidade de material carbonizado, os cerca de 20% de substrato foram suficientes para elevar o albedo do espectro, fazendo com que seu valor, no ponto de máxima reflectância, atingisse pouco mais de 0,1 (ou 10%) na região do infravermelho de ondas curtas. A princípio, por meio da análise do espectro mínimo, a evidência da influência do substrato em sua composição se limita ao aumento do albedo em relação aos espectros mínimos dos dias anteriores. No entanto, ao se analisar o espectro após a remoção do contínuo espectral, fica evidente a sutil presença de feição de absorção em torno de 2200nm (fig. 26), confirmando a evidência da influência do substrato na composição do espectro. Em relação à influência da rebrota, esta se evidencia pela presença do aumento abrupto da reflectância entre 680nm e 740nm, feição já citada anteriormente.



**Figura 24.** Comportamentos espectrais referentes ao dia 17 de setembro de 2011. Encontram-se representados os espectros mínimo (vermelho), médio (preto), máximo (azul) e os espectros referentes ao substrato rochoso puro (alaranjado) e à vegetação fotossinteticamente ativa (verde).



**Figura 25.** Imagens referentes aos espectros mínimo (a) e máximo (b). A imagem (a) se refere a um contexto formado por cerca 20% de substrato rochoso, 70% de material carbonizado e 10% de rebrota. A imagem (b) se refere a um contexto formado por cerca de 43% de substrato, 45% de material carbonizado e 12% de rebrota.



**Figura 26.** Destaque para a feição de absorção presente em torno de 2200nm, evidenciada pela remoção do contínuo espectral e confirmando a influência do substrato na composição dos espectros.

Em relação ao espectro máximo, este se refere a um contexto formado por cerca de 43% de substrato, 45% de material carbonizado e 12% de rebrota (figura 25b). Por meio da análise da figura 24, nota-se que o espectro máximo possui um padrão bastante similar ao padrão do espectro mínimo, apresentando como diferença mais evidente, um maior albedo proveniente da diminuição da cobertura de material carbonizado e do conseqüente aumento na exposição do substrato. A maior quantidade de substrato exposto, em relação ao espectro mínimo, se confirma por meio da análise do gráfico da figura 26, onde é possível notar que a feição de absorção referente ao substrato, localizada em torno de 2200nm, se mostra mais acentuada do que no espectro mínimo.

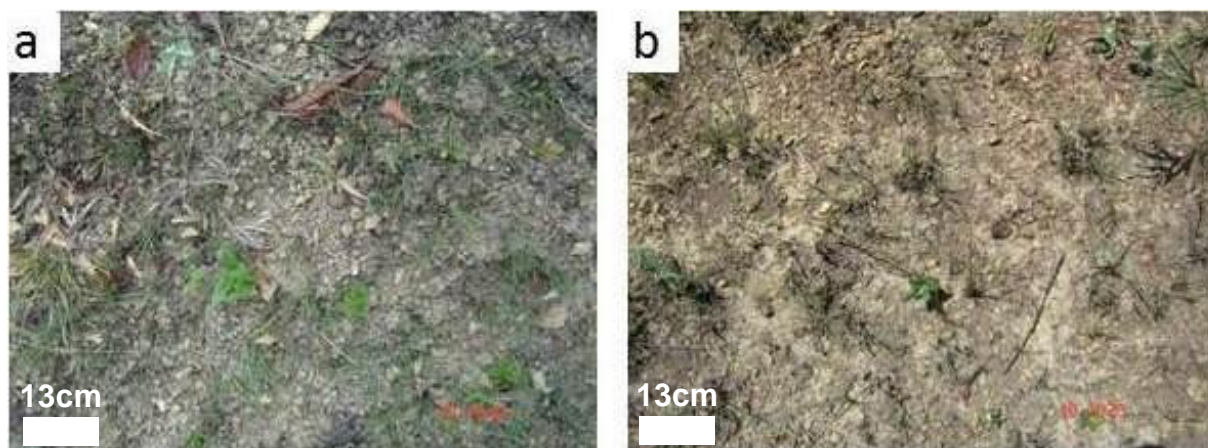
De modo geral, os espectros mínimo, médio e máximo apresentam padrões de reflectância bastante similares entre si, os quais, por sua vez, apresentam um padrão mais similar ao espectro do substrato.

### 10 de outubro – 4º levantamento

O quarto (e último) levantamento de campo foi realizado no dia 10 de outubro, 66 dias após a ocorrência do incêndio. Nesse dia constatou-se que todo o material

carbonizado que se encontrava depositado na superfície, durante os levantamentos anteriores, havia sido removido, fazendo com que a superfície estivesse coberta apenas pelo substrato e pela rebrota. Apesar da remoção do material carbonizado, a ocorrência das chuvas contribuiu para que parte desse material fosse solubilizado e percolasse no solo, resultando no escurecimento do substrato. Entre o dia 17 de setembro e 10 de outubro, foram registrados 33,6mm de chuva na estação meteorológica Brasília, estação mais próxima da área de estudo, distante cerca de 20 quilômetros.

Durante o levantamento observou-se diferentes graus de escurecimento do substrato, conforme pode ser observado nas figuras 27a e 27b, as quais representam os contextos referentes aos espectros mínimo e máximo, respectivamente. Ambas as figuras são referentes a contextos bastante parecidos, sendo a figura 27a referente a um contexto formado por 85% de substrato e 15% de rebrota, ao passo que a figura 27b se refere a um contexto formado por 90% de substrato e 10% de rebrota.



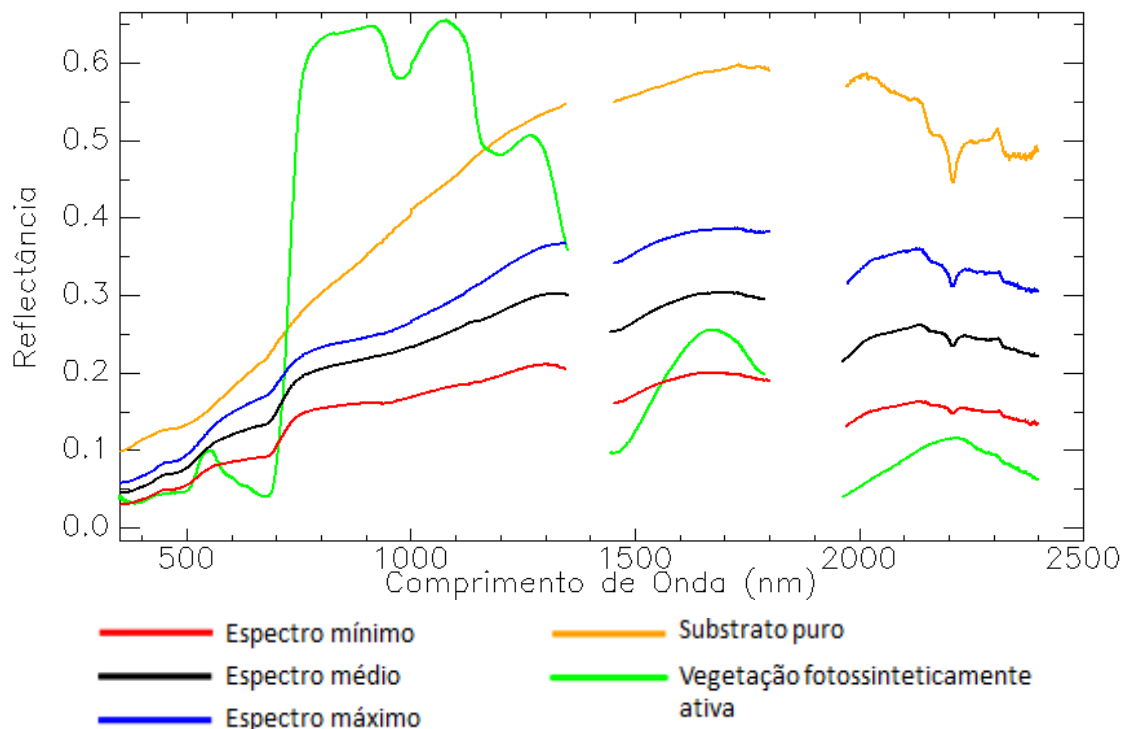
**Figura 27.** Imagens referentes aos espectros mínimo (a) e máximo (b). A imagem (a) se refere a um contexto formado por 85% de substrato e 15% de rebrota. Já a imagem (b) se refere a um contexto formado por 90% de substrato e 10% de rebrota, sendo que, em comparação com o contexto da imagem (a), a imagem (b) apresenta um substrato mais claro.

A grande similaridade entre os contextos apresentados pelas figuras 27a e 27b se reflete na grande similaridade entre os espectros referentes a cada um desses contextos, conforme evidenciado pela figura 28. Apesar disso, algumas



diferenças podem ser identificadas, sendo a mais evidente delas, a diferença de albedo. Esta diferença é menor na região do visível, onde gira em torno de 3% de reflectância, e atinge os maiores valores na região do infravermelho de ondas curtas, onde a diferença gira em torno de 18%. Considerando apenas as porcentagens de cada um dos elementos presentes nos contextos, ou seja, substrato e rebrota, e considerando também que não houve diferença nos ângulos de iluminação e de visada entre os dois pontos, fica evidente que a diferença de albedo verificada se deve às diferenças no grau de escurecimento do substrato.

Outra diferença significativa entre os espectros mínimo e máximo diz respeito à relação entre as reflectâncias na região do infravermelho próximo (em torno de 800nm) e no final do infravermelho de ondas curtas (entre 2000nm e 2500nm). No caso do espectro mínimo, os valores de reflectância nestas duas regiões são bastante próximos, ao passo que, no caso do espectro máximo, os valores na região do infravermelho próximo são menores do que os valores referentes ao final da região do infravermelho de ondas curtas. Como consequência, o espectro mínimo apresenta uma declividade menor do que a declividade observada no espectro máximo, considerando as duas regiões citadas.



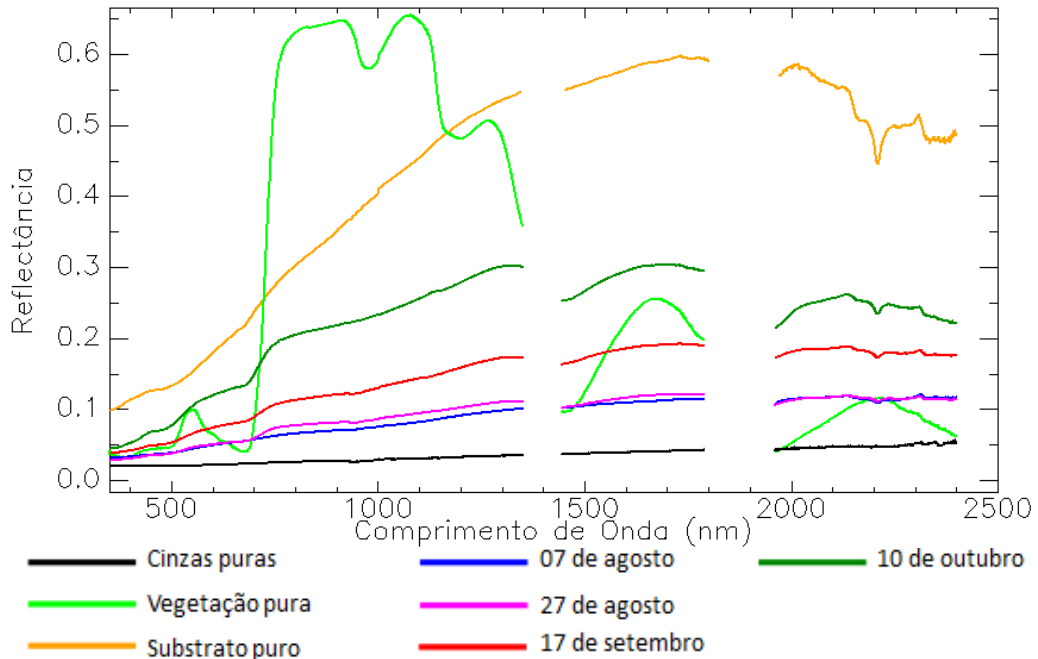
**Figura 28.** Comportamentos espectrais referentes ao dia 10 de outubro de 2012. Encontram-se representados os espectros mínimo (vermelho), médio (preto), máximo (azul) e os espectros referentes ao substrato rochoso puro (alaranjado) e à vegetação fotossinteticamente ativa (verde).

