



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Humanas

Departamento de Geografia

Mestrado em Geografia

Daniel Gomes dos Santos Wendriner Loebmann

Classificação fitofisionômica do cerrado no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, GO, com a aplicação de uma análise combinatória com filtros adaptativos em imagens TM Landsat

Dissertação de Mestrado

Renato Fontes Guimarães

Orientador

Osmar Abílio de Carvalho Júnior

Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

Ana Paula Ferreira de Carvalho

Examinadores

Brasília

Julho/2008

Daniel Gomes dos Santos Wendriner Loebmann

Classificação fitofisionômica do cerrado no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, GO, com a aplicação de uma análise combinatória com filtros adaptativos em imagens TM Landsat.

Dissertação de Mestrado
Departamento de Geografia
Instituto de Ciências Humanas
Universidade de Brasília

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração em Gestão Ambiental.

Aprovada por:

Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães
Universidade de Brasília – Departamento de Geografia
Orientador, Presidente da Banca

Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior
Universidade de Brasília – Departamento de Geografia
Co-orientador, Examinador Interno

Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes
Universidade de Brasília – Departamento de Geografia
Examinador Interno

Dra. Ana Paula Ferreira de Carvalho
INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
Examinadora Externa

Brasília, 30 de julho de 2008.

[Ficha Catalográfica]

LOEBMANN, Daniel Gomes dos Santos Wendriner.

Classificação fitofisionômica do cerrado no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, GO, com a aplicação de uma análise combinatória com filtros adaptativos em imagens TM Landsat. 65 f. 297mm (Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia, mestre, Gestão Ambiental, 2008).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Departamento de Geografia

1. Índices de Vegetação
3. Cerrado

2. Chapada dos Veadeiros
4. Fitofisionomia

I. UnB – Geografia

II. Título (série)

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação, e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor

Daniel Gomes dos Santos Wendriner Loebmann

*Dedico este trabalho à minha família.
Aos amigos que se tornaram família.
E ao cerrado.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por me permitir chegar até aqui. À minha mãe, por toda a dedicação dispensada durante a caminhada de minha vida. À minha família e amigos que estão na Bahia e em outros lugares quase tão bons quanto lá. À equipe do LSIE/GEA, onde fiz bons amigos. Aos bons amigos e amiga *Maria Elisabete Silveira Borges, Frederico dos Santos Soares, Marcelo da Rocha Santos e Talles Wigino Pereira Lins*, pelos incentivos durante os momentos críticos do projeto. Ao grande amigo *João Marcos de Oliveira Ribeiro* pela animação e pelo apoio no trabalho de campo. Ao *Leonardo Figueiredo de Freitas*, em nome dos velhos tempos do LSIE. Ao *Sandro Nunes de Oliveira, Miriam Rodrigues da Silva, Marcus Fábio Ribeiro Farias, Thiago Avelar Chaves, Wátilla Portela Machado, Róbson Veloso Ribeiro Sodr e e Ant nio Felipe Couto Junior*, em nome dos novos tempos do LSIE. À *Ver nica Moreira Ramos*, tutora e amiga de todos. A todos os colegas do IBAMA e em especial à *L gia Martins Alexandre de Araújo, Tânia Maria Vieira Silva, Fabíola Siqueira de Lacerda e Érika Regina do Prado Nascimento*. À equipe do ICMBio do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, em especial ao *Daniel Rios de Magalhães Borges*, à *Simone Nunes Fonseca* e ao “*Seu Marcílio*”. Aos amigos da CEU. Aos professores do LSIE: *Renato Fontes Guimarães, Osmar Abílio de Carvalho Junior, Roberto Arnaldo Trancoso Gomes e  der de Souza Martins*, por me ensinarem a fazer pesquisa. Agradeço também à *Ana Paula Ferreira de Carvalho* pelas contribui es como examinadora da banca.

Resumo. Fatores como fertilidade do solo e disponibilidade de água estão entre os condicionantes da vegetação do bioma Cerrado responsáveis por uma diversidade de fitofisionomias que englobam as formações campestres, florestais ou savânicas. A quantidade de biomassa é distribuída de acordo com a formação vegetal, exercendo efeitos sobre a assinatura espectral do bioma. Este trabalho apresenta uma classificação das fitofisionomias de cerrado no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, em Goiás, obtida com a aplicação de uma análise combinatória com filtro adaptativo em uma série temporal de imagens TM Landsat. A metodologia foi dividida nas etapas: (a) pré-processamento das imagens TM; (b) elaboração de um índice de vegetação por meio das possíveis combinações de aumento ou diminuição dos valores de reflectância banda por banda em todo o espectro; (c) avaliação das combinações que formam os grupos que caracterizam os alvos; (d) análise de cada grupo separadamente, de acordo com as características mais relevantes que diferenciam os membros do grupo; (e) mapeamento das unidades de vegetação aplicando os índices elaborados de acordo com as características encontradas, com auxílio de uma imagem de alta resolução espacial; (f) comparação entre as classes geradas em imagens de diferentes datas. Como resultado, foi gerado um mapa com seis classes de vegetação, elaborado a partir da variação dos índices obtidos nas imagens da estação seca com os apresentados na imagem da estação úmida. A partir dos resultados obtidos neste trabalho, percebemos que a metodologia proposta é aplicável para o mapeamento de fitofisionomias do cerrado. As restrições mais intensas estão relacionadas à diferenciação entre as classes de formações florestais mais abertas e as veredas.

Palavras-chave: Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, fitofisionomia, Cerrado, índices de vegetação.

Abstract. The soil fertility and water availability are some of the many factors which controls the Cerrado biome vegetation and are in charge of a great diversity of phytophysionomies that encompass fields, savanna or forest formations. The vegetal mass amount variation occurs according to the vegetation formations and takes its effects over the spectral signatures of the biome. This paper presents a Cerrado vegetation phytophysionomic classification in the Chapada dos Veadeiros National Park, using combinatorics and adaptive indices applied in TM Landsat scenes. The methodology consists in: (a) pre-processing TM imagery; (b) elaborating a vegetation index via the possible *up-and-down* combinations band to band all along the reflectance spectral profile; (c) evaluating these combinations in order to form groups which characterize the targets; (d) analyzing each group separately, according to the most relevant characteristics that differentiate the group members; (e) mapping the vegetation unities applying the indices created according to the characteristics found, using high spatial resolution imagery to be compared with the ongoing classification; (f) Comparing the classes obtained in images acquired in different dates with each other. The result of the research was a map produced with six different vegetation classes. This map was developed using the wet – dry seasons index variation obtained in the imaging time series. The proposed methodology has been proved to be suitable to the *Cerrado's* phyto-physionomies mapping. The greater constraints are those related to the differentiation between open woodlands or open riparian forests and the *veredas*.

Keywords: Chapada dos Veadeiros National Park, remote sensing, phytophysionomy, Cerrado, Brazilian savannas, vegetation indices.

SUMÁRIO

1. Introdução	11
2. Revisão bibliográfica	12
2.1. Comportamento espectral da folha	14
2.2. Comportamento espectral da vegetação	16
2.3. Índices de vegetação	18
3. Materiais e métodos	21
3.1. Área de estudo	21
3.1.1. <i>Geologia</i>	21
3.1.2. <i>Compartimentação geomorfológica</i>	25
3.1.3. <i>Pedologia</i>	26
3.1.4. <i>Caracterização da vegetação local</i>	28
3.1.5. <i>Fitofisionomias do cerrado</i>	30
3.1.6. <i>Atividades antrópicas</i>	31
3.2. Imagens de satélite	32
3.3. Metodologia	33
3.3.1. <i>Pré-processamento</i>	33
3.3.2. <i>Algoritmo de análise combinatória</i>	33
3.3.3. <i>Filtros adaptativos</i>	38
3.3.4. <i>Definição das classes e comparação entre as imagens</i>	39
4. Resultados e discussão	40
5. Conclusões	56
6. Referências	58

LISTA DE FIGURAS

1. Exemplo de fragmento de espectro de vegetação verde	13
2. Exemplo típico de curva espectral para folhas saudáveis	14
3. Efeito do aumento do índice de área foliar (IAF) e do decréscimo do ângulo médio de orientação foliar (AMF) sobre a reflectância do dossel	17
4. Reflectância e transmitância média da matéria senescente e reflectância média da matéria lenhosa	17
5. Localização da área de estudo	22
6. Mapa geológico do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros e arredores	24
7. Mapa pedológico do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros e arredores	27
8. Imagem TM Landsat-5 da Chapada dos Veadeiros de 13/jun/2008.....	34
9. Imagem TM Landsat-5 da Chapada dos Veadeiros de 28/mar/2008.....	35
10. Imagem TM Landsat-5 da Chapada dos Veadeiros de 12/mar/2008.....	36
11. Imagem TM Landsat-5 da Chapada dos Veadeiros de 09/mar/2008	37
12. Exemplos de combinações de subida e descida para dois espectros diferentes	38
13. Média espectral dos oito primeiros grupos discriminados na imagem de 13/jun/2008, com o Índice (4)	41
14. Índice 6 aplicado aos grupos da imagem de 13/jun/2008 considerados como VFA.....	42
15. Detalhe da figura anterior, destacando a porção central do Parque.....	42
16. Índice 5 aplicado aos grupos da imagem de 13/jun/2008 considerados como VNFA....	43
17. Detalhe da figura anterior, destacando a porção central do Parque.....	43
18. Discriminação da classe VFA 4 na imagem classificada com auxílio da imagem IKONOS de jun-jul/2003	44
19. Discriminação da classe VFA 3 e diferenciação entre esta classe e a classe VFA 4 numa imagem IKONOS de jun-jul/2003	45
20. Classe VFA 3 englobando também a vegetação de veredas, e imagem IKONOS de jun-jul/2003 da mesma área	46
21. Discriminação das classes VFA 1 e VFA 2 na imagem IKONOS de jun-jul/2003.....	47
22. Média de reflectância do espectro das classes de VFA identificadas na imagem de 13/jun/2008	48
23. Mapa de classes de vegetação do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros obtido da imagem de 13/06/2008	49
24. Mapa de classes de vegetação do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros obtido da imagem de 28/05/2008	50
25. Mapa de classes de vegetação do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros obtido da imagem de 12/05/2008	51
26. Mapa de classes de vegetação do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros obtido da imagem de 09/03/2008	52
27. Variação temporal das classes de vegetação.	53
28. Classificação das fitofisionomias de cerrado no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros.....	55

LISTA DE TABELAS

1. Principais regiões espectrais utilizadas no sensoriamento remoto 13
2. Feições de absorção O–H na curva espectral da folha verde mais comumente citadas e seus constituintes químicos relacionados 15
3. Bandas de imageamento do sensor TM do satélite Landsat 5 32

1. Introdução

O bioma do Cerrado ocupa a região central do Brasil, onde o clima é caracterizado pela presença de invernos secos e verões chuvosos. A média anual da precipitação é da ordem de 1500 mm, variando de 750 a 2000 mm, praticamente concentrada na estação chuvosa, de outubro a março (ADÁMOLI et al., 1987). Por se localizar numa região de topografia plana, o espaço deste bioma tem sido constantemente transformado: a vegetação original é substituída por monoculturas, principalmente soja, que fazem do Cerrado o conjunto de ecossistemas mais ameaçado do país, protegido apenas nas áreas destinadas à conservação (AB'SÁBER, 2003). O monitoramento das Unidades de Conservação pode ser realizado por diversos modos, inclusive com a utilização de dados obtidos por sensoriamento remoto. As características da superfície terrestre podem ser estudadas com o uso de imagens de satélites, já que estas são formadas por informações provenientes da interação entre a radiação eletromagnética incidente e o material que a reflete, absorve e/ ou transmite de acordo com as propriedades do alvo imageado (MENESES, 2001a).

Assim, é possível extrair informações a respeito do estado fotossintético da vegetação de um determinado local ou ainda estimar a biomassa de certa fitofisionomia com a utilização da informação contida nos espectros de reflectância. O sensor TM (*Thematic Mapper*) a bordo do satélite Landsat 5 é um dos sensores utilizados para este fim. Este sensor foi especificamente projetado para discriminar as variações de vegetação, graças à localização e largura de suas bandas, que coincidem com as bandas de absorção da folha fotossinteticamente ativa (LILLESAND et al., 2008). A absorção de energia pela vegetação na banda do vermelho e do infravermelho de ondas curtas, aliada à alta reflectância no infravermelho próximo, oferece informações importantes a respeito do metabolismo da vegetação (LILLESAND et al., 2008; NOVO, 1992; PONZONI, 2001; VALERIANO, 2003). Por meio dessas regiões espectrais, pode-se estimar a quantidade de pigmentos na folha e conseqüentemente a atividade fotossintética de um grupo de plantas, além de estimar a estrutura da vegetação e a influência da água presente na estrutura foliar.

Sendo assim, o presente trabalho possui como objetivo aplicar um método de classificação fitofisionômica no cerrado do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, GO, a partir de uma análise combinatória com filtros adaptativos aplicada em uma série temporal de imagens TM-Landsat. A análise dos dados obtidos pelos sensores TM do satélite Landsat 5 é efetivada por meio da aplicação de índices relacionados às características espectrais da folhagem sadia. Numa primeira etapa, os dados foram classificados em grupos de acordo com as combinações possíveis de subida e descida de banda para banda em toda a curva espectral (CARVALHO JR. et al., 2001a; CARVALHO et al., 2003). Em seguida, cada grupo resultante foi classificado internamente de acordo com as características mais marcantes dos pixels que a ele pertencem. Por fim, a classificação final foi obtida comparando os resultados obtidos em diferentes datas.