Comparando-se as reflectâncias em 800nm e cerca 1650nm também é possível notar uma diferença entre os espectros mínimo e máximo. No caso do espectro máximo, a reflectância em 800nm atinge 15% e a reflectância em 1650nm atinge 20%, ou seja, diferença de apenas 5% entre os pontos. Já no caso do espectro mínimo, a reflectância atinge cerca de 25%, em 800nm, e cerca de 40% em 1650nm, ou seja, diferença de 15% de reflectância, três vezes superior à diferença observada no espectro mínimo.

## **4.2 Evolução temporal dos espectros**

Enquanto no tópico anterior (4.1) o objetivo era avaliar a variação espectral existente em cada dia, tendo como base os espectros mínimo e máximo, na análise a respeito da evolução temporal dos espectros o objetivo é avaliar as alterações espectrais observadas ao longo do tempo após a ocorrência do incêndio, para tanto, foram considerados os espectros médios de cada dia de levantamento, conforme explicitado anteriormente, no tópico referente à metodologia.

A figura 29 apresenta uma visão geral da evolução temporal dos espectros, apresentando, além dos espectros médios de cada dia, os espectros puros dos elementos que compõe os contextos encontrados, sendo esses elementos, cinzas puras, substrato puro e vegetação pura. Os espectros dos elementos são úteis na análise, pois permitem analisar a influência destes na composição dos espectros médios.



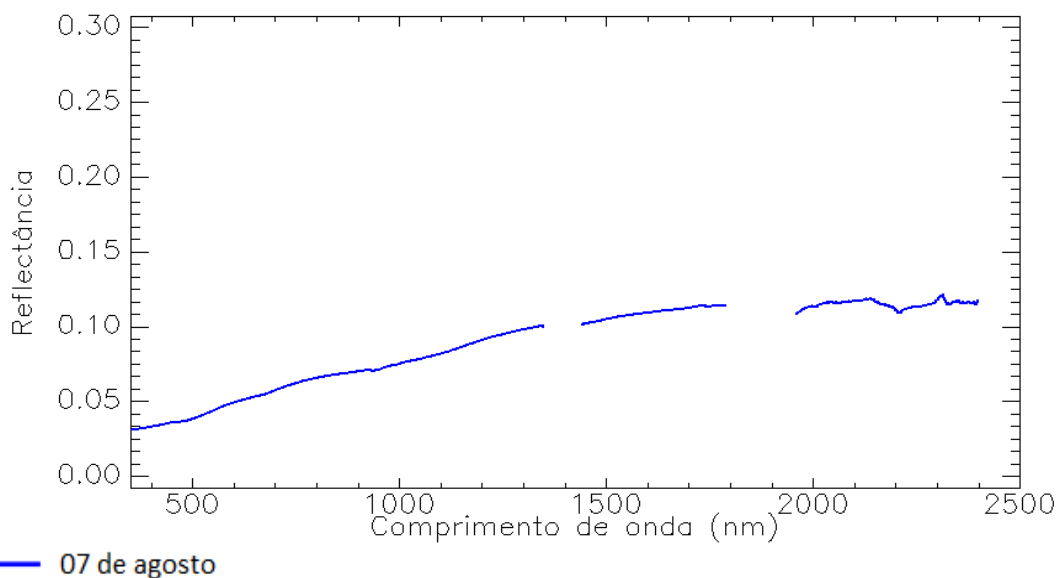
**Figura 29.** Espectros médios referentes aos dias do levantamento de campo e espectros puros referentes aos elementos que compõe os contextos verificados em campo.

## 07 de agosto

Conforme afirmado anteriormente, no dia 07 de agosto, apenas dois dias após a ocorrência do incêndio, a área de estudo encontrava-se coberta apenas pelas cinzas e pelo substrato. Ao se comparar o espectro do dia 07 de agosto com os espectros puros das cinzas e do substrato, é possível notar que o espectro do dia 07 de agosto apresenta um comportamento mais similar ao espectro das cinzas. Essa similaridade pode ser explicada pelo pouco tempo decorrido desde a ocorrência do incêndio, sendo assim, grande parte das cinzas provenientes da queima da vegetação ainda encontrava-se depositada na superfície, reduzindo a exposição do substrato e, conseqüentemente, reduzindo sua contribuição na composição do espectro.

Apesar de pequena, a influência do substrato pode ser constatada por dois aspectos. O primeiro deles é o albedo do espectro, o qual se mostra maior do que o espectro das cinzas puras, especialmente na região do infravermelho de ondas curtas, onde se verifica a maior diferença, a qual gira em torno de 7% (em valores de reflectância). A alta reflectância do substrato contribuiu para que o espectro do dia 07 de agosto possuísse um albedo superior ao albedo do espectro referente às

cinzas puras. O outro fator que evidencia a influência do substrato na composição do espectro é a presença de suave feição de absorção localizada em torno de 2200nm, a qual pode ser visualizada na figura 30.

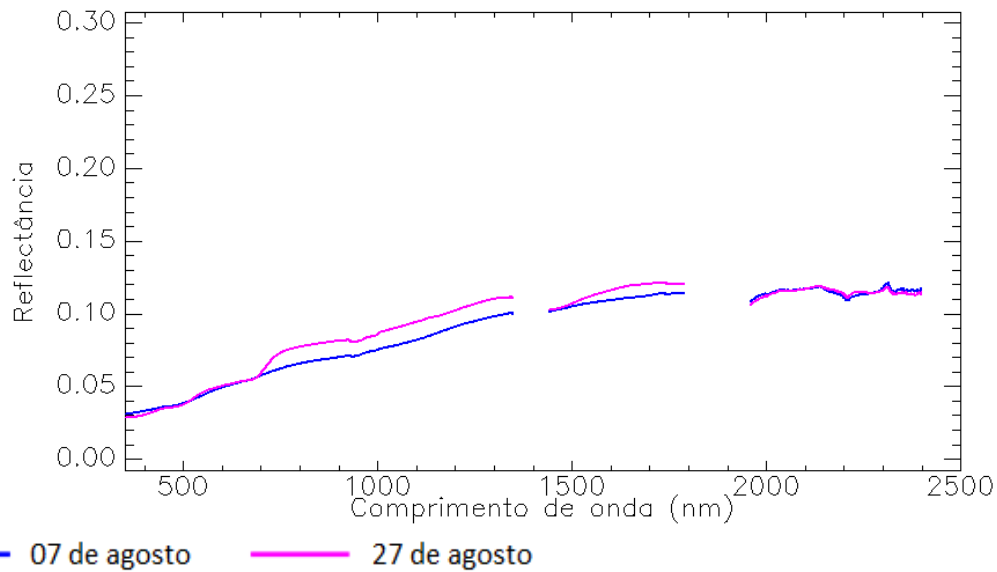


**Figura 30.** Espectro referente ao dia 07 de agosto.

Conforme pode ser visto no gráfico da figura 30, o comportamento espectral referente ao dia 07 de agosto é caracterizado por um padrão de reflectância crescente em direção ao infravermelho de ondas curtas, possuindo 3% de reflectância em 350nm e atingindo a reflectância máxima de 12% em 2400nm.

### **27 de agosto**

No dia 27 de agosto, 22 dias após a ocorrência do incêndio, já era possível observar o desenvolvimento da rebrota, ficando o contexto da área de estudo composto pelo substrato, cinzas e a rebrota. A figura 31 apresenta os espectros do dia 07 e 27 de agosto, permitindo uma avaliação a respeito das alterações espectrais ocorridas entre os dois dias de levantamento.



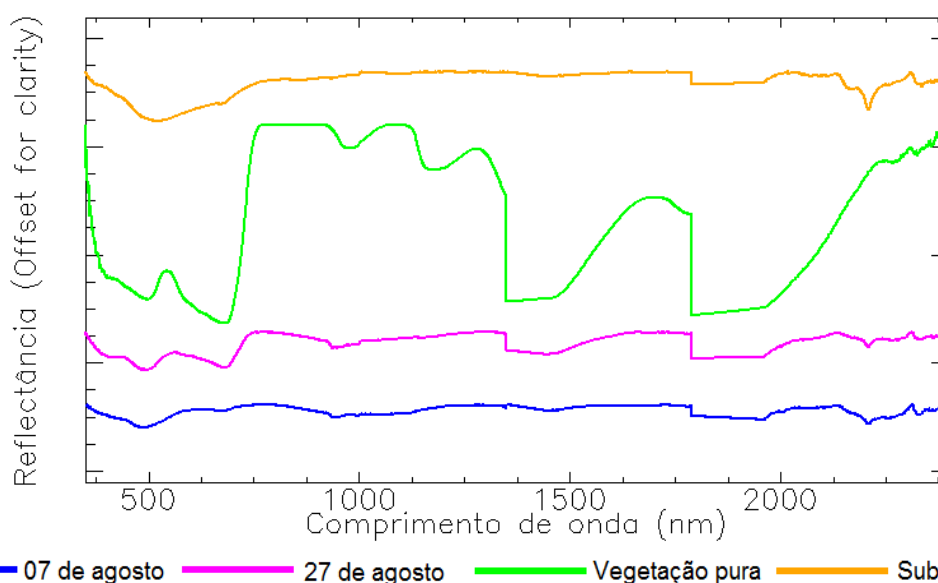
**Figura 31.** Evolução temporal do espectro médio da área de estudo até o dia 27 de agosto.

De modo geral, é possível afirmar que os padrões de reflectância dos espectros dos dias 07 e 27 de agosto se mantêm similares, sendo possível identificar uma pequena diferença na região entre 680nm e 740nm. Nesta região, observa-se, no caso do espectro do dia 27 de agosto, um aumento abrupto da reflectância, comportamento típico da vegetação fotossinteticamente ativa. Enquanto no espectro do dia 07 de agosto a reflectância em 680nm e 740nm passou de 5,5% para 6,1%, respectivamente, no caso do espectro do dia 27 de agosto, a reflectância passou 5,5% para 7,1%. Esse aumento relativo ao espectro do dia 07 de agosto pode ser claramente percebido até 1300nm, sendo que, a partir de 1450nm (aproximadamente), a reflectância dos espectros de ambos os dias assumem valores próximos.

Outras alterações, provenientes da influência da rebrota, somente podem ser observadas após a remoção do contínuo espectral. Na figura 32, o espectro da vegetação mostra as conhecidas absorções na região do visível, em torno de 480nm e 680nm (resultantes da realização da fotossíntese), além do pico de reflectância referente ao verde, em torno de 550nm. Por meio da análise da figura 32, é possível observar que estas feições encontram-se presentes no espectro do dia 27 de agosto, porém, não no espectro do dia 07 de agosto.

De modo geral, ao se comparar os espectros desses dois dias com os espectros da vegetação e do substrato, nota-se que na região entre 350nm a

750nm, o espectro do dia 07 apresenta semelhança com o espectro do substrato, ao passo que o espectro do dia 27 apresenta maior semelhança com o espectro da vegetação, indicando a influência da rebrota na composição deste espectro. A partir de 750nm ambos apresentam semelhança com o espectro do substrato. Ou seja, a rebrota mostra a sua influência, nos espectros da queimada, na região do visível e no início de infravermelho próximo.



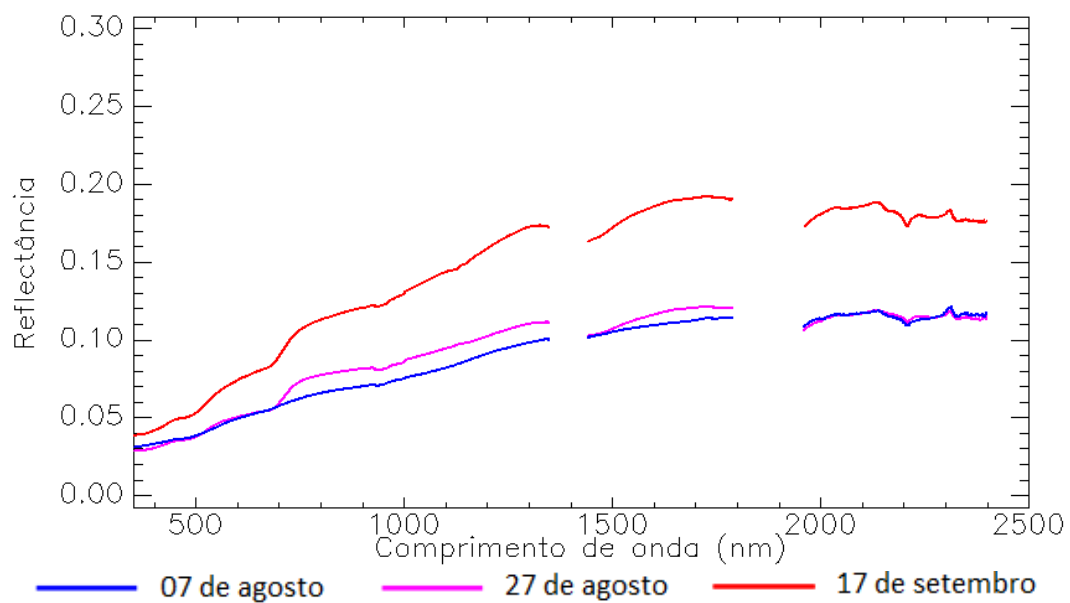
**Figura 32.** Comportamentos espectrais dos dias 07 e 27 de agosto, da vegetação pura e do substrato puro após a remoção do contínuo espectral apresentados sem escala de reflectância com o intuito de facilitar a visualização.

### 17 de setembro

No dia 17 de setembro, 43 dias após a ocorrência do incêndio, houve uma redução na quantidade de cinzas e um conseqüentemente aumento na exposição do substrato, além de um avanço no processo de rebrota, aumentando a influência da vegetação no comportamento do espectro.

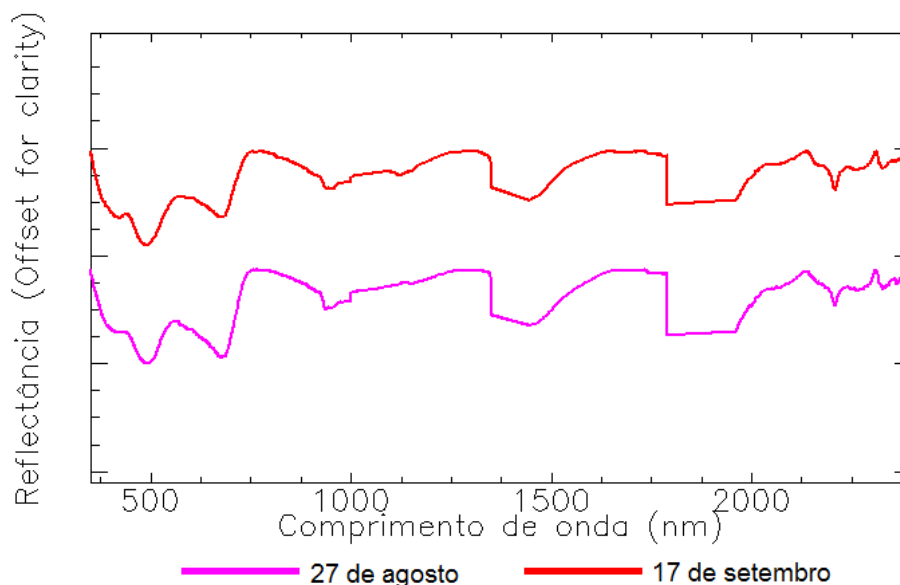
O aumento na exposição do substrato e a redução da cobertura de cinzas resultaram em um significativo aumento do albedo do espectro do dia 17 de setembro, como pode ser visto na figura 33, sendo essa a diferença mais notável na região do infravermelho de ondas curtas, região onde a diferença ficou em torno de 7% de reflectância.

A outra diferença verificada entre o espectro do dia 17 de setembro e os espectros dos dias anteriores, é o aumento da diferença da reflectância entre os comprimentos de onda de 680nm e 740nm. Entre os dias 27 de agosto e 17 de setembro, a reflectância em 680nm passou de 5,5% para 8,3%, e a reflectância em 740nm passou de 7,1% para 10,4%. Ou seja, a diferença passou de 1,6%, em 27 de agosto, para 2,1% em 17 de setembro, diferença pequena, porém, perceptível por meio da figura 33.



**Figura 33.** Evolução temporal do espectro médio da área de estudo até o dia 17 de setembro.

De modo geral, os espectros dos dias 27 de agosto e 17 de setembro apresentam grande similaridade, conforme demonstrado pela remoção do contínuo espectral mostrada na figura 34.



**Figura 34.** Comportamentos espectrais dos dias 27 de agosto e 17 de setembro após a remoção do contínuo espectral, evidenciando a similaridade entre os padrões de reflectância de ambos os espectros.

## 10 de outubro

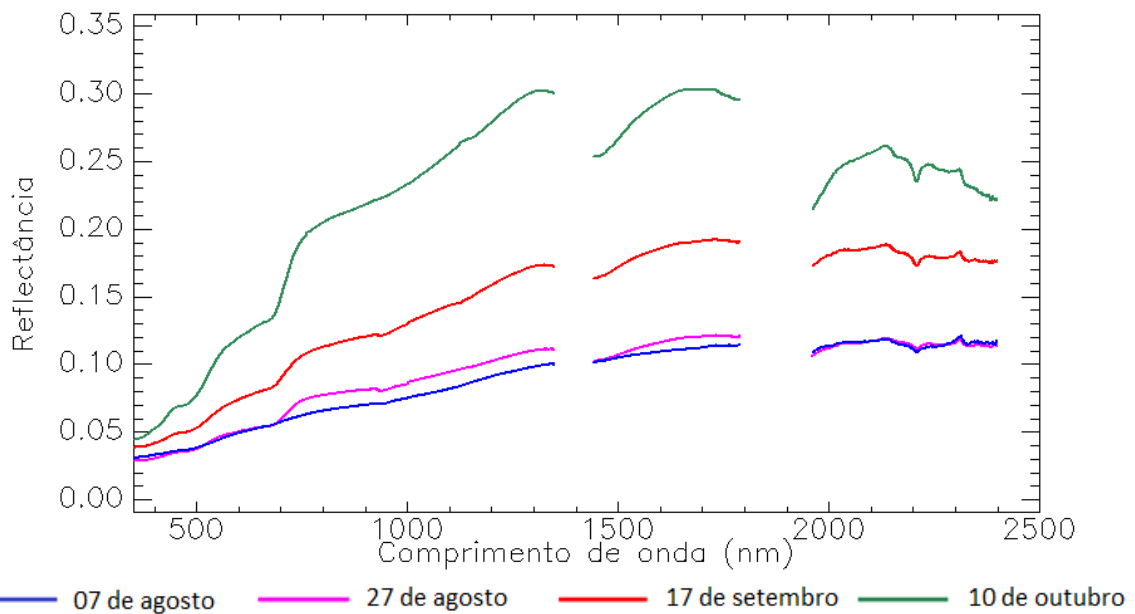
Entre os dias 17 de setembro e 10 de outubro teve início o período de chuvas, contribuindo para a redução da quantidade de cinzas depositadas sobre a superfície e o conseqüente aumento da exposição do substrato, além de contribuir para o progresso no processo de rebrota e o escurecimento do substrato em virtude da dissolução do material carbonizado.

Em virtude do aumento da exposição do substrato, 66 dias após a ocorrência do incêndio, nota-se, por meio do espectro exposto na figura 35, um aumento do albedo em relação ao espectro do levantamento anterior, em 17 de setembro. Esse aumento se mostrou mais evidente na região em torno de 1300nm, onde a reflectância passou de 17%, em 17 de setembro, para 30% em 10 de outubro, ou seja, um aumento de 13% de reflectância. Outro fator que demonstra o aumento significativo da influência do substrato na composição do espectro é a intensificação da feição de absorção localizada em torno de 2200nm.

Apesar do considerável aumento na exposição do substrato, o albedo do espectro do dia 10 de outubro ficou significativamente abaixo do albedo do espectro do substrato puro. Com o aumento na exposição do substrato, seria normal esperar que o albedo do espectro do dia se aproximasse ao albedo do substrato, no entanto,



o espectro do dia, no ponto de máxima reflectância (em torno de 1700nm), atingiu cerca de 30% de reflectância, valor bem abaixo dos quase 60% verificados no mesmo comprimento de onda do espectro do substrato (figura 29). Esse fato pode ser explicado pelo escurecimento do substrato causado pela dissolução do material carbonizado, escurecimento este que atuou no sentido de reduzir o albedo do espectro.



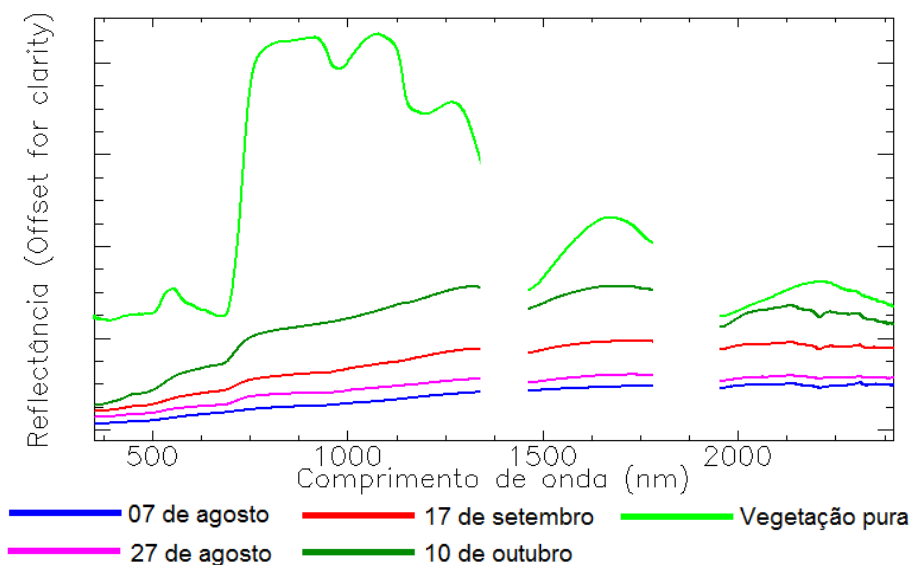
**Figura 35.** Evolução temporal do espectro médio da área de estudo até o dia 10 de outubro.

Em relação ao aumento da influência da rebrota na composição do espectro do dia 10 de outubro, seu maior indício encontra-se no aumento da diferença da reflectância entre os comprimentos de onda de 680nm e 740nm. No dia 17 de setembro, as reflectâncias em 680nm e 740nm eram iguais a 8,3% e 10,4%, respectivamente, já no dia 10 de outubro, tais valores passaram para 13,5% e 18,7%, respectivamente. Ou seja, a diferença de reflectância entre esses dois pontos passou de 2,1%, em 17 de setembro, para 5,2% em 10 de outubro, contribuindo para que o espectro, nesse intervalo de comprimentos de onda, se assemelhe ao padrão de reflectância da vegetação.

Outro indício do aumento da influência da rebrota pode ser observado nos intervalos entre 1450nm e 1800nm e entre 1950nm e 2400nm, regiões onde o espectro apresenta uma feição bastante parecida com a feição observada no

espectro da vegetação, feição esta, caracterizada pelo caráter convexo da curva espectral. Tal similaridade pode ser observada na figura 36, porém, encontra-se mais evidenciada na figura 35. Esse caráter convexo também pode ser observado nos espectros dos dias 27 de agosto e 17 de setembro, porém, não com a mesma intensidade verificada no espectro do dia 10 de outubro. O único espectro em que esta feição não se encontra presente é no referente ao dia 07 de agosto, único dia em que não havia presença de rebrota, fato que reforça a afirmação de que esta feição se deve à influência da rebrota.