2. Revisão Bibliográfica

De acordo com Meneses (2001a, 2001b), a radiação eletromagnética emitida pelo sol interage com os materiais da superfície terrestre, que refletem, absorvem ou transmitem parte da radiação eletromagnética de acordo com características de sua composição química. A interação ocorre por causa do nível de excitação dos elétrons no interior dos átomos que constituem o material ou por causa dos processos de vibração de suas moléculas. Cada material interage de maneira diferente com a radiação eletromagnética, de acordo com as características dos átomos e moléculas que o constituem.

Assim, tem-se a *feição* como produto das interações entre a matéria e a radiação (Figura 1). A feição pode ser definida como uma zona com um pico de reflectância ou uma depressão de absorção de energia identificada nos espectros de reflectância. O gráfico que representa o conjunto de feições de um determinado material ao longo do espectro eletromagnético, levando-se em conta a intensidade e a posição em que cada uma das feições ocorre, é denominado de *curva de reflectância espectral* (MENESES, 2001a, 2001b).

A interpretação da curva espectral permite a análise de algumas características dos recursos naturais, como a composição, a constituição e o arranjo dos componentes dos alvos analisados (MENESES, 2001a). Para que a análise seja feita de maneira mais eficiente, o espectro da radiação

eletromagnética foi dividido em *regiões* ou *intervalos espectrais*, como mostra a Tabela 1. Esta tabela mostra as regiões que possuem maior relevância para o uso de sensores remotos.

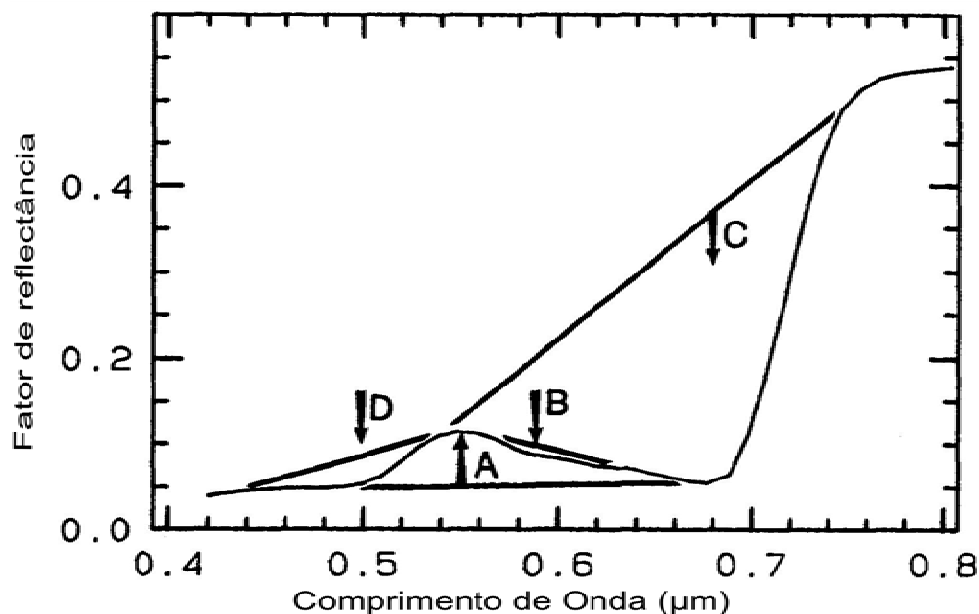


Figura 1: Exemplo de fragmento de espectro de vegetação verde, mostrando efeito da remoção do *continuum* da amostra, usado para ressaltar feições de reflectância (A) e de absorção (B, C e D). Fonte: Clark et al., 1992.

Tabela 1: Principais regiões espectrais utilizadas no sensoriamento remoto. Adaptado de Asner (2004) e Meneses (2001a).

Região	Sigla	Intervalo (em μm)	Fonte de radiação	Propriedade medida
Visível	VIS	0,4 – 0,7	Sol	Reflectância
Infravermelho próximo	NIR	0,7 – 1,3	Sol	Reflectância
Infravermelho de ondas curtas	SWIR	1,3 – 2,6	Sol	Reflectância
Infravermelho médio	MIR	3,0 – 4,0	Sol	Reflectância
		4,5 – 5,0	Incêndios	Temperatura
Infravermelho termal	TIR	8,0 – 9,5	Terra	Temperatura
		10 – 14		
Microondas, radar	MW	1 mm – 1 m	Terra	Temperatura
			Sensor ativo	Rugosidade

2.1. Comportamento espectral da folha

A curva espectral da folha sadia apresenta as seguintes feições: forte absorção na região do VIS, reflectância relativamente alta na região do NIR e relativamente baixa no SWIR (KNIPLING, 1970; VALERIANO, 2003; ASNER, 1998, 2004. Fig. 2).

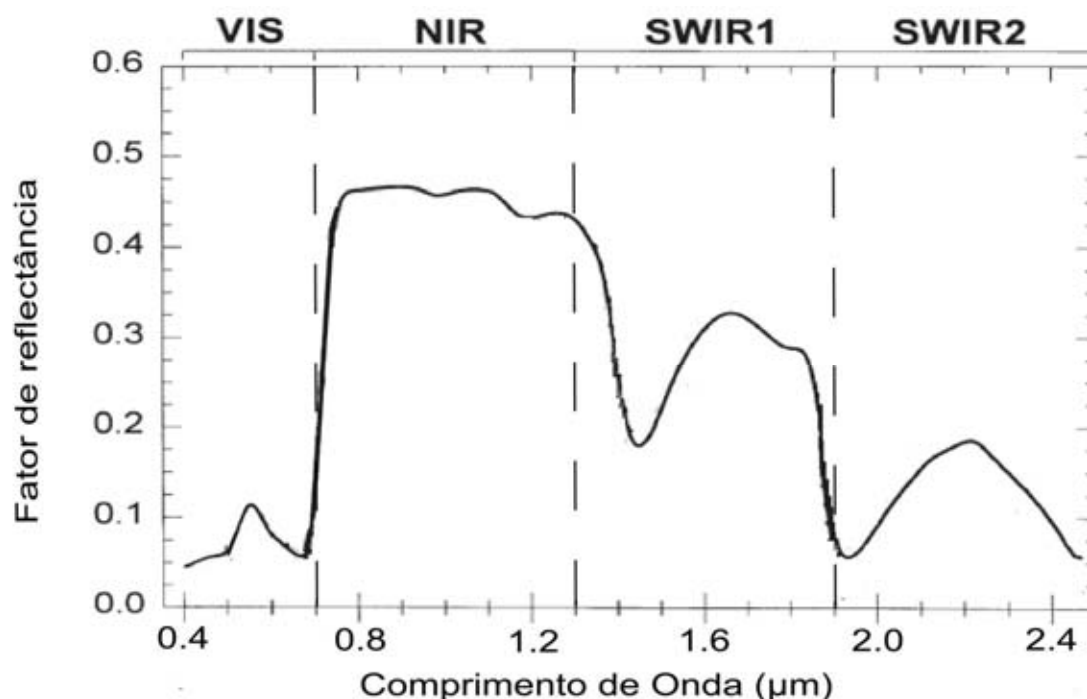


Figura 2: Exemplo típico de curva espectral para folhas sadias. O SWIR foi dividido em duas regiões para realçar as bandas de absorção. Adaptado de Asner (1998).

A absorção na região do visível é devida à transição eletrônica dos pigmentos foliares, que convertem a radiação eletromagnética em calor, fluorescência e em energia estocada na forma de componentes orgânicos (PONZONI, 2001). Os valores elevados de reflectância na região do infravermelho próximo estão relacionados ao espalhamento dos fótons na interface ar—célula que existe dentro do mesófilo da célula (GATES et al., 1965; WOOLLEY, 1971; PONZONI, 2001; ASNER, 1998, 2004), enquanto que as feições de absorção do infravermelho de ondas curtas são causadas pelos estiramentos das ligações O—H relacionadas à água (Tab. 2). É importante ressaltar que as feições de absorção nessa região espectral também são influenciadas pelos estiramentos e deformações das ligações C—O, C—H e O—H de outros compostos presentes na folha, como lignina, amido, proteínas,

nitrogênio e açúcares (CURRAN, 1989; CARVALHO JÚNIOR. et al, 2001a; ASNER, 2004).

Tabela 2: Feições de absorção O–H na curva espectral da folha verde mais comumente citadas e seus constituintes químicos relacionados (Adaptado de Asner, 2004)

C. de onda (μm)	Origem da feição	Const. Químico
0,97	Dobramento O–H, segundo <i>overtone</i>	Água , amido
0,99	Estiramento O–H, segundo <i>overtone</i>	Amido
1,20	Dobramento O–H, primeiro <i>overtone</i>	Água , celulose, amido, lignina
1,40	Dobramento O–H, primeiro <i>overtone</i>	Água
1,45	Estiramento O–H, primeiro <i>overtone</i> / estiramento C–H / deformação C–H	Amido, açúcar, lignina, água
1,49	Estiramento O–H, primeiro <i>overtone</i>	Celulose, açúcar
1,53	Estiramento O–H, primeiro <i>overtone</i>	Amido
1,54	Estiramento O–H, primeiro <i>overtone</i>	Amido, celulose
1,58	Estiramento O–H, primeiro <i>overtone</i>	Amido, açúcar
1,78	Estiramento C–H, primeiro <i>overtone</i> / estiramento O–H / deformação H–O–H	Celulose , açúcar, amido
1,82	Estiramento O–H / estiramento C–O, segundo <i>overtone</i>	Celulose
1,90	Estiramento O–H, estiramento C–O	Amido
1,94	Estiramento O–H, deformação O–H	Água , lignina, proteína, nitrogênio, amido, celulose
1,96	Estiramento O–H, dobramento O–H	Açúcar, amido
2,00	Deformação O–H, deformação C–O	Amido
2,08	Estiramento O–H / deformação O–H	Açúcar, amido
2,10	Dobramento O=H / estiramento C–O / estiramento C–O–C, terceiro <i>overtone</i>	Amido , celulose
2,25	Estiramento O–H, deformação O–H	Amido
2,27	Estiramento C–H / estiramento O–H / dobramento CH ₂ / estiramento CH ₂	Celulose, açúcar, amido
2,34	Estiramento C–H / deformação O–H / deformação C–H / estiramento O–H	Celulose

Ainda assim, as variações da quantidade de pigmentos e da presença de água foliar podem ser estimadas por meio da reflectância da folha (CARVALHO JÚNIOR et al., 2001a; CARVALHO et al., 2003). Esta variação pode ser avaliada por meio da medição dos picos de reflectância e das feições de absorção, com a remoção do *continuum* (CLARK et al., 1990, 1992 e 1995).

2.2. Comportamento espectral da vegetação

A curva espectral da vegetação, entendida aqui como a reflectância do dossel, é o resultado da influência de certos fatores de ordem ambiental exercida sobre a reflectância da folha verde. Dentre estes fatores destacam-se os relacionados à área foliar da vegetação, à quantidade de matéria vegetal senescente, ao ângulo de orientação do dossel, à exposição do solo ou substrato rochoso, à composição deste substrato e ao estresse fisiológico das plantas (ASNER, 1998, 2004; VALERIANO, 2003).

A área foliar da vegetação influencia a reflectância da vegetação na região do NIR, onde há o espalhamento de fótons na folha verde (Figura 3a). A influência da área foliar é muito reduzida nas regiões espectrais do VIS e do SWIR, onde a curva espectral da folha apresenta valores relativamente baixos. A área foliar é um fator dependente do *albedo de espalhamento simples* ($\omega = \text{reflectância} + \text{transmitância}$) e tem grande influência sobre os índices criados para aferir o estado e a quantidade de biomassa presente na vegetação (ASNER, 1998, 2004).

Assim como acontece com área foliar, a influência do ângulo de orientação das folhas do dossel é mais forte na região espectral em que a reflectância é mais intensa (Fig. 3b). No caso da folha verde, a variação em função do ângulo de orientação também ocorre na região do NIR e também é influenciada pelo albedo de espalhamento simples. A diferença está no fato de que, ao contrário da área foliar, a variação do ângulo de orientação das folhas é inversamente proporcional ao valor de reflectância do dossel (ASNER, 1998, 2004).

Quanto mais matéria lenhosa é exposta na vegetação, mais intensas se tornam as feições de absorção no SWIR relacionadas aos compostos de carbono existentes na planta (Fig. 4b). A presença de matéria vegetal senescente exerce um efeito contrário ao da matéria lenhosa, diminuindo a reflectância ao longo do espectro de ondas curtas (0,4 a 2,5 μm) e mascarando as feições de absorção dos compostos de carbono localizadas entre 2 e 2,5 μm (Fig. 4a). No entanto, a presença da matéria lenhosa, assim como a de material senescente, diminui a intensidade da absorção dos pigmentos na região do VIS (ASNER, 1998, 2004).