Outra alteração espectral verificada ao longo dos dias e que se mostrou mais evidente no dia 10 de outubro, diz respeito ao decréscimo da reflectância entre os comprimentos de onda de 1650nm e a região entre 2000nm e 2400nm. No espectro do dia 07 de agosto, a reflectância na região entre 2000nm e 2400nm apresentou valores similares ao valor em 1650nm. No entanto, a partir do dia 27 de agosto, a reflectância em 1650nm passou a apresentar valor superior aos valores observados na região entre 2000nm e 2400nm, sendo que esta diferença passou a apresentar valores ainda superiores no dia 10 de outubro. Sendo assim, até o dia 07 de agosto, o espectro apresentou um padrão crescente entre 1650nm e a região entre 2000nm e 2400nm, porém, a partir do dia 27 de agosto, passou a apresentar um padrão decrescente para a mesma região.

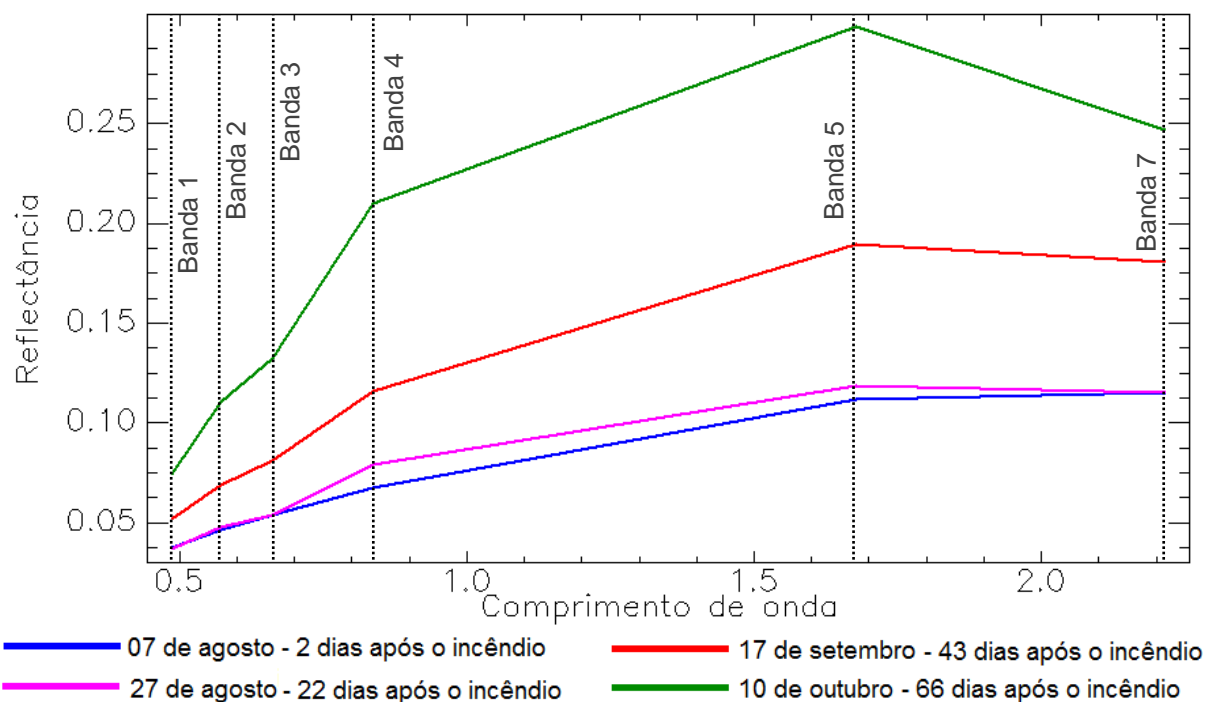


**Figura 36.** Espectros da vegetação pura e espectros de cada dia de levantamento apresentados sem escala de reflectância.

#### 4.2.1 Evolução temporal dos espectros de campo reamostrados para o sensor TM

No presente estudo, o objetivo prático das medidas de reflectância de campo é o de encontrar algum indício na evolução temporal do espectro que permita a identificação, em imagens de sensoriamento, de áreas queimadas em fitofisionomias campestres do Cerrado, especialmente, queimadas em estágios avançados pós-queimada. No entanto, os espectros de campo, por se tratarem de dados hiperespectrais, apresentam uma grande quantidade de informações e detalhes não passíveis de serem analisados a partir de espectros obtidos por meio de imagens do sensor TM, devido às diferenças de resolução espectral entre os espectros de campo e os espectros das imagens. Sendo assim, a fim de tornar estes dados compatíveis, foi feita a reamostragem dos espectros médios de cada dia, obtidos em campo, para as configurações espectrais do sensor TM.

A figura 37 apresenta a evolução temporal dos espectros reamostrados para as seis bandas do sensor TM. Conforme pode ser constatado, muitos detalhes a respeito das feições espectrais são perdidos. Apesar disso, comparando-se as figura 37 e 35, nota-se que três padrões de reflectância observados nos dados hiperespectrais de campo também podem ser identificados nos dados reamostrados para o sensor TM.



**Figura 37.** Evolução temporal dos espectros reamostrados para o sensor TM.

O primeiro padrão diz respeito ao aumento da diferença das reflectâncias nos comprimentos de onda de 680nm e 740nm. No caso dos espectros reamostrados, esse padrão pode ser observado nas bandas 3 e 4, onde se observa, ao longo do tempo, um aumento da reflectância da banda 4 em relação à banda 3 (figura 37). Vale lembrar que tais bandas são as bandas consideradas no cálculo do índice *NDVI*, e sendo assim, pelo menos em teoria, com base nos valores de *NDVI* calculados a partir dos dados dos espectros de campo reamostrados, seria possível identificar áreas queimadas. A tabela 1 apresenta a evolução dos valores de reflectância referentes às bandas 3 e 4, e do *NDVI*.

**Tabela 1.** Valores de reflectância das bandas 3 e 4 e dos valores *NDVI* referentes aos espectros, reamostrados para o sensor TM.

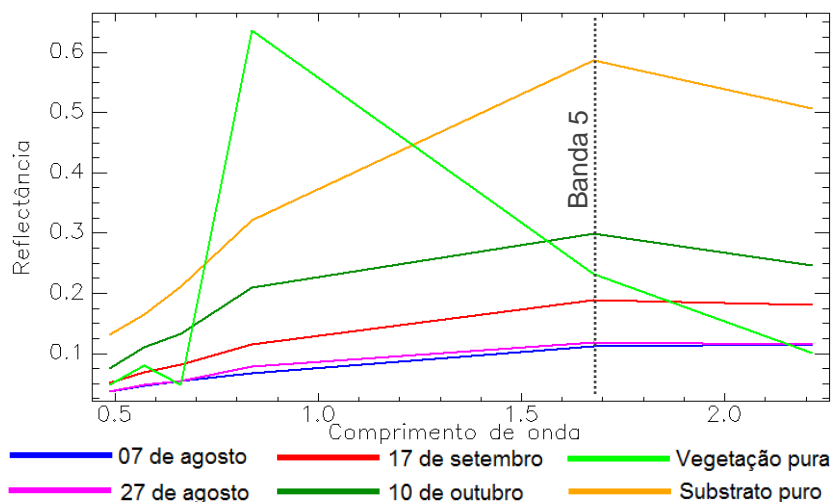
<i>Dia</i>	<i>Reflectância</i>		<i>NDVI</i>
	<i>banda 3</i>	<i>banda 4</i>	
<b>07 de agosto</b>	5,30%	6,70%	0,12
<b>27 de agosto</b>	5,40%	7,80%	0,18
<b>17 de setembro</b>	8,10%	11,60%	0,18
<b>10 de outubro</b>	13,20%	21%	0,23

O segundo padrão, comum aos espectros de campo hiperespectrais e aos espectros reamostrados, diz respeito à alteração do padrão de reflectância entre os comprimentos de onda de 1650nm e a região entre 2000nm e 2400nm, o qual se mostra crescente no dia 07 de agosto, passando a um comportamento decrescente a partir do dia 27 de agosto. Esse mesmo comportamento pode ser observado comparando-se as reflectâncias das bandas 5 e 7. No dia 07 de agosto, a reflectância na banda 7 se mostra maior do que a reflectância na banda 5, no entanto, a partir do dia 27 de agosto, esse padrão se inverte e a reflectância na banda 7 passa a apresentar valores inferiores aos valores observados na banda 5, conforme pode ser observado na figura 37 e na tabela 2.

**Tabela 2.** Valores de reflectância nas bandas 5 e 7 referentes aos espectros reamostrados, evidenciando a queda da reflectância na banda 7, em relação à banda 5, a partir do dia 27 de agosto.

<i><b>Dia</b></i>	<i><b>Reflectância (%)</b></i>		
	<i><b>banda 5</b></i>	<i><b>banda 7</b></i>	<i><b>banda 5 - banda 7</b></i>
<i><b>07 de agosto</b></i>	11,2%	11,5%	-0,30%
<i><b>27 de agosto</b></i>	11,9%	11,5%	0,40%
<i><b>17 de setembro</b></i>	18,9%	18,1%	0,80%
<i><b>10 de outubro</b></i>	29,8%	24,7%	5,10%

O terceiro padrão, comum aos espectros hiperespectrais de campo e aos espectros reamostrados, diz respeito ao valor máximo de reflectância no espectro do dia 10 de outubro. No caso dos espectros hiperespectrais de campo, esse valor máximo está localizado em torno de 1700nm, apresentando valor de reflectância em torno de 30%. Já no caso dos espectros reamostrados, esse valor máximo pode ser observado na banda 5, apresentando um valor que também gira em torno dos 30%, mais especificamente, 29,8%. A relevância desse padrão reside no fato de que, conforme pode ser observado na figura 38, a banda 5 é fortemente influenciada pela exposição do substrato, sendo assim, no dia 10 de outubro, 66 dias após a ocorrência do incêndio, a reflectância esperada para a banda 5, seria uma reflectância alta em virtude do aumento da exposição do substrato, porém, o valor observado para a referida banda é praticamente a metade do valor observado no espectro do substrato, fato que pode ser resultado do escurecimento do substrato, citado anteriormente. Sendo assim, o valor da banda 5, obtido no dia 10 de outubro, pode ser um indicador relevante na identificação de áreas queimadas por meio imagens de satélite, mais especificamente, no caso de imagens TM.



**Figura 38.** Destaque para os valores de reflectância na banda 5. O alto valor de reflectância da banda 5, no espectro do substrato, em contraposição ao baixo valor de reflectância dessa mesma banda no espectro da vegetação, justifica a afirmação de que o aumento da reflectância nessa banda, nos espectros do dia 07 de agosto ao dia 10 de outubro, é resultado do aumento da influência do substrato na composição dos espectros.

Apesar de não ter sido encontrado um padrão bem definido, a relação entre as bandas 4 e 7, verificada ao longo do tempo decorrido desde o incêndio, também pode apresentar alguma relevância, visto que tais bandas são utilizadas na composição do índice *NBR* (*Normalized Burn Ratio*), um índice bastante utilizado no processo de identificação de queimadas por meio de imagens de satélite, sendo calculado por meio da seguinte fórmula:

$$NBR = (b4 - b7) / (b4 + b7)$$

Aplicando-se a fórmula do *NBR* a partir dos dados referentes aos espectros de campo reamostrados, têm-se os valores do índice para cada um dos dias de levantamento de campo, conforme exposto na tabela 3. Conforme pode ser visto na tabela 3, não é possível se verificar um padrão nos valores do *NBR*, uma vez que este valor aumenta do dia 07 para o dia 27 de agosto, decresce do dia 27 de agosto para o dia 17 de setembro, e volta a aumentar no dia 10 de outubro. Apesar dessa ausência de padrão bem definido, a utilização dos valores mínimo e máximo do *NBR* pode ser útil da identificação de queimadas.

**Tabela 3.** Evolução temporal dos valores de reflectância das bandas 4 e 7, bem como a evolução dos valores referentes ao cálculo do índice *NBR*.

<i>Dia</i>	<i>Reflectância (%)</i>		<i>NBR</i>
	<i>banda 4</i>	<i>banda 7</i>	
<i>07 de agosto</i>	6,7%	11,5%	-0,26
<i>27 de agosto</i>	7,9%	11,5%	-0,19
<i>17 de setembro</i>	11,6%	18,1%	-0,22
<i>10 de outubro</i>	21,0%	24,7%	-0,08

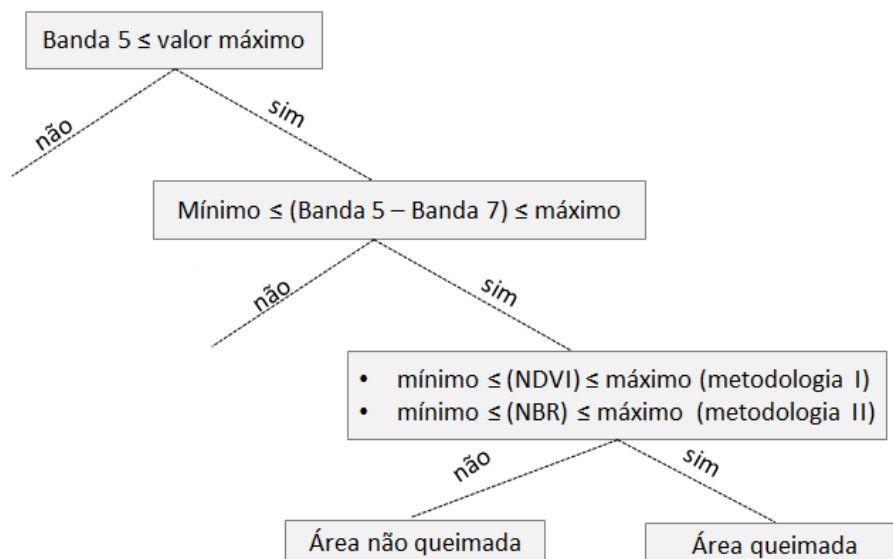
### 4.3 Aplicação dos padrões espectrais no processo de identificação de áreas queimadas

Conforme visto anteriormente, a análise temporal dos espectros reamostrados para o sensor TM revelou a existência de padrões espectrais que podem ser utilizados como indicadores no desenvolvimento de métodos destinados à identificação de áreas queimadas no Cerrado, sendo tais indicadores os seguintes:

- Aumento dos valores do índice *NDVI*;
- Aumento dos valores do índice *NBR*, o qual foi considerado um indicador relevante apesar de não ter apresentado padrão bem definido;
- Relação entre os valores de reflectância nas bandas 5 e 7; e,
- Valor máximo da reflectância na banda 5;

Considerando que estes indicadores são referentes a um período de 66 após a ocorrência do incêndio, levantou-se a hipótese de que, a partir destes indicadores, seria possível identificar, por meio de imagens de satélite (especialmente imagens TM), áreas queimadas com até 66 dias de idade ou áreas queimadas que apresentassem indicadores espectrais similares aos citados acima. A fim de avaliar tal hipótese, foram elaborados dois métodos destinados à identificação de áreas queimadas, os quais se encontram detalhados na figura 39. Os dois primeiros passos de ambos os métodos são baseados nos mesmos indicadores, ou seja, o valor da reflectância na banda 5 deve ser menor ou igual ao valor máximo encontrado e a diferença entre as bandas 5 e 7 deve ser maior ou igual ao valor mínimo encontrado e menor ou igual ao valor máximo. Os dois métodos somente se

diferenciam a partir do terceiro passo, onde o primeiro considera os valores mínimo e máximo do índice *NDVI*, ao passo que o segundo método considera os valores mínimo e máximo do índice *NBR*.



**Figura 39.** Esquema dos dois métodos propostos a partir dos indicadores encontrados na análise da evolução temporal dos espectros de campo reamostrados para o sensor TM.

O valor máximo na banda 5, considerado em ambas os métodos, é o valor máximo encontrado na evolução temporal dos espectros médios reamostrados para o sensor TM, ou seja, o valor de 29,8% observado no espectro médio do dia 10 de outubro.

Já no caso dos valores mínimo e máximo do indicador “banda 5 – banda7” e dos valores mínimo e máximo dos índices *NDVI* e *NBR*, estes não foram obtidos por meio dos espectros médios. No caso destes três últimos indicadores, os valores mínimos foram determinados com base na comparação entre todos os espectros reamostrados referentes ao dia 07 de agosto (dia do primeiro levantamento de campo), ao passo que, os valores máximos foram determinados com base na comparação entre todos os espectros reamostrados referentes ao dia 10 de outubro (dia do último levantamento de campo). Para estes indicadores, não se considerou os valores dos espectros médios a fim de evitar que indícios relevantes acabassem sendo camuflados pelos valores médios. Os valores mínimos e máximos destes três indicadores encontram-se detalhados na tabela 4.



**Tabela 4.** Valores mínimo e máximo dos indicadores “banda 5 – banda7”, *NDVI* e *NBR*.

<i>Valores do indicadores</i>			
	<i>banda 5 - banda 7</i>	<i>NDVI</i>	<i>NBR</i>
<i>Mínimo</i>	-0,011	0,058	-0,35
<i>Máximo</i>	0,08	0,292	0,093

No caso do indicador relativo ao valor máximo da reflectância na banda 5, a escolha pelo valor médio em detrimento do valor máximo verificado em relação a todos os espectros, foi motivado pelo seguinte fato: conforme visto anteriormente, o valor da reflectância na banda 5 possui estreita relação com a influência do substrato, de forma que, valores altos na banda 5 representam grande influência do substrato. Sendo assim, se durante a elaboração do método fosse considerado o maior valor de reflectância encontrado para a banda 5, este valor, sem dúvida, estaria associado a um contexto onde os vestígios da queimadas estivessem ausentes, havendo predomínio do substrato aparente, conseqüentemente, durante a classificação haveria muito erros de comissão relacionados à confusão entre áreas queimadas e substrato. Portanto, a fim de minimizar esta confusão, adotou-se o valor máximo encontrado nos espectros médios reamostrados para o sensor TM, o qual foi encontrado no espectro referente ao dia 10 de outubro.

Com o intuito de testar tais métodos, ambos foram aplicados na classificação de uma imagem Landsat TM 5 do dia 09 de outubro de 2010, referente ao final da temporada de queimadas (órbita/ponto 221/071). A escolha pela data da imagem a ser classificada se baseou na ideia de que, ao classificar uma imagem do final da temporada de queimadas, torna-se possível avaliar, dentre outros fatores, a potencialidade dos métodos no sentido de identificar queimadas mais antigas.

Os resultados obtidos por meio das classificações foram avaliados 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, este 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 desta 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

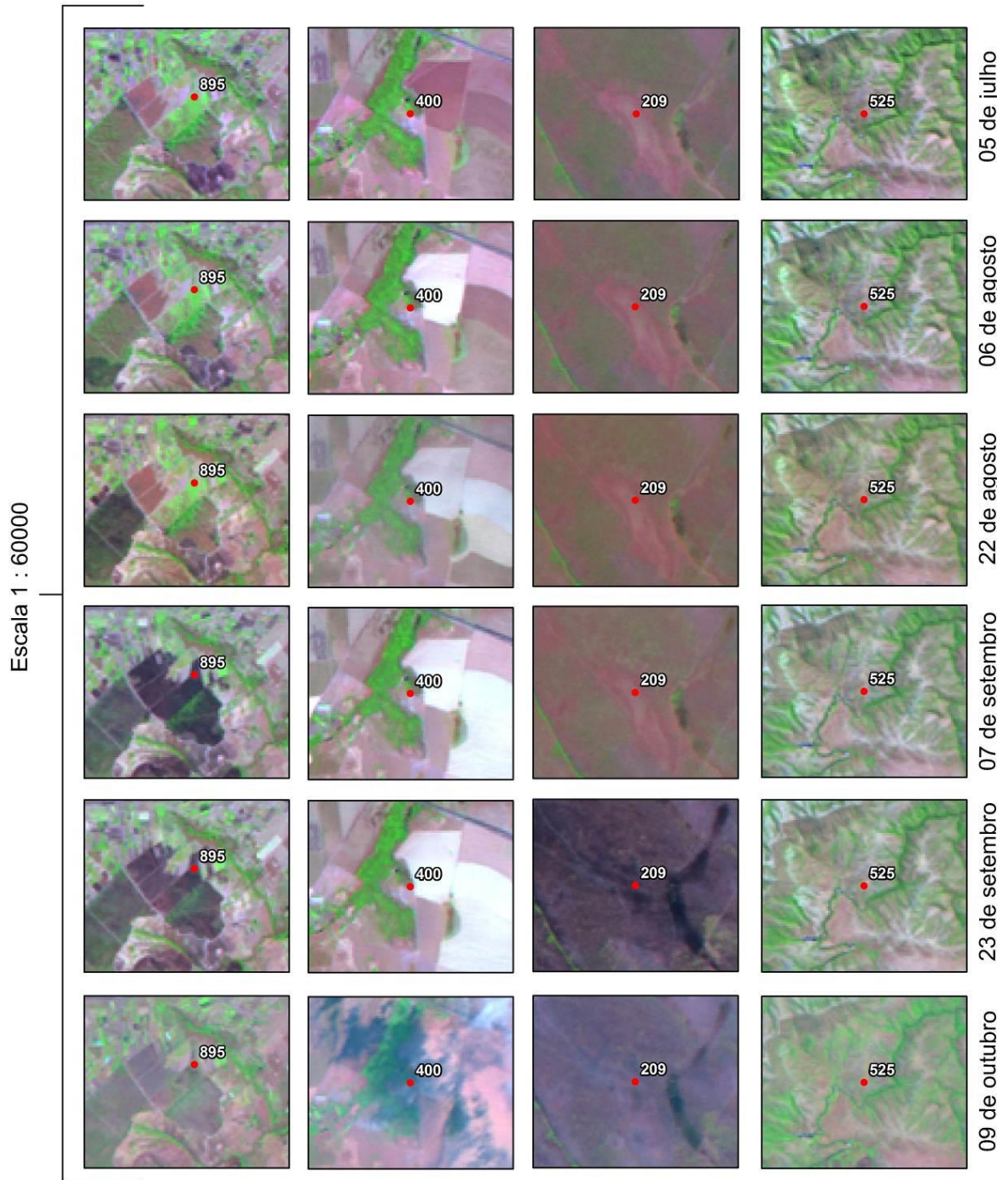
identificação da queimada, caso contrário, registrava-se apenas o tipo de cobertura identificado na imagem do dia 09 de outubro.

O esquema da aferição do tipo de cobertura dos pontos de controle pode ser melhor compreendido por meio da figura 40. 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.

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, enquanto os outros 845 eram referentes a tipos de coberturas, tais como vegetação, sombra de nuvem, sombra topográfica, solo exposto e área urbana. Com base nesses pontos foi possível avaliar a acurácia das classificações geradas a partir dos métodos propostos.

Todas as imagens utilizadas foram georreferenciadas e passaram pelo processo de correção atmosférica *QUICK Atmospheric Correction (QUAC)*. O *QUAC* é um método de correção para a região do visível ao infravermelho de ondas curtas, o qual, diferentemente dos métodos baseados em princípios físicos, se baseia apenas em informações da cena utilizada (IDL, 2009), combinando alta acurácia nos resultados, rápido processamento computacional e independência em relação a conhecimentos prévios tais como verdade de campo e parâmetros de calibração do sensor utilizado (BERNSTEIN *et al.*, 2012).