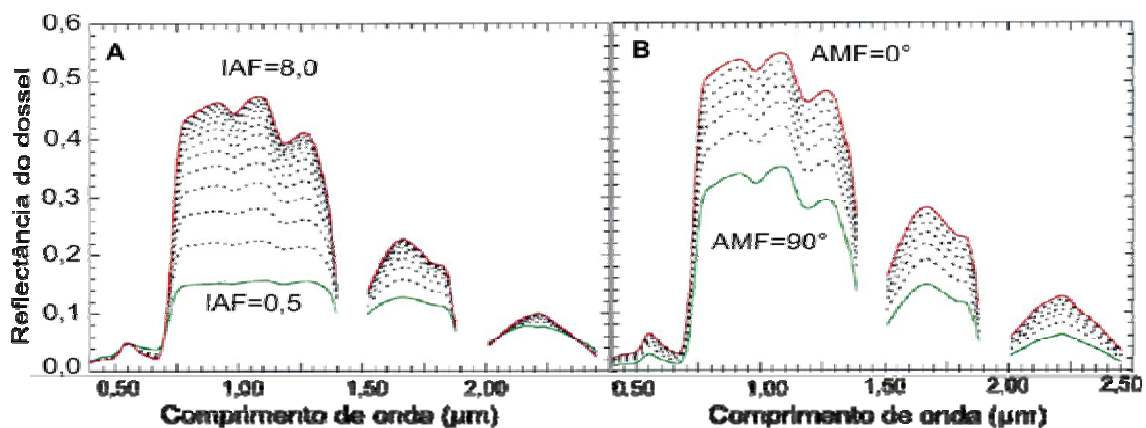


Figura 3: A) Efeito do aumento do índice de área foliar (IAF) sobre a reflectância do dossel, com o ângulo médio de orientação foliar de 45°; B) efeito do decréscimo do ângulo médio de orientação foliar (AMF), com o valor do IAF mantido em 5,0. Adaptado de Asner (1998).

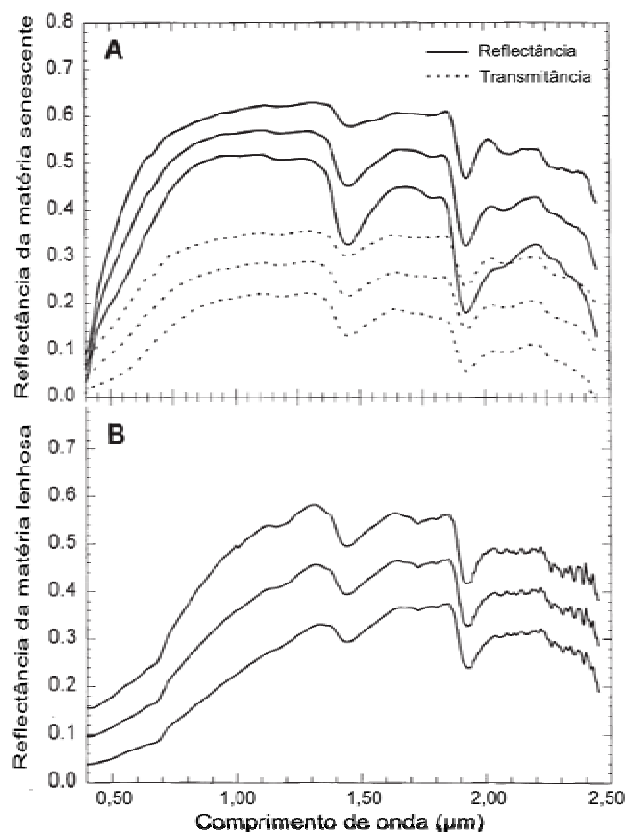


Figura 4: A) Reflectância média ± 1 desvio padrão (linhas contínuas) e transmitância média ± 1 desvio padrão (linhas tracejadas) da matéria senescente (serrapilheira); B) reflectância média ± 1 desvio padrão da matéria lenhosa. Adaptado de Asner (1998).

A influência da exposição do substrato rochoso ou do solo varia de acordo com os minerais predominantes neste substrato. As zonas de absorção dos minerais de ferro, argilas, carbonatos e sais são as que mais afetam a reflectância dos solos. A matéria orgânica também exerce influência sobre a

curva espectral do solo (ASNER, 1998, 2004; MENESES; FERREIRA JUNIOR, 2001).

As feições mais marcantes da argila estão localizadas nas bandas de 1,3—1,4 μm , 1,8—1,9 μm e 2,2—2,4 μm . Destas, apenas a terceira não é mascarada pela água. A banda de absorção da argila está relacionada ao ânion OH^- e o seu formato e profundidade variam de acordo com o cátion associado, como o $\text{Fe}^{2+, 3+}$, Al^{3+} e Mg^{2+} e também de acordo com a constituição estrutural do mineral de argila – 2:1 ou 1:1, por exemplo. Os carbonatos possuem feições de absorção localizadas entre 1,8 e 2 μm e entre 2,2 e 2,3 μm . A água também interfere na mensuração da reflectância da primeira banda. Já as bandas de absorção do ferro estão localizadas na região entre 0,4 e 1,1 μm , com feições distintas de acordo com os óxidos que lhes dão origem, geralmente hematita ou goethita. Estes dois óxidos estão presentes na quase totalidade dos latossolos presentes no cerrado. Por fim, a matéria orgânica do solo exerce influência sobre toda a curva espectral dos solos e da vegetação, diminuindo os valores de reflectância ao longo de toda a região de ondas curtas (VIS+NIR+SWIR). Na vegetação, a diminuição dos valores de reflectância costuma ser mais intensa quando o índice de área foliar é mais baixo (ASNER, 1998, 2004; MENESES; FERREIRA JUNIOR, 2001).

O estresse das plantas também exerce influência sobre a curva espectral da vegetação. Alterações causadas pela salinidade, problemas na disponibilidade de nutrientes, diminuição da quantidade de vasos condutores da seiva ou ausência de água em geral aumentam a temperatura emitida pelas plantas e podem ser detectados por sensores TIR (JACKSON et al., 1986). O estresse causado pela ausência da água pode ser mapeado pelas bandas de absorção do íon O–H localizadas na região do NIR, entre 1,2 e 1,24 μm , ou do SWIR, na bandas localizadas em 1,55–1,75 μm ou entre 2,08 e 2,35 μm (RIPPLE, 1986; CIBULA et al., 1992; GAO, 1996)

2.3. Índices de vegetação

A banda de absorção que a vegetação sadia apresenta na região do visível é certamente uma das mais fortes encontradas na natureza (CARVALHO et al., 2002; CLARK et al., 1990). A grande diferença existente entre as reflectâncias das bandas do vermelho (VIS) e do infravermelho

próximo (NIR) é bastante explorada na elaboração de diversos índices de vegetação, dentre os quais se destaca o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ou *NDVI* – do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*, obtido por meio da equação

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \quad (1)$$

em que ρ_{NIR} corresponde ao valor de reflectância da banda do infravermelho próximo, enquanto que ρ_{Red} é a reflectância da banda do vermelho (0,63—0,69 μm). O NDVI é um dos índices mais utilizados para estimar a quantidade (biomassa) e condição (umidade e status fisiológico) da vegetação com o uso de imagens de satélites (ROUSE et al., 1973; JACKSON, 1983; PUREVDORJ et al., 1998; ELMORE et al., 2000; WANG et al., 2007).

O NDVI apresenta limitações a respeito da influência do solo, interferências atmosféricas e da saturação em dosséis com altos valores de IAF (ASRAR et al., 1984; SELLERS, 1985; HUETE, 1988; HUETE et al., 1994; HUETE et al., 1997; FARRAR et al., 1994; RONDEAUX et al., 1996). A saturação do NDVI ocorre nos locais em que o índice de área foliar é superior a 4,0. Nestas regiões, mesmo que a quantidade de biomassa aumente, o NDVI permanece estável e impossibilita o estudo de variações em áreas florestadas.

A atmosfera interfere nos valores do índice em locais com grande quantidade de aerossóis suspensos, que causam o espalhamento da luz. A interferência é mais intensa à medida que a densidade do dossel aumenta (LIU; HUETE, 1995; SLATER; JACKSON, 1982). A interferência do solo sobre o NDVI varia de acordo com a tonalidade do material exposto. Quando o solo exposto é escuro, ocorre um acréscimo nos valores do índice, enquanto que nos locais em que o solo apresenta tonalidades claras há um decréscimo nos valores do NDVI (LIU; HUETE, 1995; HUETE et al., 1985). Alguns experimentos mostram variações no índice causadas exclusivamente por variações pedológicas (COLWELL, 1974; HUETE et al., 1985). Huete (1988) percebeu que a quase linearidade da relação entre a reflectância do solo no infravermelho próximo com a do vermelho contribuía para a dissociação entre esta classe e as classes de vegetação. A partir desta propriedade, foi desenvolvido o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo ou *SAVI*, *Soil Adjusted Vegetation Index*:

$$SAVI = (1+L) * (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} - \rho_{Red} + L) \quad (2)$$

em que a constante $L = 0,5$ foi ajustada para corrigir a variação causada pelo solo exposto em meio à vegetação (HUETE, 1988; RONDEAUX et al., 1996).

No entanto, o índice gerado com o ajuste de correção para o solo, bem como outros ajustes realizados posteriormente, geram imagens muito semelhantes às do NDVI. Possivelmente isto ocorre porque todos eles utilizam as mesmas duas bandas de reflectância em seu cálculo (LYON et al., 1998; ELMORE et al., 2000). Ainda assim, esses índices continuam bastante utilizados, seja pela forte correlação com outros índices relacionados à estrutura da vegetação, como o índice de área foliar (*LAI – Leaf Area Index*) e a fração da radiação fotossinteticamente ativa (*FPAR, Fraction of Photosynthetically Active Radiation*), como pela própria eficiência do índice para estudos da vegetação.

O LAI e o FPAR são utilizados para estimar o funcionamento e a capacidade de absorção de energia da vegetação (MYNENI et al., 2002). São muito importantes para estudos ecológicos e climatológicos em escala global (SELLERS et al., 1997). O LAI pode ser entendido como a área total da face superior das folhas do dossel dentro de uma determinada região (m^2 / m^2) (GONG et al., 2003). Sua aferição envolve cálculos com fatores de reflectância espectral bidirecional, extraídos, entre outras fontes, de imagens dos sensores MODIS e MISR do satélite Terra (KNYAZIKHIN et al., 1999). Um fato importante é que tanto o LAI como o FPAR apresentam correlação com os índices de vegetação, como o NDVI (CHEN; CIHLAR, 1996; CARLSON; RIPLEY, 1997; GAMON et al., 1995; HUETE et al., 1997, 2002; SELLERS et al., 1997; MYNENI et al., 2005; KNYAZIKHIN et al., 1998; JIANG et al., 2006) ou ainda com índices mais simples, como o *Simple Ratio* (SR) e o *Reduced Simple Ratio* (RSR) (STENBERG et al., 2004).

No que concerne às aferições de umidade foliar, experimentos mostraram bons resultados ao se utilizar índices semelhantes ao NDVI em que a banda do vermelho é substituída pela banda do infravermelho de ondas curtas (CHEN et al., 2005; JACKSON et al., 2004; CHEN et al., 2003; CECCATO et al., 2002; USTIN et al., 1997). Ao índice gerado com essa troca de bandas dá-se o nome de *NDWI, Normalized Difference Water Index* (GAO, 1995, 1996; GAO; GOETZ, 1995, Eq. 3):

$$NDWI = (\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}) / (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}) \quad (3)$$

em que o ρ_{SWIR} simboliza a reflectância no infravermelho de ondas curtas, nas bandas de 1,65 μm ou de 2,215 μm . Entre outras coisas, verificou-se que a saturação de valores altos, comum quando o NDVI é utilizado em locais de vegetação densa, é menos intensa em índices NDWI (CHEN et al, 2005; ROBERTS et al, 1997). Neste trabalho, foram utilizados índices sensíveis tanto à banda de absorção da clorofila (NDVI), quanto à banda de absorção da água foliar (NDWI).

3. Materiais e métodos

3.1. Área de estudo

O Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros possui uma área de 650,35 km^2 e se localiza no nordeste do Estado de Goiás (Fig. 5). Está localizado nos municípios de Alto Paraíso de Goiás e Cavalcante, entre as latitudes de 13°53'01"S e 14°11'06"S e as longitudes de 47°25'31"W e 47°53'43"W. Partindo de Brasília, o acesso ao parque é feito pela rodovia BR-020 e em seguida pela GO-430, GO-118 (ou BR-010), passando pela vila de São Gabriel e pelas cidades de São João D'Aliança e Alto Paraíso de Goiás. A seguir, o acesso à entrada principal e à sede da unidade de conservação se dá pela rodovia GO-327, passando pela vila de São Jorge (SAMPAIO, 2007).

3.1.1. Geologia

No que diz respeito à geologia, a região é dominada pelas Formações Arraias (PP4a) e Traíras (PP4t), do Grupo Araí (PP4ar). A Formação Ticunzal (PP13tz) e a Unidade Gnáissico-migmatítica do Complexo Almas – Cavalcante (PPac) surgem em menores porções ao norte da unidade de conservação. O Parque está inteiramente localizado na Província Geológica Tocantins (BIZZI et al., 2001). As litologias estão representadas na Fig. 6.

O Grupo Araí (PP4ar) é uma seqüência espessa de rochas sedimentares clásticas e pelíticas de granulometria grosseira sobrepostas a uma inconformidade entre várias unidades paleoproterozóicas. Sua base é formada por conglomerados, arenitos e siltitos associados a camadas de rochas vulcânicas alcalinas. A seqüência superior do Grupo é formada por

sedimentos marinhos transgressivos clásticos e carbonáticos intercalados com quartzitos depositados num ambiente de plataforma dominado por correntes de maré e de tempestades (CPRM, 2007).

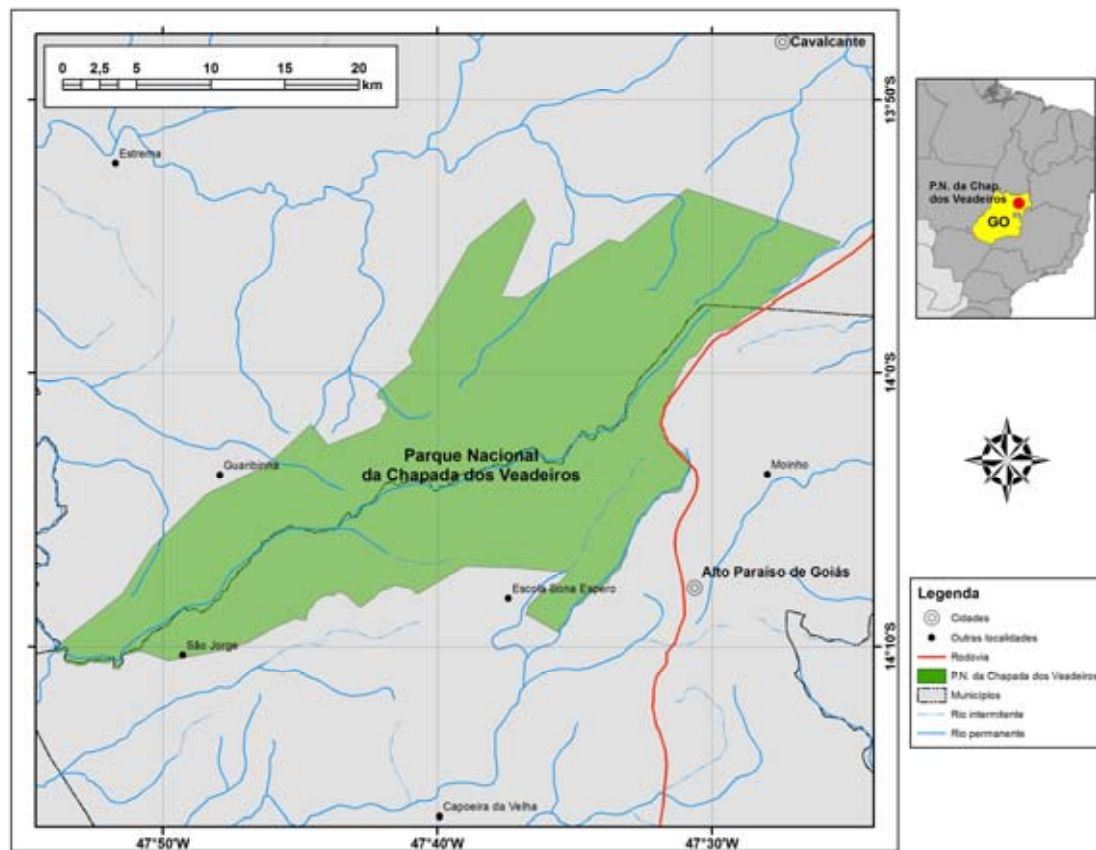


Figura 5: Localização da área de estudo.

O Grupo Araí constitui-se num sistema de rifts da era Paleoproterozóica e forma parte do embasamento sobre o qual estão assentadas as rochas do Grupo Paranoá. A direção das paleocorrentes indicam que os sedimentos clásticos se originaram no noroeste do Cráton São Francisco (PIMENTEL et al., 2001). Este grupo é representado no Parque Nacional pelas Formações Arraias e Traíras.

A Formação Arraias (PP4a) domina a maior parte do Parque Nacional, distribuindo-se na direção NE – SW. Suas rochas foram formadas na era Paleoproterozóica, período Estateriano, há cerca de 1.771 milhões de anos(Ma). Os litotipos predominantes são os quartzitos, os filitos e metassiltitos, de metamorfismo regional, além de albitos e conglomerados, respectivamente metamórficos hidrotermais e sedimentares clásticos. Basaltos, brechas piroclásticas e riolitos também surgem nesta Formação. O ambiente

deposicional da fácies sedimentar é continental, provenientes de sistema fluvial meandrante com depósitos em barras arenosas e dunas subaquosas (CPRM, 2007).

O sul do Parque é dominado pelas rochas da Formação Traíras (PP4t), com fácies de metamorfismo xisto-verde de 1.600 Ma. Predominam as rochas formadas por metamorfismo regional, como os xistos carbonáticos, com representatividade entre 40 e 60% da formação, as cloritas-xisto e os filitos, 10 a 40% cada. Os dolomitos surgem com representatividade de até 10%. A fácies sedimentar é de ambiente deposicional marinho, sistema plataformar carbonático com depósitos em tempestitos. A estrutura sedimentar é de acamamento (CPRM, 2007). O Grupo Araí é bordejado em seu limite norte pela Formação Ticunzal (PP13tz), formadas entre os períodos Orosiriano e Sideriano da era Paleoproterozóica e dispostas numa estreita faixa ao longo dos limites noroeste e oeste do Parque Nacional. Esta Formação é constituída preponderantemente por micas-xisto (entre 60 e 90%), além de turmalinitos, grafitas-xisto, micas-xisto, metaconglomerados, metapelitos e metarritmitos. A fácies anfibolito da formação é de baixo grau de metamorfismo e possui datação de 2.500 Ma (CPRM, 2007).

O Complexo Almas – Cavalcante (PPac) domina as regiões dos vales localizadas fora do Parque, a oeste e noroeste deste. Possui nível altimétrico menos elevado em relação à Chapada dos Veadeiros e é formado basicamente por rochas plutônicas. A Unidade gnáissico-migmatítica (PP12gm) deste Complexo surge no centro-norte da unidade de conservação, num enclave entre o Grupo Araí e a Formação Ticunzal. Predominam os migmatitos (40 a 60%), de metamorfismo regional. A Unidade apresenta também rochas plutônicas, como os trondhjemitos, tonalitos, granodioritos, quartzos monzodioritos e quartzos dioritos. A idade foi estimada entre 2.400 e 2.200 Ma, períodos Sideriano e Riaciano da era Paleoproterozóica (CPRM, 2007).

Nos arredores do Parque Nacional surgem rochas de outras litoestratigrafias, como os Granitos da Subprovíncia Paranã (PP4yp), o Granito Serra da Cangalha (PP4ysc), Unidades conglomerática rítmica quartzítica inferior (MPpa1) e síltico-ardosiana (MPpa2) do Grupo Paranoá (MPpa), Subgrupo Paraopeba (NP2bp) e Formação Três Marias (NP3tm) do Grupo Bambuí (NPb),

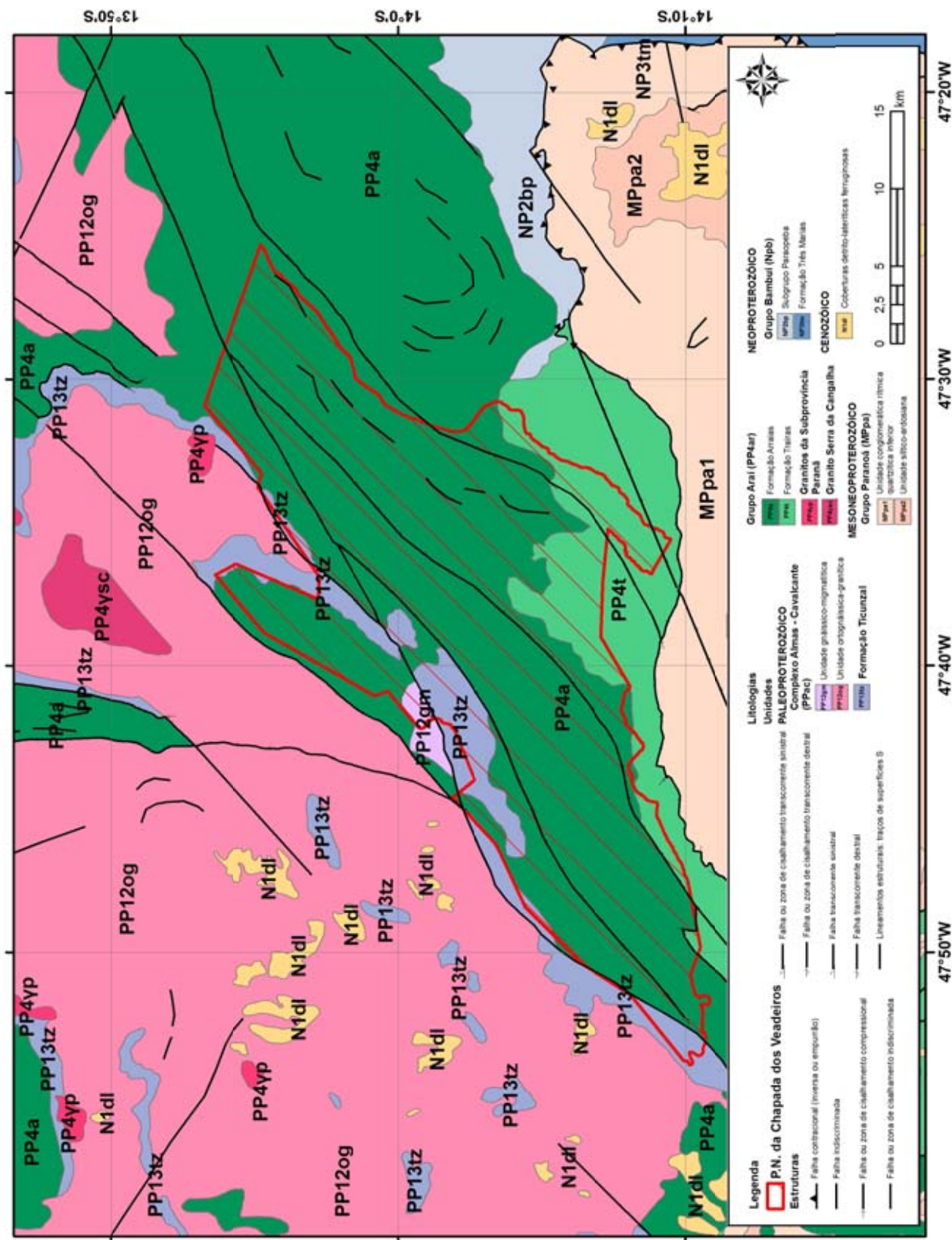


Figura 6: Mapa geológico do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros e arredores (Adaptado de CPRM, 2007).

Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (N1dl) e Depósitos aluvionares (Q2a). Os Depósitos aluvionares, as rochas do Grupo Bambuí e parte das Coberturas detrito-lateríticas estão na região do vale do rio Paranã, portanto na Província Geológica do São Francisco.

3.1.2. *Compartimentação geomorfológica*

A descrição dos compartimentos geomorfológicos aqui apresentada é baseada na descrição de Carvalho Júnior et al (2001b). Os Domínios Planalto Central Goiano e as Depressões Interplanálticas dominam a geomorfologia do Parque. O Planalto Central Goiano apresenta o Pediplano do Tocantins como seu limite norte, ao sul-sudeste encontra-se com o Planalto Goiás-Minas e a leste, com o Vão do Paranã. Na área do parque está representado unicamente pela Região do Complexo Montanhoso de Veadeiros, subdividido em quatro unidades:

Unidade de Cadeias Cristalinas com Alinhamentos de Cristas: é o núcleo do Complexo Montanhoso e apresenta as altitudes mais elevadas (mais de 1.400 m) e o ponto culminante do Planalto Central Brasileiro, Pouso Alto (1.650 m). Apresenta um conjunto de cristas de quartzito do Grupo Araí, alinhadas na direção NE – SW, com o topo plano e vertentes íngremes. As cristas raramente apresentam encouraçamentos e seus solos são rasos, com rególito pouco espesso, onde surgem Cambissolos e Neossolos Litólicos. É possível observar superfícies estruturais escalonadas em cinco níveis de terraço, embutidos na área do Pouso Alto. Os afloramentos de quartzito denotam duas etapas de erosão eólica. A mais antiga, com superfície de ablação lisa coberta por uma fina película de óxido de ferro, enquanto a mais recente apresenta evidências de contribuição hídrica, em função de irregularidades em sua superfície.

Unidade de Dissecação Intermediária: apresenta altitudes entre 1.000 e 1.400 m, com declividades entre 10° e 20°. Há relevos residuais do tipo *inselberg*, com presença de cristas remanescentes.

Unidade de Depressões Intraplanálticas: representada por duas subunidades:

Depressão Intraplanáltica do Rio Preto: bacia com vertentes extensivamente denudadas, com *inselbergs* e raras cristas alinhadas de topos

planos sustentados por quartzitos do Grupo Araí. Apresenta padrão meandrante no médio curso do rio, com planície aluvial extensa e canais abandonados. Limites de laterização ocorrem no interior da planície. Presença de residuais do tipo caos de blocos de quartzitos nas áreas mais denudadas.