A utilização sistemática de imagens de média resolução espacial (em torno de 30 metros) na identificação de áreas queimadas no Cerrado, utilizando um método baseado na evolução do comportamento espectral dessas áreas (conforme o proposto no presente estudo) exigiria grande esforço no processamento das imagens devido à quantidade de cenas necessárias para cobrir todo o bioma. Diante disso, a utilização de processamentos ágeis e simples, tais como o *QUAC*, representaria uma diminuição no tempo e esforço gastos, sendo assim, a adoção desse método representou uma oportunidade de avaliar sua eficácia para o fim aqui proposto.

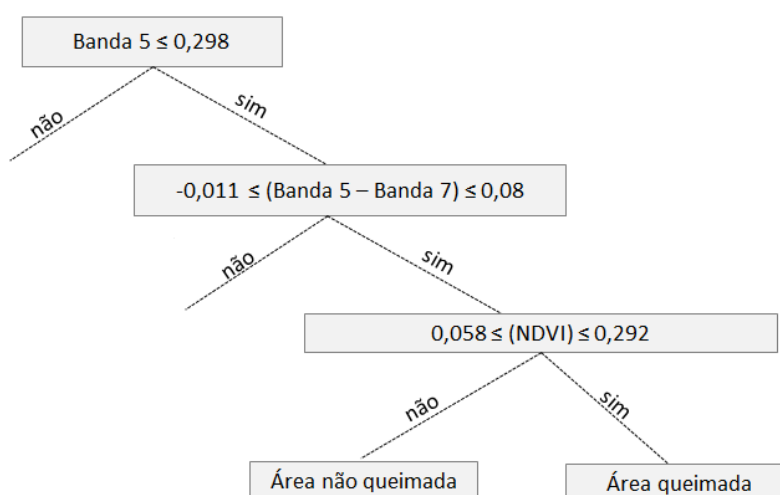


Ponto de controle	Cobertura superficial	Data de identificação da queimada
895	queimada	07 de setembro
400	sombra de nuvem	não se aplica
209	queimada	23 de setembro
525	vegetação	não se aplica

**Figura 40.** Esquema do processo de validação dos pontos de controle (pontos vermelhos indicados por sua numeração).

### 4.3.1 Método I – NDVI

No método I, para que um pixel da imagem pudesse ser classificado como queimada deveria atender aos seguintes requisitos: 1º - a banda 5 deveria possuir reflectância igual ou menor a 29,8% (0,298); 2º - a diferença entre as banda 5 e 7 deveria ser maior ou igual a -0,011 e menor ou igual a 0,08; e 3º - o valor do NDVI deveria ser maior ou igual a 0,058 e menor ou igual a 0,292. Cada um desses passos encontra-se explicitado na figura 41, mostrada a seguir.



**Figura 41.** Detalhamento do método I, baseada na evolução dos valores do índice NDVI.

A Quadro 1 apresenta a matriz de confusão referente ao resultado obtido pelo Método I.

**Quadro 1.** Matriz de confusão referente ao resultado da classificação baseada no método proposto I.

		CLASSIFICAÇÃO		
		QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL
SUPERFÍCIE REAL	QUEIMADO	<b>125</b>	30	155
	NÃO QUEIMADO	54	<b>791</b>	845
	TOTAL	179	821	1000

Dos 155 pontos de controle tidos como queimados, 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 5. Conforme pode ser visto, 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. Alguns dos casos de confusão encontrados são conhecidos pela literatura, tais como sombra, área urbana e água (ESCUIN *et al.*, 2008; QUINTANO *et al.*, 2006, BASTARRIKA *et al.*, 2011), 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, certamente está relacionada aos demais indicadores, ou seja, valor máximo da banda 5 e diferença entre as bandas 5 e 7.

**Tabela 5.** Erros de comissão, mostrados em função da superfície real a qual foi erroneamente classificada como queimada.

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

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<sup>5</sup>.

A tabela 6 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.

**Tabela 6.** Pontos de queimada corretamente classificados pelo método I (NDVI) 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

Em teoria, quanto mais recente uma queimada, mais chances ela possui de 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 I também se mostrou satisfatório em relação à identificação de queimadas mais antigas, pois como pode ser visto na tabela 6, 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

<sup>5</sup> A detecção da área queimada em uma imagem não indica que a queimada ocorreu naquela data.

incêndio e a data da imagem utilizada para a realização da classificação. Conforme pode ser visto na tabela 6, o alto índice de classificação correta dos pontos de controle referentes a queimadas se repete em todos os dias, estando sempre acima de 70%.

O número de pontos de queimadas omitidos pela classificação e as datas das queimadas referentes a cada ponto, encontram-se detalhados na tabela 7, lembrando que as datas citadas não se referem à data de ocorrência da queimada, mas sim, à data do primeiro imageamento da área afetada. Conforme pode ser visto, os menores números de omissão ocorreram nas queimadas mais antigas, referentes aos dias 05 de julho e 06 de agosto, quando foram identificados apenas 2 casos de omissão na classificação, e nas queimadas ocorridas no dia 09 de outubro, quando foi identificado apenas um caso de omissão. Este resultado destoa daquilo que se tem visto na literatura, visto que, normalmente, o aumento do tempo decorrido entre o incêndio e o imageamento da área afetada, tem sido relacionado ao aumento dos erros de omissão na identificação de áreas queimadas, conforme verificado por Hudak & Brockett (2004).

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, o alto número de omissões de queimadas imageadas no dia 23 de setembro em relação ao número referente aos demais dias, chama atenção, visto que, considerando o pequeno número de dias entre a data da imagem e a data da imagem utilizada na 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, situação que 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.

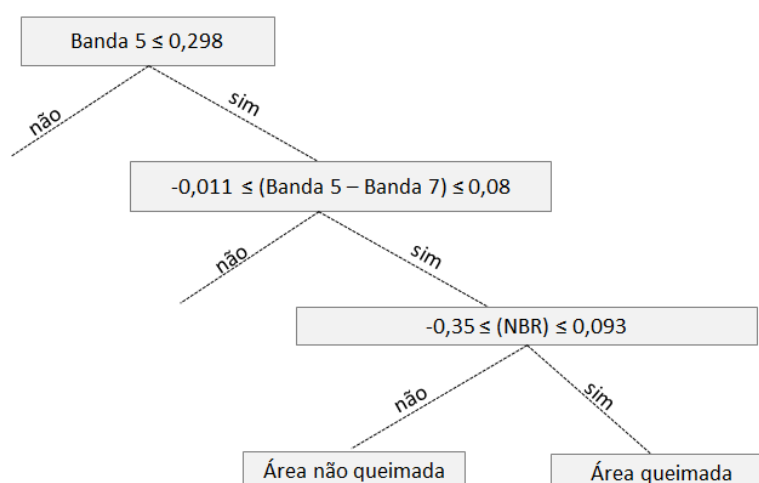
De modo geral, ao observar a razão entre o número de pontos de queimada omitidos e o número total de pontos de controle de queimada para cada imagem utilizada, nota-se que este valor está sempre abaixo de 30%, resultando no total de 19,4% de omissão citado anteriormente.

**Tabela 7.** Pontos de queimadas omitidos, mostrados em função da data das queimadas, e razão entre o número de pontos queimados omitidos e o número total de pontos de controle referentes a 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

### 4.3.2 Método II – NBR

Como anteriormente citado, os métodos I e II consideram os mesmos parâmetros nos dois primeiros passos, apresentando diferença apenas no terceiro e último passo. Enquanto no método I o terceiro passo considera valores limiares de NDVI, no método II os valores limiares considerados são os do índice NBR. Sendo assim, no método II, para que um pixel fosse considerado queimado deveria atender aos seguintes requisitos: 1º - valor da banda 5 deve ser menor ou igual a 0,298 (29,8%); 2º - a diferença entre as bandas 5 e 7 deve ser maior ou igual a -0,011 e menor ou igual a 0,08; 3º - o valor do índice NBR deve ser maior ou igual a -0,035 e menor ou igual a 0,093 (fig. 42).



**Figura 42.** Detalhamento do método II, baseado na evolução dos valores do índice NBR.



O quadro 2 apresenta a matriz de confusão referente ao resultado da classificação baseada no método II, permitindo uma visão geral a respeito do resultado obtido pelo método.

**Quadro 2.** Matriz de confusão referente ao resultado da classificação baseada no método proposto II.

		CLASSIFICAÇÃO		
		QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL
SUPERFÍCIE REAL	QUEIMADO	<b>54</b>	101	155
	NÃO QUEIMADO	9	<b>836</b>	845
	TOTAL	63	937	1000

Dos 155 pontos de controle referentes a áreas queimadas, apenas 54 foram corretamente identificados pelo método II, ou seja, apenas 34,8% de acerto. Em relação aos erros de omissão, ou seja, pontos referentes a queimadas, porém, classificados de forma errada, foram constatados 101 pontos, índice bastante alto, o qual representa 65,2% do total de pontos de queimadas. No que diz respeito aos erros de comissão, foram encontrados apenas 9 casos, representando apenas 14,3% dos 63 pontos classificados pelo método como queimada.

Ao se analisar os pontos corretamente classificados em função das datas de imageamento das queimadas às quais se referem, percebe-se que o maior número de classificações corretas foi verificado nas queimadas mais recentes, detectadas nos dias 7 e 23 de setembro e 09 de outubro (tabela 8), situação que coincide com a ideia de que quanto mais recente uma queimada, maiores suas chances de serem identificadas (CORONA *et al.*, 2008). Apesar do maior número de classificações corretas para queimadas mais recentes, ao se comparar o número de tais classificações com o número total de pontos de controle referentes a queimadas para cada dia, nota-se que o índice de classificações corretas (razão entre o número de pontos classificados e o número total de pontos referentes a queimadas) é baixo, estando, na maior parte dos casos, abaixo de 50%. O único dia em que se verificou um índice superior a 50% foi no dia 09 de outubro, quando se registrou um índice de 62,5%.

Diante de tais resultados se constata, ao menos para o presente estudo, que o método II, baseado na evolução do índice NBR possui baixa potencialidade na identificação de queimadas, especialmente no caso de queimadas mais antigas.

**Tabela 8.** Pontos de queimada corretamente classificados pelo método II (NBR) 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	4	23	17,4
06 de agosto de 2010	4	17	23,5
22 de agosto de 2010	3	15	20,0
07 de setembro de 2010	12	37	32,4
23 de setembro de 2010	21	47	44,7
09 de outubro de 2010	10	16	62,5
TOTAL	54	155	34,8

Em relação aos erros de omissão, quando analisados em função das datas das queimadas omitidas, nota-se que o número de omissões foi grande para as queimadas identificadas em todos os dias, com exceção do dia 09 de outubro, situação que pode estar relacionada ao fato de imagem ser referente ao início do mês (queimadas ocorridas após esta data não foram imageadas) e ao fato de o mês de outubro ser marcado pelo início das chuvas (resultando na diminuição do número de queimadas). O maior número de omissões ocorreu para as queimadas do dia 23 de setembro, ao passo que o menor número foi verificado para as queimadas do dia 09 de outubro (tabela 9).

**Tabela 9.** Pontos de queimadas omitidos, mostrados em função da data das queimadas, e razão entre o número de pontos queimados omitidos e o número total de pontos de controle referentes a 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 classificados e total (%)</i>
05 de julho de 2010	19	23	82,6
06 de agosto de 2010	13	17	76,5
22 de agosto de 2010	12	15	80,0
07 de setembro de 2010	25	37	67,6
23 de setembro de 2010	26	47	55,3
09 de outubro de 2010	6	16	37,5
TOTAL	101	155	65,2

Em relação aos erros de comissão (tabela 10), quando mostrados em função das superfícies reais dos pontos erroneamente classificados como queimadas, verifica-se que o maior número de erros ocorreu para a classe solo exposto, com 4 erros e as classes com menores números de erros foram a água e a vegetação, seguidos pela área urbana, com 3 erros. Teoricamente, o baixo número de erros de comissão seria um indicador de bom resultado obtido pela classificação, no entanto, é necessário levar em consideração que uma pequena parte do total de pontos de queimada foi classificada corretamente (apenas 34,8%), fato que diminui a relevância do baixo número de erros de comissão.

**Tabela 10.** Erros de comissão, mostrados em função da superfície real a qual foi erroneamente classificada como queimada.