Depressão Intraplanáltica do São Miguel e do Couro: possui incisões de drenagem profundas no contato entre rochas do Grupo Araí ao norte e na base do Grupo Paranoá ao sul. Depósitos antigos de conglomerados aluviais nas nascentes. O desnível de 20 a 30 m no eixo de drenagem evidencia a rápida evolução do sistema fluvial.

Unidade de Borda Estrutural: escarpas adaptadas às falhas proterozóicas e falhas neotectônicas reativadas nos limites com as depressões interplanálticas, e laterização de borda sobre rególitos, nos limites com outras unidades do complexo montanhoso.

O Domínio das Depressões Interplanálticas pode ser dividido em duas Regiões: a da Depressão do Tocantins e a da Depressão do Vão do Paranã. Apresentam extenso pediplano desenvolvido sobre rochas granito-gnáissicas na Depressão do Tocantins, enquanto o pediplano se forma sobre as rochas do Grupo Araí no Vão do Paranã. Seus limites com o Planalto Central Goiano são abruptos, com escarpas adaptadas às falhas proterozóicas e neotectônicas do Terciário e Quaternário. Apresentam coberturas pedológicas latossólicas desenvolvidas sobre colúvios e alúvios. O relevo é plano a suave ondulado, com presença de morros residuais com pequenos desníveis, convexos e sustentados por rochas silicificadas. Ocorrência de lateritização sobre os rególitos e materiais transportados nos limites desses morros.

3.1.3. *Pedologia*

Os solos dominantes no Parque (Fig. 7) são o Latossolo Vermelho-amarelo e o Neossolo Litólico. A Laterita Hidromórfica álica, Plintossolo Pétrico na nova classificação da Embrapa (2006), também surge ao norte do Parque (IBAMA/PROAVES, 1998).

Os Latossolos possuem horizonte B latossólico, com nenhuma ou quase nenhuma alteração da quantidade de argila existente entre os horizontes A e B. A evolução dos perfis dos solos desta classe é bastante avançada, com os processos de latolização gerando forte intemperização dos minerais primários e

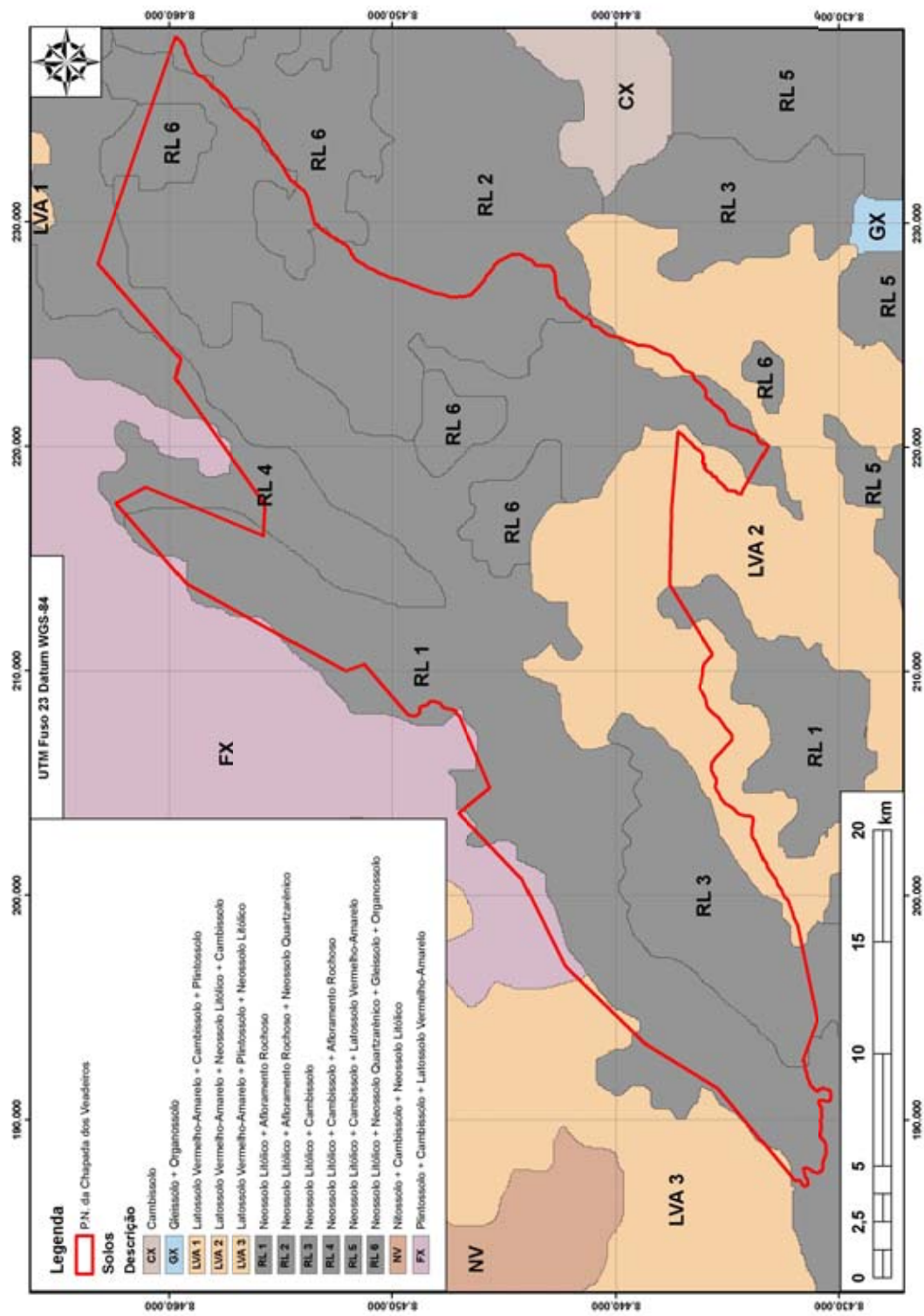


Figura 7: Mapa pedológico do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros e arredores (Adaptado de MME, 1982; EMBRAPA, 2006).

menor resistência dos minerais secundários. Os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio se concentram no perfil, junto com os argilominerais mais resistentes. Não ocorre mobilização ou migração de argila de modo expressivo, assim como ferrólise, gleização ou plintitização (EMBRAPA, 2006).

Os Neossolos são solos pouco evoluídos, sem horizonte diagnóstico, em via de formação. Predominam as características do material de origem. Os Neossolos Litólicos apresentam horizonte A ou hístico sobre horizonte C ou Cr ou sobre material formado em 90% ou mais por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2 mm, que possuem um contato lítico típico ou fragmentário dentro dos primeiros 50 cm do perfil (EMBRAPA, 2006).

Os Plintossolos apresentam plintitização expressiva com ou sem formação de petroplintita. O horizonte diagnóstico apresenta segregação de ferro, que atua como agente de cimentação, com uma capacidade de consolidação acentuada (EMBRAPA, 2006).

3.1.4. Caracterização da vegetação local

O Parque Nacional é coberto por diversas fitofisionomias do bioma do Cerrado. Este bioma abrange uma área de aproximadamente 2 milhões de km², o equivalente a 23% do território brasileiro (ALHO; MARTINS, 1995; FURLEY, 1999). Ocupa os planaltos do Brasil Central e áreas adjacentes, região que possui solos bastante antigos, bem intemperizados, geralmente pobres em nutrientes (EITEN, 1993; FURLEY, 1999). A disponibilidade dos nutrientes nos horizontes do solo, na maioria das vezes, determina a composição florística do bioma, que se caracteriza pela presença de três estratos: arbóreo, arbustivo e graminoso ou herbáceo. A proporção entre estes três estratos é o critério mais amplamente utilizado na classificação de suas fitofisionomias (RIBEIRO; WALTER, 1998).

O clima da região é classificado como tropical semi-úmido do tipo Aw, segundo Köppen, caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos. A precipitação varia de 1.500 mm a 1.750 mm anuais, geralmente concentradas entre os meses de outubro e março, e a temperatura média anual varia entre 24°C e 26°C (IBAMA/PROAVES, 1998; RIBEIRO; WALTER, 1998). As plantas do bioma Cerrado apresentam mecanismos de adaptação para o regime sazonal de secas, como casca cortiçosa, adaptações xeromórficas nas

folhas e uma extensa rede vertical e horizontal de raízes, por vezes com mecanismos de armazenagem de água (FURLEY, 1999).

Na verdade, discute-se que ao contrário do que ocorre com outros biomas, como os da Mata Atlântica, Caatinga ou Campos Sulinos, o clímax do Cerrado não está relacionado às condições climáticas, mas sim ao fator restritivo preponderante, que é a disponibilidade de nutrientes no solo. O clímax edáfico característico do Cerrado ocorre em locais nos quais os processos de intemperização do solo foram mais intensos (EITEN, 1972; RIBEIRO; WALTER, 1998). Geralmente, esses locais são topos de chapada com formações geológicas bastante antigas, em que os argilominerais do tipo montemorilonita sofreram alterações, evoluindo para argilominerais como a caulinita e sesquióxidos de ferro e alumínio, cuja capacidade de retenção de íons é menor (EITEN, 1993).

As espécies de plantas do bioma possuem mecanismos metabólicos adaptativos às restrições de nutrientes dos solos. De modo geral, os solos são profundos e porosos, com exceção de locais com declividade acentuada ou de afloramentos, onde se encontram solos rasos e incipientes. São, em geral, distróficos e ácidos e possuem altos níveis de saturação em alumínio, que pode atrapalhar a fosforilação, reduzindo a quantidade de Ca e P disponível para as plantas (FURLEY, 1999).

Grande quantidade das espécies de plantas do cerrado apresenta adaptações de defesa contra o fogo (RATTER et al, 1997). Algumas delas são inclusive dependentes de eventos de incêndio para completar ciclos reprodutivos. Antigos registros de incêndios naturais causados por raios, com idade da ordem de 32.000 anos, demonstram que os incêndios fazem parte do ciclo natural do bioma. No entanto, atualmente o fogo é causado numa frequência muito maior que a natural e está relacionado às atividades antrópicas ligadas à agropecuária (MIRANDA et al., 2002).

O impacto causado por um incêndio varia de acordo com a fitofisionomia da vegetação, a intensidade do fogo e a duração do evento. No curto prazo, os indivíduos lenhosos predominam sobre os herbáceos no pós-fogo, por possuírem estruturas mais resistente. Porém, como a recuperação do estrato herbáceo é muito mais acelerada, as formações do cerrado em que este grupo predomina tendem a avançar sobre as formações com mais material lenhoso.

Esta tendência é intensificada quando há reincidência de incêndios num mesmo local ao longo dos anos (RATTER et al, 1997; MIRANDA et al, 2002; FURLEY, 1999).

3.1.5. Fitofisionomias do cerrado

A vegetação do bioma Cerrado é composta por fitofisionomias que incluem formações florestais, savânicas e campestres. As formações florestais representam áreas com a predominância de espécies arbóreas e formação de um dossel contínuo ou descontínuo. As formações savânicas possuem árvores e arbustos espalhados sobre um estrato de gramíneas, sem a formação de dossel contínuo. Já as formações campestres caracterizam as áreas dominadas por espécies herbáceas e arbustivas, predominantemente gramíneas, em que as árvores quase não aparecem ou são ausentes (RIBEIRO; WALTER, 2001).

O dossel florestal contínuo pode ocorrer nas cabeceiras de drenagem, onde a disponibilidade de água possibilita que as plantas permaneçam fotossinteticamente ativas ao longo de todo o ano. A fisionomia existente nessas condições é conhecida como *mata de galeria*. A mata de galeria acompanha as margens dos rios de pequeno porte dentro do bioma. Quando a formação florestal margeia um rio mais caudaloso, que não permite que os dosséis de uma margem e outra se toquem, ela é denominada *mata ciliar*. Ao contrário da mata de galeria, a mata ciliar apresenta caducifolia no período seco. As fisionomias florestais de interflúvio podem ser denominadas de *matas secas*, quando ocorrem em solos desenvolvidos sobre rochas básicas de alta fertilidade ou sobre calcários. As matas secas apresentam diversos níveis de perda de folhagens na época da estiagem. O *cerradão*, por sua vez, desenvolve-se geralmente sobre terrenos de solos típicos do bioma do cerrado. É uma fisionomia florestal, apesar de composta em sua maioria por espécies savânicas. Assim com as matas secas e as matas de galeria, o cerradão pode apresentar dossel contínuo (RIBEIRO; WALTER, 1998).

A densidade do estrato aéreo define as fisionomias das formações savânicas (EITEN, 1972). A mais densa, com cobertura de dossel acima de 15%, freqüentemente entre 20 e 30%, é a do *cerrado sentido restrito*, com árvores retorcidas de altura mediana, podendo haver um estrato arbustivo

denso acompanhando o arbóreo (FURLEY, 1999). Esta é a fisionomia predominante no interior do Parque Nacional (IBAMA; PROAVES, 1998). À medida em que as árvores se tornam mais esparsas, com cobertura de dossel entre 2 e 15%, a fitofisionomia passa a ser denominada de *cerrado ralo* ou *campo cerrado*. As formações de savana ocorrem geralmente em terrenos bem drenados de interflúvio, onde grande parte da mineralogia primária já foi retirada do perfil do solo (FURLEY, 1999).