<i>Superfície real</i>	<i>Nº de pontos erroneamente classificados como queimada</i>
Água	1
Vegetação	1
Área urbana	3
Solo exposto	4
TOTAL	9

#### **4.3.3 Comparação entre os resultados obtidos pelos métodos I e II**

Por meio da comparação dos resultados obtidos pelos métodos I e II é possível obter uma melhor mensuração a respeito da qualidade de ambos os métodos. Para tanto, a seguir encontra-se uma comparação a respeito dos índices de acerto, omissão e comissão, os dois primeiros mostrados em função das datas de identificação das queimadas e o terceiro mostrado em função da superfície erroneamente classificada como queimada.

A tabela 11 apresenta a comparação entre os índices de acerto obtidos pelos métodos. Conforme pode ser visto, o método I (NDVI) apresentou altos índices de acerto para queimadas identificadas em todas as imagens utilizadas, índices estes, sempre acima de 70%, resultando em um índice total de 80,6%. Já no caso do método II, os índices foram baixos, em geral, abaixo de 50% e resultando em um

índice total de acertos de apenas 34,8%. Apesar dos altos índices de acertos para queimadas imageadas em todos os dias considerados, o fato que chama atenção, em relação ao método I, é o alto índice de acertos para queimadas imageadas em 05 de julho, demonstrando uma alta capacidade do índice na identificação de queimadas antigas. Já em relação ao método II (NBR), apesar do baixo índice de acerto total, o melhor resultado foi obtido para queimadas imageadas no dia 09 de outubro, ou seja, este método se mostrou mais eficiente na identificação de queimadas recentes, pois conforme pode ser visto, o índice de acerto aumentou com a diminuição do tempo decorrido entre a identificação da queimada e o imageamento do dia 09 de outubro, data da imagem utilizada para a aplicação dos métodos.

Já a tabela 12 apresenta a comparação entre os índices de omissão obtidos pelos métodos. Assim como o ocorrido no caso do índice de acertos, no caso do índice omissão, o método I (NDVI) também se mostrou superior ao método II (NBR). No caso do método I, o índice de omissão se manteve abaixo de 30%, resultando em um índice de omissão total inferior a 20%, sendo relevante destacar que, para queimadas identificadas no dia 07 de agosto, foi identificado o segundo menor índice omissão, fato que confirma a alta capacidade do método I na identificação de queimadas antigas. No caso do método II, o índice de omissão se manteve acima dos 50%, à exceção do índice referente a queimadas identificadas no dia 09 de outubro, quando se verificou o menor índice de omissão, igual a 37,5%, valor que confirma a afirmação de que o método II apresenta maior eficiência na identificação de queimadas recentes. Ainda sim, o menor índice de omissão verificado para o método II é superior ao maior índice referente ao método I, confirmando a afirmação de o método I (NDVI) é mais eficiente do que o método II (NBR).

**Tabela 11.** Relação entre o número de pontos corretamente classificados como queimada, por cada método, e o número total de pontos de controle referentes a queimadas, ambos mostrados em função da data das imagens utilizadas.

<i>Data de identificação da queimada</i>	<i>Nº de pontos de queimada classificados corretamente</i>		<i>Total de pontos de controle referentes a queimadas</i>
	<i>Método I (NDVI)</i>	<i>Método II (NBR)</i>	
05 de julho de 2010	21 (91,3%)*	4 (17,4%)*	23
06 de agosto de 2010	15 (88,2%)*	4 (23,5%)*	17
22 de agosto de 2010	11 (73,3%)*	3 (20,0%)*	15
07 de setembro de 2010	29 (78,4%)*	12 (32,4%)*	37
23 de setembro de 2010	34 (72,3%)*	21 (44,7%)*	47
09 de outubro de 2010	15 (93,8%)*	10 (62,5%)*	16
TOTAL	125 (80,6%)*	54 (34,8%)*	155

\* porcentagens calculadas pela razão entre o nº de pontos classificados corretamente por cada método e o nº total de pontos de controle referentes a queimadas

**Tabela 12.** Relação entre o número de pontos de queimada omitidos, por cada método, e o número total de pontos de controle referentes a queimadas, ambos mostrados em função da data das imagens utilizadas.

<i>Data de identificação da queimada</i>	<i>Nº de pontos de queimada omitidos (erros de omissão)</i>		<i>Total de pontos de controle referentes a queimadas</i>
	<i>Método I (NDVI)</i>	<i>Método II (NBR)</i>	
05 de julho de 2010	2 (8,7%)*	19 (82,6%)*	23
06 de agosto de 2010	2 (11,8%)*	13 (76,5%)*	17
22 de agosto de 2010	4 (26,7%)*	12 (80,0%)*	15
07 de setembro de 2010	8 (21,6%)*	25 (67,6%)*	37
23 de setembro de 2010	13 (27,7%)*	26 (55,3%)*	47
09 de outubro de 2010	1 (6,3%)*	6 (37,5%)*	16
TOTAL	30 (19,4%)*	101 (65,2%)*	155

\* porcentagens calculadas pela razão entre o nº de pontos classificados corretamente por cada método e o nº total de pontos de controle referentes a queimadas

Por fim, o último parâmetro de comparação entre os resultados dos métodos I e II é o índice de comissão, o qual se encontra exposto no quadro 3. Somente neste parâmetro é que o método II (NBR) se mostrou numericamente superior ao método I (NDVI), visto que apresentou apenas 9 erros de comissão (14,3%), ao passo que o método I apresentou 54 erros de comissão (30,2%). Os dados demonstram que o método II se mostrou mais restritivo, gerando menos erros de omissão, porém, menos acertos conforme mostrado anteriormente. Já o método I se mostrou mais permissivo, classificado um maior número de pontos, gerando um alto índice de acertos, porém, resultando em um índice de erros de comissão relativamente alto.

**Quadro 3.** Número total de pontos classificados como queimada e número de pontos erroneamente classificados como queimada pelos métodos I e II.

	<b>Nº de pontos classificados como queimada</b>	<b>Nº de pontos erroneamente classificados como queimada</b>
<b>Método I (NDVI)</b>	179	54 (30,2%)*
<b>Método II (NBR)</b>	63	9 (14,3%)*

\* porcentagem calculada pela razão entre o nº de pontos erroneamente classificados como queimada e o nº de pontos classificados como queimada.

Os erros de comissão, quando apresentados em função da superfície real erroneamente classificada como queimada (tabela 13), permite identificar que, no caso do método I (NDVI), o maior número de erros de comissão ocorreu para as classes vegetação, área urbana e solo exposto. Ao passo que, no caso do método II (NBR), o maior número de erros de comissão ocorreu para as classes solo exposto e área urbana.

**Tabela 13.** Erros de comissão apresentados em função da superfície real erroneamente classificada como queimada por ambos os métodos.

<b>Superfície real</b>	<b>Nº de erros de comissão</b>	
	<b>Método I (NDVI)</b>	<b>Método II (NBR)</b>
Água	1	1
Asfalto	3	0
Sombra de nuvem	6	0
Sombra topográfica	6	0
Solo exposto	12	4
Área urbana	13	3
Vegetação	13	1
TOTAL	54	9

De modo geral, é possível afirmar que os resultados obtidos pelo método I (NDVI) foram superiores ao método II (NBR), afirmação que se confirma após a aplicação de índices de exatidão aos resultados obtidos. Foram aplicados os três índices mais utilizados na avaliação da exatidão de classificação de imagens: os índices Global, Kappa e Tau. O objetivo aqui não é avaliar cada um dos índices, e sim, obter parâmetros estatísticos que permitam uma comparação entre os

resultados obtidos pelos métodos aplicados. Para maiores esclarecimentos a respeito de tais índices, consultar Brites (1996).

**Quadro 4.** Valores dos índices de exatidão Global, Kappa e Tau aplicados aos resultados da classificação dos métodos I e II.

	<i>Global</i>	<i>Kappa</i>	<i>Tau</i>
<i>Método I (NDVI)</i>	91,6	0,7	0,83
<i>Método II (NBR)</i>	89	0,45	0,78

O índice Global varia entre 0 e 100%

Os índices Kappa e Tau variam entre 0 e 1

À exceção do índice Kappa, os métodos I e II obtiveram boas avaliações, no entanto, nota-se que os três índices indicaram que o método I (NDVI) alcançou melhor exatidão na classificação, confirmando a afirmação de que este método apresenta maior eficiência na identificação de áreas queimadas.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A espectrorradiometria de campo se mostrou uma ferramenta eficiente no estudo da evolução temporal do espectro da área queimada considerada no presente estudo, permitindo relacionar as alterações observadas em campo com as alterações observadas nos espectros coletados, permitindo maior compreensão a respeito do processo de evolução temporal do comportamento espectral da área queimada considerada.

A partir do processo de reamostragem dos espectros de campo para as características do sensor TM, foi possível identificar indicadores que foram úteis na elaboração de dois métodos destinados à identificação de áreas queimadas em fitofisionomias campestres do Cerrado, sendo um deles baseado no índice *NDVI* e outro baseado no índice *NBR*.

A aplicação dos métodos propostos, na classificação da cena TM 5 órbita/ponto 221/071, referente ao dia 09 de outubro de 2010 (final de temporada de queimadas), revelou que ambos os métodos foram capazes de identificar áreas queimadas, no entanto, a metodologia I, baseada no intervalo de valores mínimo e máximo do índice *NDVI*, apresentou resultados significativamente superiores aos alcançados pela metodologia II, baseada no intervalo de valores mínimo e máximo do índice *NBR*.

Enquanto o método I, baseado no *NDVI*, apresentou um índice de acertos de 80,6%, este mesmo índice referente ao método baseado no *NBR* atingiu apenas 34,8%, ou seja, menos da metade do índice atingido pelo método I. Outro fato de grande relevância, relativo aos resultados obtidos pelo método I, foi o fato deste ter sido capaz de identificar pouco mais de 90% dos incêndios com cerca de 96 dias de ocorrência, fato que revela a eficiência do método na identificação de queimadas mais antigas. Em relação aos erros de omissão, o método baseado no *NDVI* também se mostrou superior, apresentando 19,4% de erros de omissão, ao passo que o método baseado no *NBR* apresentou 65,2%. Somente em relação aos erros de comissão o método baseado no *NBR* se mostrou superior, tendo apresentado um índice de 14,3%, ao passo que o método baseado no *NDVI* apresentou um índice de 30,2%.



A potencialidade do método I, 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 identificação de queimadas com cerca de 90 dias de ocorrência permite a utilização de um menor número de imagens de uma série temporal para a identificação das queimadas ocorridas, diminuindo, dessa forma, os esforços empenhados.

Além disso, a possibilidade de identificar queimadas, mesmo após cerca de três 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 resultados obtidos pela aplicação do método baseado no NDVI são válidos 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 I (NDVI) na classificação de imagens OLI (a bordo do Landsat 8) 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 apresenta algumas alterações em suas configurações que podem propiciar resultados diferentes no processo de identificação das áreas queimadas, dentre estas alterações, está o aumento na

resolução radiométrica, situação que contribui para um aumento no nível de discretização da radiância refletida pelos alvos, permitindo maior diferenciação entre os mesmos. Esse teste é bastante relevante, uma vez que o OLI é o sensor que encontra-se ativo, gerando imagens atuais.

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos pelo método I (NDVI), 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 devem 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, ou até mesmo, para a proposição de novos métodos também baseados nas alterações espectrais ocorridas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASD. **FieldSpec® 3 User Manual**, 2010.

Bastarrika, A.; Chuvieco, E.; Martín, M.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, 2012.

Boschetti, M.; Stroppiana, D.; Brivio, P.A. Mapping Burned Areas in a Mediterranean Environment Using Soft Integration of Spectral Indices from High-Resolution Satellite Images. **Earth Interactions**, v. 14, 2010.

Brites, R.S. **Verificação de exatidão em classificação de imagens digitais orbitais: efeitos de diferentes estratégias de amostragem e avaliação de índices de exatidão**. 1996. 101p. Dissertação – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 1996.

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.