A presença de arboretos e arbustos emergentes bastante esparsos, em menos de 2% da cobertura da área, caracteriza o *campo sujo de cerrado*. O domínio do estrato herbáceo no terreno, com indivíduos emergentes quase inexistentes, marca o *campo limpo*, que é a fitofisionomia que possui a menor quantidade de biomassa no bioma (COUTINHO, 1990).

O bioma apresenta ainda outras fitofisionomias relacionadas às condições do solo: onde há deficiência na drenagem do perfil surgem fisionomias como as *veredas*, os *parques de cerrado*, os *campos de murunduns* e os *palmeirais*; onde há predomínio de rochas e o solo é quase ou totalmente inexistente surgem os *campos* e *cerrados rupestres* (RIBEIRO; WALTER, 1998; FURLEY, 1999).

3.1.6. Atividades antrópicas

A ocupação do Cerrado por atividades agrícolas foi bastante intensa nos últimos trinta anos (AB'SÁBER, 2003; JEPSON, 2005; RATTER et al., 1997). Neste bioma, o desmatamento da vegetação nativa e o avanço das lavouras mecanizadas podem causar impactos nas condições hidrogeomorfológicas das vertentes e dos fundos de vale, o que deixa o solo mais susceptível a eventos erosivos e com menos água em seu perfil (BACCARO, 1999). De fato, Spera et al. (2003) atestam a ocupação indevida de nascentes e várzeas da bacia hidrográfica do Rio Jardim, DF, na área *core* do bioma do Cerrado, comprometendo a existência dos mananciais e conseqüentemente da agricultura irrigada.

As queimadas, conforme citado anteriormente, também afetam os cerrados (MOREIRA, 2000). Os ecossistemas deste bioma são adaptados à presença do fogo, mas a repetição de eventos de fogo numa mesma localidade tem causado uma diminuição a densidade plantas lenhosas e ameaçando a

biodiversidade vegetal do cerrado como um todo (CASTRO; KAUFFMAN, 1998). A substituição da vegetação do cerrado por áreas de plantio tem facilitado a penetração de atividades agrícolas na floresta amazônica, uma vez que é na zona de transição entre os dois biomas que o processo de desmatamento é mais intenso (FEARNSIDE, 2001).

3.2. Imagens de satélite

Quatro imagens do sensor TM, satélite Landsat 5, foram obtidas do catálogo disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. A primeira delas foi gerada pelo sensor na estação chuvosa, em 9 de março de 2008. As outras três imagens foram geradas pelo sensor durante o período seco, em 12 de maio, 28 de maio e 13 de junho de 2008. Todas as imagens foram pré-processadas para em seguida serem utilizadas na aplicação dos algoritmos de classificação da vegetação. As imagens TM Landsat 5 possuem resolução espacial de 30 m e resolução radiométrica de 8 bits. As bandas de imageamento desta imagem estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Bandas de imageamento do sensor TM do satélite Landsat 5. Adaptado de NASA, 2008.

Nº da banda	Intervalo espectral (μm)
1	0,45—0,52
2	0,52—0,60
3	0,63—0,69
4	0,76—0,90
5	1,55—1,75
6	10,4—12,5
7	2,08—2,35

Um mosaico obtido junto à equipe do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, formado por doze imagens do satélite IKONOS e por três imagens do satélite QUICKBIRD, foi utilizado para validar os resultados obtidos com as imagens Landsat. As imagens IKONOS utilizadas neste mosaico possuem resolução espacial de 1 m, resolução radiométrica de 11 bits e foram geradas entre junho e julho de 2003. As imagens QUICKBIRD, por sua vez, possuem resolução espacial de 0,60 m, resolução radiométrica de 11 bits e foram geradas na passagem de 11 de junho de 2003.

O mosaico de imagens *Landsat Geocover S-23-15_2000*, disponibilizada pela NASA (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>) e criado a partir de imagens com datas próximas ao ano de 2000 foi utilizado como base cartográfica de referência para as imagens Landsat.

3.3. Metodologia

3.3.1. Pré-processamento

A recuperação dos valores de reflectância de uma imagem é realizada para que sejam corrigidas certas variações inerentes ao momento em que a imagem é gerada. O posicionamento do sistema sensor em relação ao alvo e ao sol muda ao longo do ano, de modo que os valores dos números digitais se modificam sem que haja qualquer alteração nos alvos (CARVALHO et al., 2003; CHANDER; MARKHAM, 2003). A transformação dos números digitais da imagem TM Landsat em valores de reflectância é feita em duas etapas no software ENVI: na primeira, os números digitais da imagem são convertidos para os valores de radiância, para, em seguida, serem convertidos para valores de reflectância.

Após a conversão dos números digitais para valores de reflectância, as imagens TM Landsat foram registradas no Sistema de Coordenadas UTM, datum WGS-84, fuso 23, utilizando as coordenadas presentes no mosaico *Landsat Geocover*.

Por fim, cada imagem foi reduzida para as dimensões da área de interesse e em seguida uma máscara foi aplicada para recortar a imagem de acordo com o perímetro do Parque Nacional (Fig. 8–11).

3.3.2. Algoritmo de análise combinatória

O algoritmo proposto por Carvalho Júnior et al. (2001a) tem como objetivo identificar as características específicas de cada alvo imageado utilizando todas as informações disponíveis ao longo do espectro. Para tanto, o programa verificou as combinações possíveis de subida e descida de banda para banda entre as bandas 3, 4 e 5, como demonstra a Fig. 12.

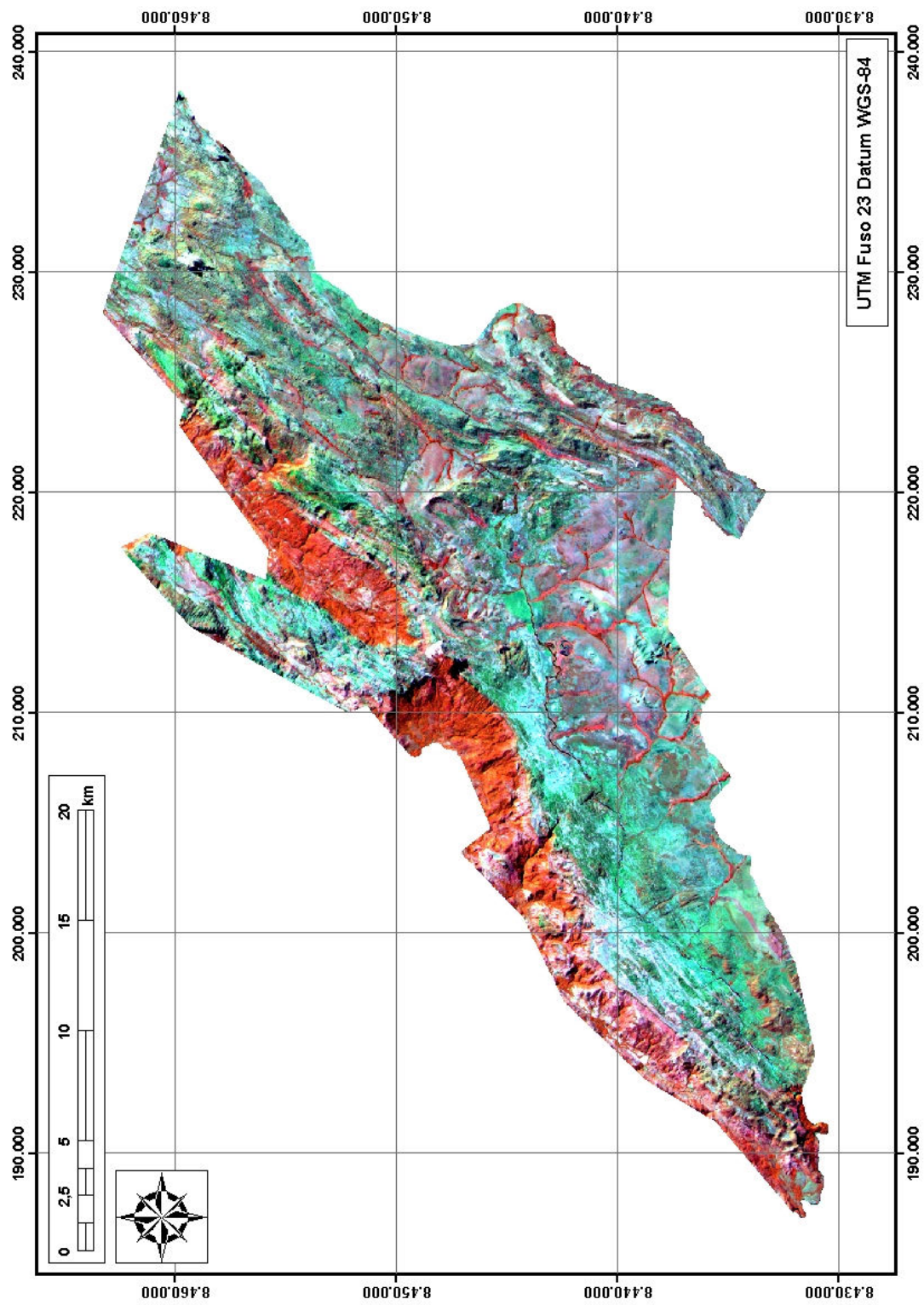


Figura 8: Imagem TM Landsat-5 da Chapada dos Veadeiros de 13/jun/2008. Composição colorida com as bandas 4 (R), 5 (G) e 3 (B).

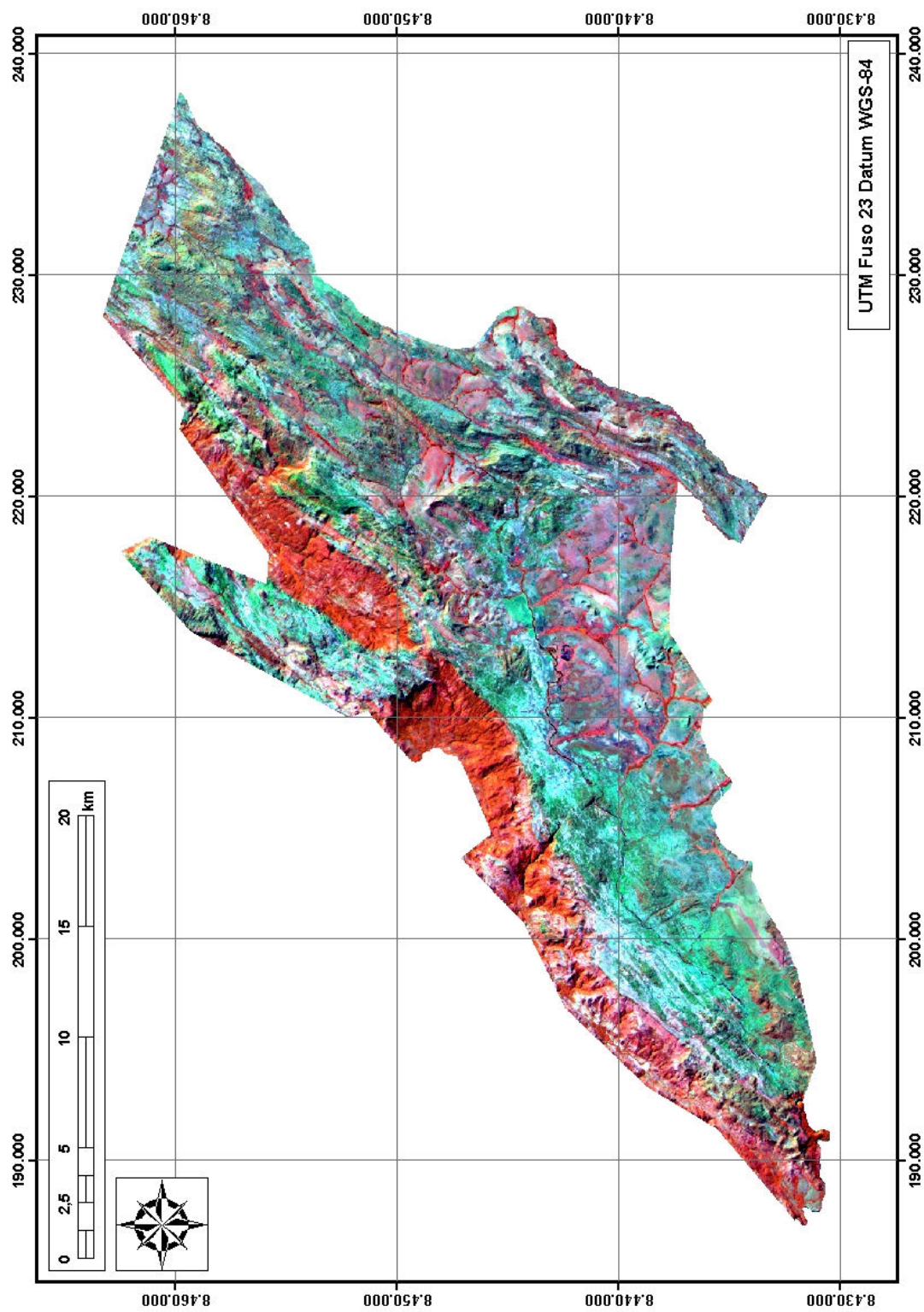


Figura 9: Imagem TM Landsat-5 da Chapada dos Veadeiros de 28/mai/2008. Composição colorida com as bandas 4 (R), 5 (G) e 3 (B).