Clark, R.N. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. *In*: Recnz, A.N. (Ed). **Manual of Remote Sensing, volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences**. New York: John Wiley and Sons, 1999. Cap. 1, p. 3-58.

Corona, P.; Lamonaca, A.; Chirici, G. Remote sensing support for post fire forest management. **iForest**, v. 1, p. 6-12, 2008.

Coutinho, L. M. O Conceito de bioma. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 1, p. 13-23, 2006.

Epting, J.; Verbyla, D.; Sorbel, B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p. 328-339, 2005.

Escuin, S.; Navarro, R.; Fernández, 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. Burned area mapping in Central Africa using ATSR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 18, p. 3473-3497, 1998.

\_\_\_\_\_. Remote Sensing of Biomass Burning in Tropical Regions: Sampling Issues and Multisensor Approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, p. 292-315, 1998a.

Fernandéz, A.; Illera, P.; Casanova, J.L. Automatic Mapping of Surfaces Affected by Forest Fires in Spain Using AVHRR NDVI Composite Image Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 60, p. 153-162, 1997.

França, H. & Setzer, A.W. AVHRR analysis of a savanna site through a fire season in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 13, p. 2449-2461, 2001.

Fraser, R.H.; Li, Z.; Cihlar, J. Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): A New Technique for Burned Area Mapping over Boreal Forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 362-376, 2000.

Frizzo, T.L.M.; Bonizário, C.; Borges, M.P.; Vasconcelos, H.L. Revisão dos efeitos do fogo sobre a fauna de formações savânicas no Brasil. **Oecologia Australis**, v. 15, n. 2, p. 365-379, 2011.

Garcia, M. & Chuvieco, E. Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p. 414-423, 2004.

Giglio, L.; Loboda, T.; Roy, D.P.; Quayle, B.; Justice, C.O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 408-420, 2009.

Goedert, W.J.; Wagner, E.; Barcelos, A.O. Savanas tropicais: dimensão, histórico e perspectivas. *In*: Geleiro, F.G. & Neto, A.L.F. (Editores técnicos). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Embrapa Cerrados, Planaltina, 2008.

Goetz, A. F. H. Portable field reflectance spectrometer. **JPL Technical Report**. Pasadena, California, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1975.

Hoffmann, W.A. Fire and population dynamics of woody plants in a neotropical savanna: matrix model projections. **Ecology**, v. 80, n. 4, p. 1354 - 1369, 1999.

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.

IBGE, 2010. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2010 – Estudos e Pesquisas, Informação Geográfica n. 7.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 2010.

IDL. **Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide.** 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.

Jensen, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente.** 2 ed. Traduzida. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 597p.

Justice, C.O.; Giglio, L.; Korontzi, S.; Owens, J.; Morisette, J.T.; Roy, D.; Descloitres, J.; Alleaume, S.; Petitcolin, F.; Kaufman, Y. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 244-262, 2002.

Klink C.A. & Machado R. 2005. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, 1(1): 147-155.

Koutsias, N. & Karteris, M. Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 18, p. 3499-3514, 1998.

Lentile, L.B.; Holden, Z.A.; Smith, A.M.S.; Falkowski, M.J.; Hudak, A.T.; Morgan, P.; Lewis, S.A.; Gessler, P.E.; Benson, N.C. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. **International Journal of Wildland Fire**, v. 15, p. 319-345, 2006.

Li, Z.; Kaufman, Y.J.; Ichoku, C.; Fraser, R.; Trishchenko, A.; Giglio, L., Jin, J.; Yu, X. A Review of AVHRR-based Active Fire Detection Algorithms: Principles, Limitations, and Recommendations. *In*: Ahern, F.; Goldammer, J.G.; Justice, C. (Eds). **Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning and Coordinated International Effort.** 2000.

Lima J.E.F.W. & Silva E.M. Estimativa da produção hídrica superficial do Cerrado brasileiro. *In*: Scariot A., Sousa-Silva J.C., Felfili J.M. (organizadores). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. Cap. 2, p. 61-72. .

Longshaw, T.G. Field Spectroscopy for Multispectral Remote Sensing: an Analytical Approach. **Applied Optics**, v. 13, n. 6, p. 1487-1493, 1974.

Machado, R.B.; Neto, M.B.R.; Pereira, P.G.P.; Caldas, E.F.; Gonçalves, D.A.; Santos, N.S.; Tabor, K.; Steininger, M. Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro. Relatório técnico não publicado. Conservação Internacional, Brasília, 2004.

Martín, M.P. & Chuvieco, E. Mapping and evaluation of burned land from multitemporal analysis of AVHRR NDVI images. **Advances in Remote Sensing**, v. 4, n. 3, p. 7-13, 1995.

Medeiros, M.B. & Miranda, H.S. Mortalidade pós-fogo em espécies lenhosas de campo sujo submetido a três queimadas prescritas anuais. **Acta botânica brasílica**, v. 19, n. 3, p. 493-500, 2005.

Meneses, P.R. Fundamentos de radiometria óptica espectral. *In*: Meneses, P.R.; Neto, J.S.M. (Org.). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais**. 1 ed. Brasília: Edunb, 2001a, p. 15-40.

\_\_\_\_\_. Origem das feições espectrais. *In*: Meneses, P.R.; Neto, J.S.M. (Org.). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais**. 1 ed. Brasília: Edunb, 2001b, p. 40-60.

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.

Milton, E.J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1807-1827, 1987.

\_\_\_\_\_; Schaepman, M.E.; Anderson, K.; Kneubühler, M.; Fox, N. Progress in field spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 92-109, 2009.

Ministério do Meio Ambiente. Áreas prioritárias para conservação, uso sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade brasileira: atualização - portaria mma nº 9, de 23 de janeiro de 2007, Brasília, 2007.

Miranda, H.S.; Bustamante, M.M.C.; Miranda, A.C. The fire factor. *In*: Oliveira, Paulo S.; Marquis, Robert J. (Eds.). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press, 2002. Cap. 4, p. 51-68.

\_\_\_\_\_. & Sato, M.N. Efeitos do fogo na vegetação lenhosa do Cerrado. *In*: Scariot A., Sousa-Silva J.C., Felfili J.M. (organizadores). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. Cap. 4, p. 93-106.

Mueller, C.C. & Júnior, G.B.M. A agropecuária e o desenvolvimento socioeconômico recente do Cerrado. *In*: Geleiro, F.G. & Neto, A.L.F. (Editores técnicos). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Embrapa Cerrados, Planaltina, 2008.

Nardoto, G.B. & Bustamante, M.M.C. Effects of fire on soil nitrogen dynamics and microbial biomass in savannas of Central Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 8, p. 955-962, 2003.

Neto, M.B.R & Pivello, V.R. Lightning Fires in a Brazilian Savanna National Park: Rethinking Management Strategies. **Environmental Management**, v. 26, n. 6, p. 675 – 684, 2000.

Novo, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2008. 363p.

Oliveira-Filho, A. T.; Ratter, James A. Vegetation Physiognomies and Woody Flora of the Cerrado Biome. In: Oliveira, Paulo S.; Marquis, Robert J. (Eds). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press, 2002. Cap. 6, p. 91-120.

Pereira, J.M.C. Burned area mapping in Central Africa using ATSR data. **International Journal of Wildland fire**, v. 12, p. 259-270, 2003.

\_\_\_\_\_; Chuvieco, E.; Beaudoin, A.; Desbois, N. Remote sensing of burned areas: a review. In: Chuvieco, E. (Editor). **Remote sensing of burned areas: a review**. Universidad de Alcalá, Espanha, 1997.

Petropoulos, G.P.; Kontoes, C.; Keramitsoglou, I. Burned area delineation from a uni-temporal perspective based on Landsat TM imagery classification using Support Vector Machines. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, p. 70-80, 2011.

Pivello, V.R. & Coutinho, L.M. Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in a open Cerrado (Brazilian Savana). **Journal of Tropical Ecology**, v. 8, n. 4, p. 487-497, 1992.

\_\_\_\_\_. The use of fire in the cerrado and amazonian rainforests of brazil: past and present. **Fire ecology**, v. 7, n. 1, p. 24-39, 2011.

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.

\_\_\_\_\_; Fernández-Manso, A.; Stein, A.; Bijker, W. Estimation of area burned by forest fires in Mediterranean countries: A remote sensing data mining perspective. **Forest Ecology and Management**, v. 262, p. 1597-1607, 2011.

Ribeiro, J.F.; Walter, B.M.T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Sano, S.M.; Almeida, S.P.; Ribeiro, J.F. (Eds). **Cerrado: ecologia e flora volume 1**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. Cap. 6, p. 151-199.

Rogan, J. & Franklin, J. Mapping Wildfire Burn Severity in Southern California Forests and Shrublands Using Enhanced Thematic Mapper Imagery. **Geocarto International**, v. 16, n. 4, p. 91-100, 2001.

Roy, D.P.; Lewis, P.E.; Justice, C.O. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data—a bi-directional reflectance model-based expectation approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 263-286, 2002.

\_\_\_\_\_; Jin, Y.; Lewis, P.; Justice, C.O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 137-162, 2005.

\_\_\_\_\_ & Landmann, T. Characterizing the surface heterogeneity of fire effects using multi-temporal reflective wavelength data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 19, p. 4197-4218, 2005.

\_\_\_\_\_; Boschetti, L.; Maier, S.W.; Smith, A.M.S. Field estimation of ash and char colour-lightness using a standard grey scale. **International Journal of Wildland Fire**, v. 19, p. 698-704, 2010.

Silva, J.M.C. & Bates, J.M. Biogeographic Patterns and Conservation in the South American Cerrado: A Tropical Savanna Hotspot. **BioScience**, v. 52, n. 3, p. 225-233, 2002.

Silva, J.M.N.; Sá, A.C.L.; Pereira, J.M.C. Comparison of burned area estimates derived from SPOT-VEGETATION and Landsat ETM+ data in Africa: Influence of spatial pattern and vegetation type. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p. 188-201, 2005.

Setzer A., Morelli F. & Rivera-Lombardi R. 2007. Estimativa quinzenal de áreas queimadas. *In*: Rudorff B.F.T., Shimabukuro Y.E. & Ceballos J.C. (organizadores). **O sensor modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. Parêntese, São José dos Campos, 423 p.

Smith, A.M.S. & Hudak, A.T. Estimating combustion of large downed woody debris from residual white ash. **International Journal of Wildland Fire**, v. 14, p. 245-248, 2005.

\_\_\_\_\_; Drake, N.A.; Wooster, M.J.; Hudak, A.T.; Holden, Z.A.; Gibbons, C.J. Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: comparison of methods and application to MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12, 2007.

\_\_\_\_\_; Eitel, J.U.H.; Hudak, A.T. Spectral analysis of charcoal on soils: implications for wildland fire severity mapping methods. **International Journal of Wildland Fire**, v. 19, p. 976-983, 2010.

Soares, Ronaldo Viana. Ocorrência de incêndios em povoamentos florestais. **Revista Floresta**, v. 22, n. 12, p. 39-53, 1992.

Stronach, N.R.H. & McNaughton, S.J. Grassland fire dynamics in the serengeti ecosystem, and a potential method of retrospectively estimating fire energy. **International Journal of Applied Ecology**, v. 26, p. 1025-1033, 1989.



Stroppiana, D.; Bordogna, G.; Carrara, P.; Boschetti, M.; Boschetti, L.; Brivio, P.A. A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 69, p. 88-102, 2012.

Trigg, S. & Flasse, S. Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 16, p. 3161-3168, 2000.

\_\_\_\_\_. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 13, p. 2641-2647, 2001.

Veraverbeke, S.; Harris, S.; Hook, S. Evaluating spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2702-2709, 2011.

\_\_\_\_\_; Somers, B.; Gitas, I.; Katagis, T.; Polychronaki, A.; Goossens, R. Spectral mixture analysis to assess post-fire vegetation regeneration using Landsat Thematic Mapper imagery: Accounting for soil brightness variation. **Remote Sensing of Environment**, v. 14, p. 1-11, 2012.

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.