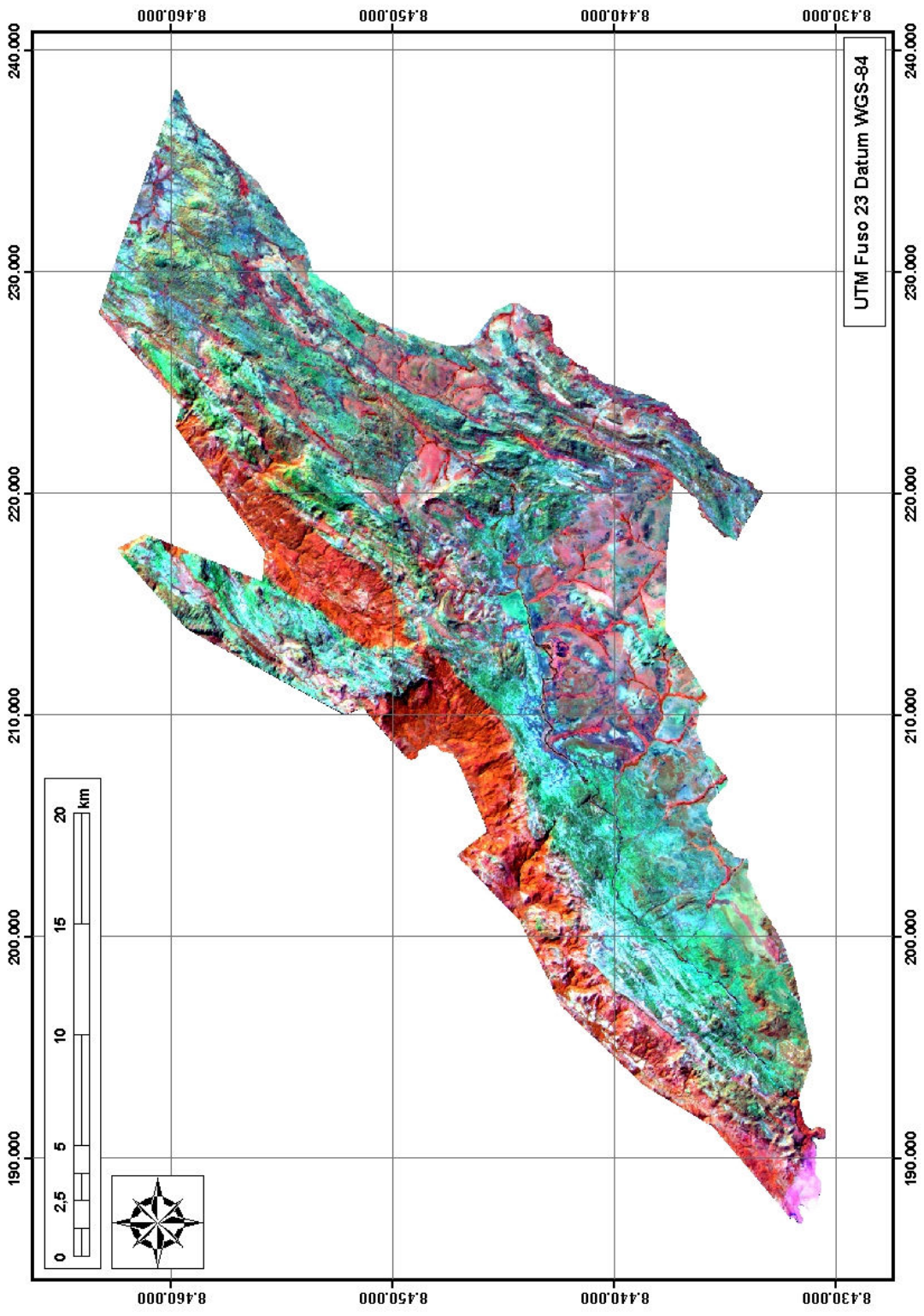


Figura 10: Imagem TM Landsat-5 da Chapada dos Veadeiros de 05/mai/2008. Composição colorida com as bandas 4 (R), 5 (G) e 3 (B).

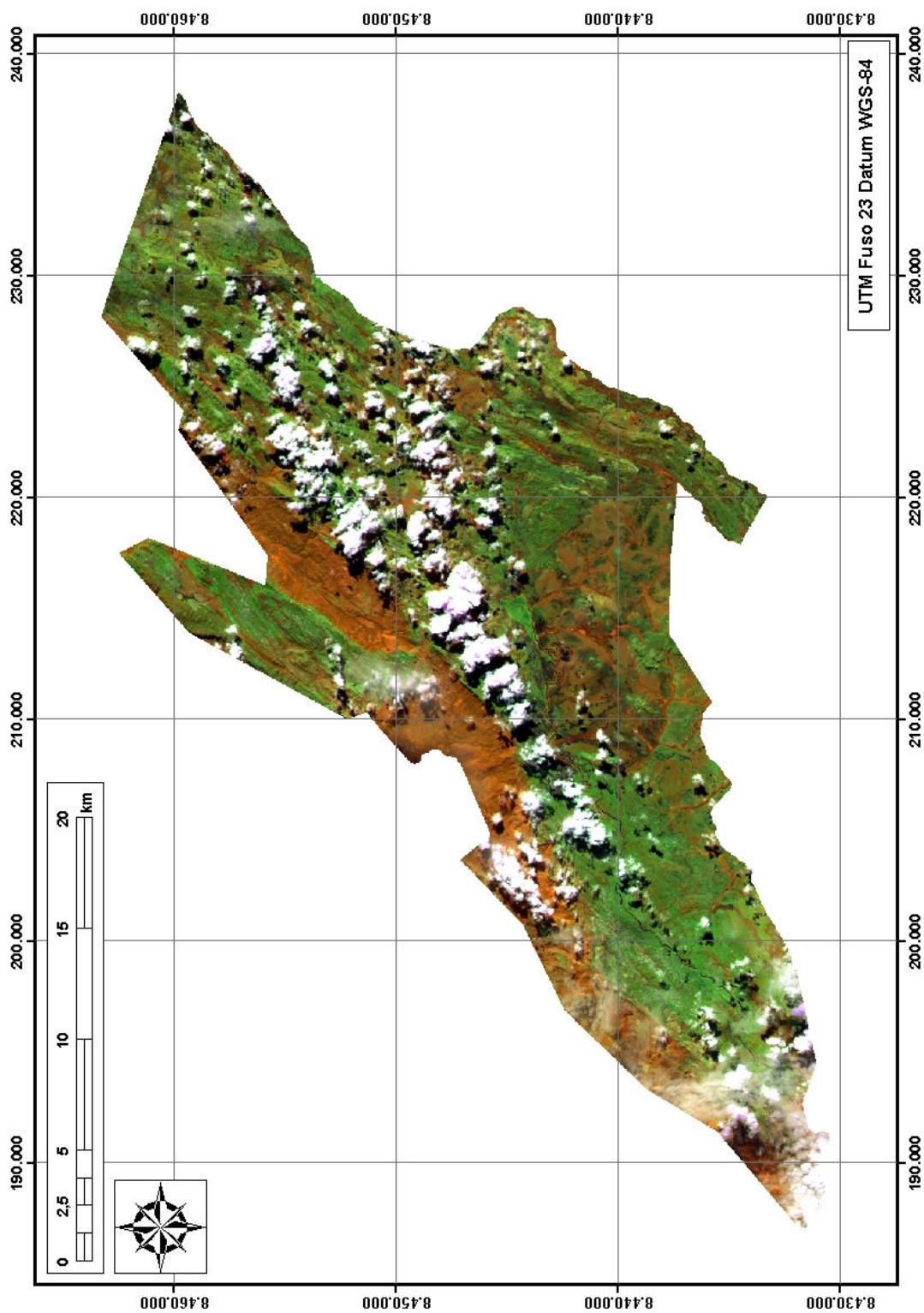


Figura 11: Imagem TM Landsat-5 da Chapada dos Veadeiros de 09/mar/2008. Composição colorida com as bandas 4 (R), 5 (G) e 3 (B).

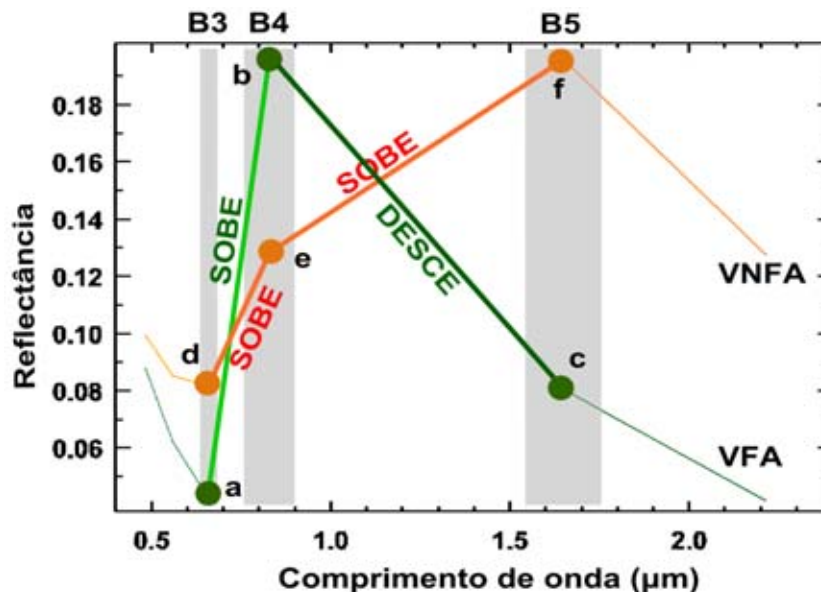


Figura 12: Exemplo de combinações de subida e descida para dois espectros diferentes. Nos espectros de VFA e VNFA, a reflectância sobe de **a** para **b** e de **d** para **e**, respectivamente. Nesse caso, os dois espectros estariam na mesma classe, se apenas essas primeiras bandas fossem levadas em consideração. Porém, os dois se diferenciam na banda seguinte, quando o espectro desce de **b** para **c** para o espectro de VFA enquanto o valor sobe de **e** para **f** para o espectro de VNFA. As faixas cinza correspondem às bandas TM 3, 4 e 5.

O comportamento da curva foi então avaliado e identificado com um valor específico. A avaliação foi realizada por meio da definição de um valor crescente para cada variação entre as bandas (Δ_{banda}). Partindo disto, podemos assumir o valor igual a 1 entre as bandas a e b ($\Delta_{banda\ a-b}$) e igual a 2 entre as bandas b e c ($\Delta_{banda\ b-c}$) e assim sucessivamente. No caso de eventos positivos, o valor é colocado na fórmula da Equação (4), definindo um valor único para cada tipo de curva:

$$Grupo_{(ij)} = \sum 2^{\Delta_{banda}} \quad (4)$$

3.3.3. Filtros adaptativos

A partir da análise combinatória, diferentes grupos espectrais foram estabelecidos para caracterizar os materiais imageados. Os grupos foram aglutinados de acordo com as variações das bandas do vermelho, NIR e SWIR. Foi possível diferenciar três grupos principais: o primeiro grupo foi o de vegetação fotossinteticamente ativa (VFA), o segundo, de vegetação não

fotossinteticamente ativa (VNFA) e um terceiro grupo com alvos não classificados, como nuvens, sombra e água. Os dois grupos analisados continham populações de espectros bastante semelhantes entre si, mas com diferenças pronunciadas na profundidade das bandas de absorção do infravermelho próximo e, em menor grau, do vermelho.

O grupo dos espectros de VNFA apresentou espectros com diferenças bem marcadas nos valores de reflectância da banda do infravermelho próximo. Para mapear essas diferenças, foi utilizado o índice de área foliar (Equação 5 desenvolvido por Carvalho Jr. et al., 2001a):

$$AF = [\rho_{NIR} - (\rho_{SWIR} + \rho_{Red}) / 2] / [(\rho_{SWIR} - \rho_{Red}) / 2] \quad (5)$$

em que AF significa área foliar.

O grupo VFA apresentou grande variação nos valores de reflectância da banda do infravermelho de ondas curtas, na região em que há uma forte absorção relacionadas às ligações hidroxila (O–H) presentes na água (DANK et al, 1984; CURRAN, 1989; CARVALHO JÚNIOR. et al, 2001a; ASNER 2004). Esta variação pode ser um indicativo da umidade presente na estrutura das folhas da vegetação. Além disso, foi observada uma variação relevante na banda do vermelho diretamente proporcional à que ocorre no SWIR e inversamente proporcional à variação percebida no NIR. Essa relação foi testada para as áreas de vegetação fotossinteticamente ativa nas imagens do Parque. Por meio dela, foi possível diferenciar as classes de vegetação de acordo com a formulação (6):

$$AFV = [\rho_{NIR} - (\rho_{SWIR} - \rho_{Red}) / 2] / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \quad (6)$$

em que AFV significa atividade fotossintética da vegetação.

3.3.4. Definição das classes e comparação entre as imagens

Após a aplicação dos índices, todas as imagens foram classificadas utilizando valores de corte estabelecidos de acordo com a vegetação visualizada em imagens IKONOS do Parque. Ao todo, oito classes foram discriminadas: quatro de VNFA e outras quatro de VFA. Para cada uma das classes de VNFA foi atribuído um intervalo de valores no índice (5), da mesma forma que cada classe de VFA estava relacionada a um intervalo de valores do

índice (6). Os valores de limite em cada classe foram mantidos constantes em todas as imagens processadas.

4. Resultados e discussão

Como resultado da primeira etapa do processamento, decorrente da aplicação da equação (4), foram geradas imagens com grupos separados de acordo com as seqüências de subida e descida de banda para banda nos espectros dos alvos. A quantidade de grupos em cada imagem variou de 15, para a imagem de 5/5/2008, a 27 grupos, para a imagem de 9/3/2008. Para cada grupo foi estimada a média do valor de reflectância por banda em todo o espectro (Fig. 13). Com isso, foi possível reunir os grupos semelhantes em agrupamentos maiores, de modo que os espectros de VFA foram separados dos espectros de VNFA e dos espectros de outras categorias com menor peso na imagem.

Os reagrupamentos de VFA e VNFA apresentaram muitas variações nos espectros de seus membros. Estas variações foram aproveitadas nos índices (5) e (6) para delimitar as classes de vegetação dentro de cada um desses agrupamentos. As fitofisionomias de mata de galeria e mata ciliar se destacaram no índice aplicado à VFA, apresentando valores bem mais altos que as demais fitofisionomias (Fig. 14 e 15). Por meio do índice AFV foi possível identificar uma área com formação florestal nas encostas da chapada, localizadas ao norte, noroeste e oeste do parque nacional. Também foi possível verificar a ocorrência de campos úmidos, especialmente na região sul do Parque Nacional. Os campos surgiram como extensas áreas com valores que variam de acordo com a distância do talvegue. Esta variação, de acordo com observações nas imagens de alta resolução, parece estar relacionada a fatores como umidade da vegetação, densidade da cobertura vegetal, exposição e ausência de umidade do solo.

As Figuras 16 e 17 apresentam o resultado da aplicação da Equação 5 sobre as imagens das áreas consideradas como de VNFA. As variações neste índice demonstram ter relações com a exposição do substrato rochoso ou do solo, sua composição e a ausência de umidade.

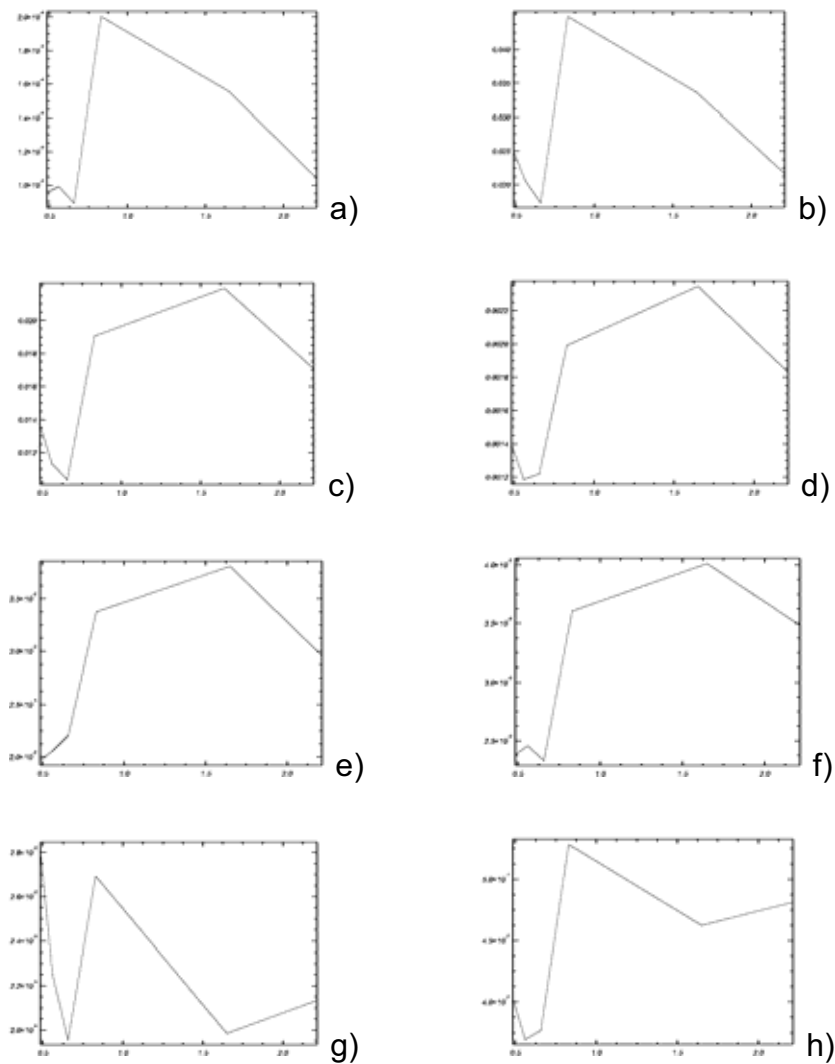


Figura 13: Média espectral dos oito primeiros grupos discriminados na imagem de 13/jun/2008, com o Índice (4). Os grupos representados em **a** e **b** foram reagrupados como VFA, os grupos **c**, **d**, **e** e **f** foram reagrupados como VNFA, enquanto os espectros **g** e **h** foram reagrupados como sombra.

Após a aplicação dos índices, os valores de separação das classes foram estimados para as imagens VFA e VNFA. A seleção dos valores foi por meio de testes, em que um intervalo de valores era determinado para que a área da imagem abrangida por esse valor fosse confrontada com a imagem de alta resolução. Caso o intervalo não correspondesse a uma categoria de vegetação observada na imagem, novos valores de corte eram selecionados para o intervalo até que a correspondência fosse estabelecida.

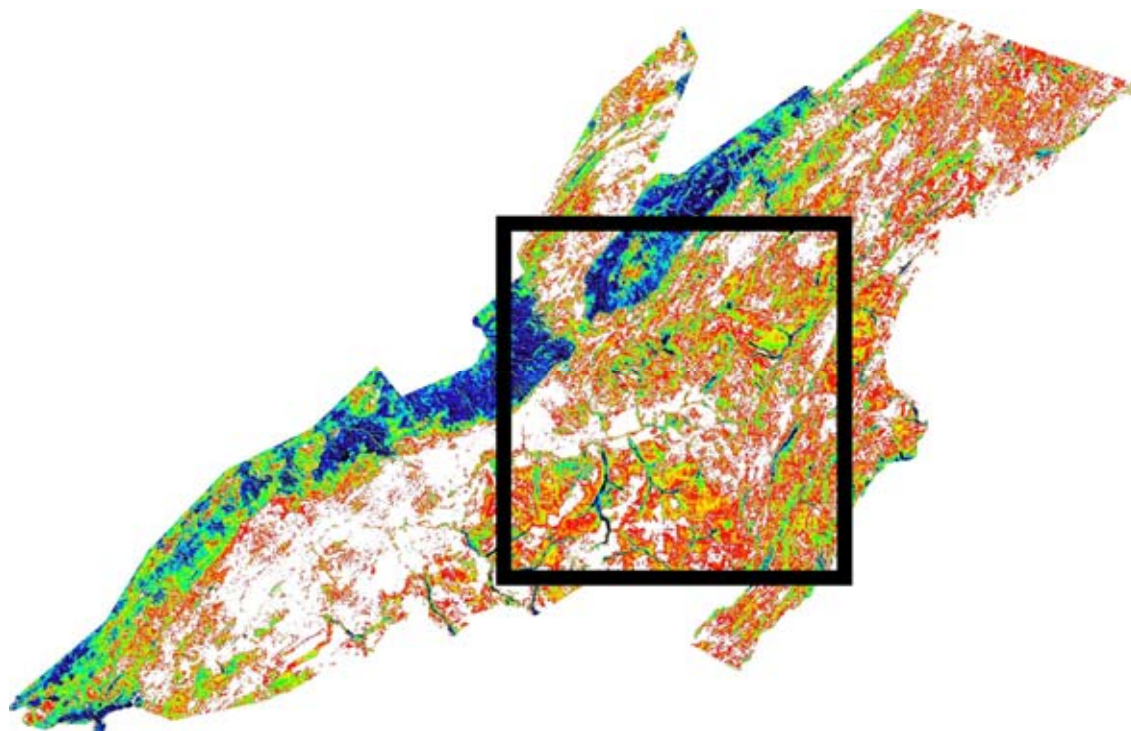


Figura 14: Índice 6 aplicado aos grupos da imagem de 13/jun/2008 considerados como VFA. O azul corresponde aos valores mais altos (formações florestais) enquanto o vermelho corresponde aos valores mais baixos.

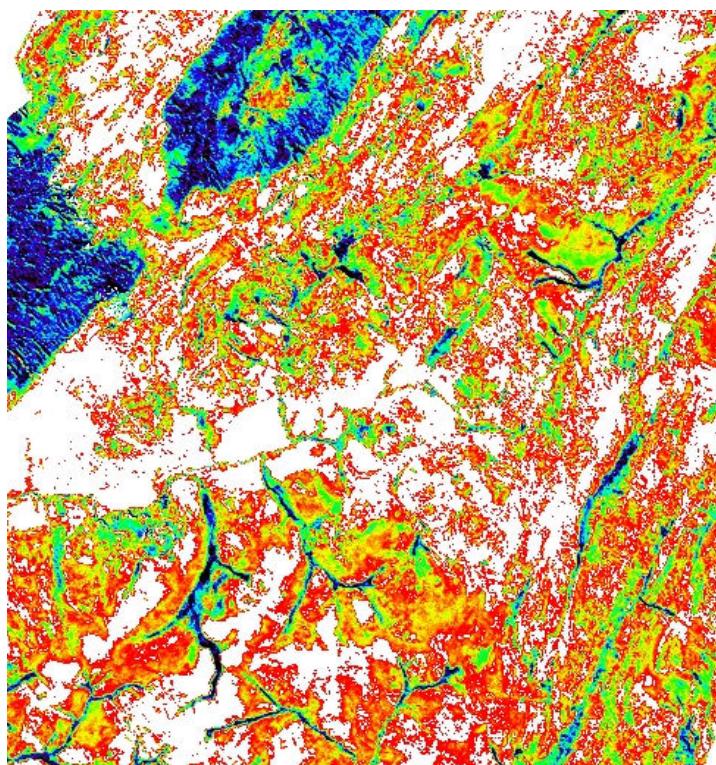


Figura 15: Detalhe da figura anterior, destacando a porção central do Parque.

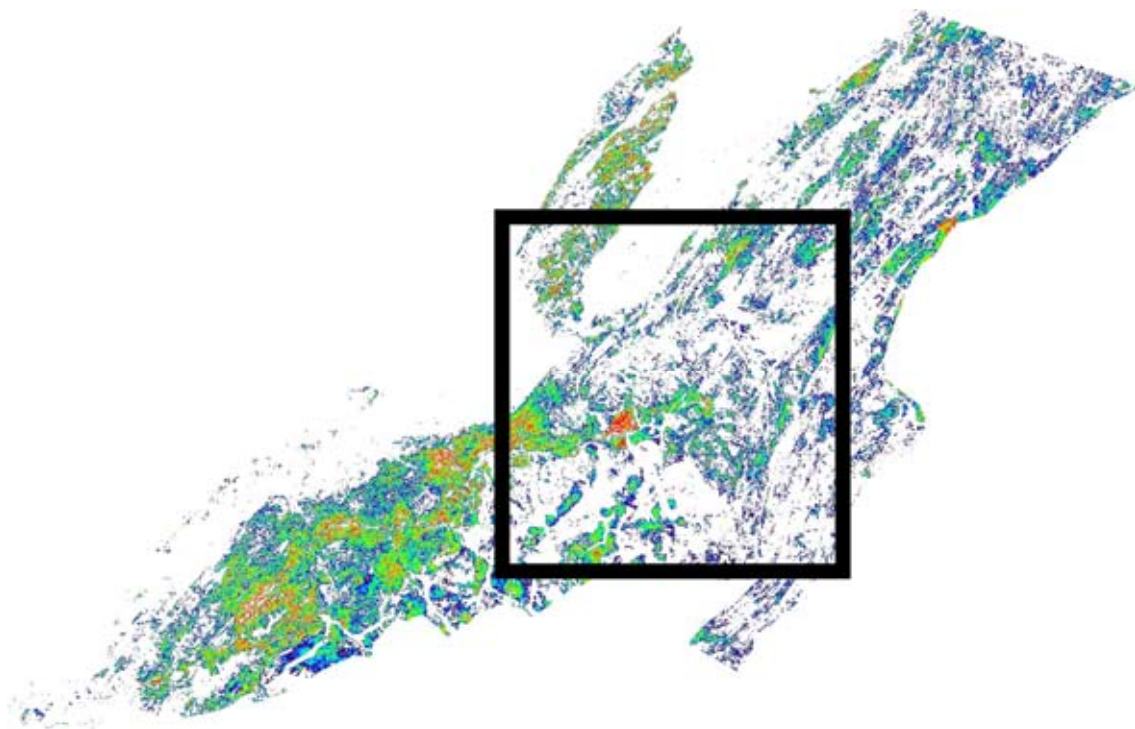


Figura 16: Índice 5 aplicado aos grupos da imagem de 13/jun/2008 considerados como VNFA. O azul corresponde aos valores mais altos enquanto o vermelho corresponde aos valores mais baixos (onde o solo fica mais exposto).

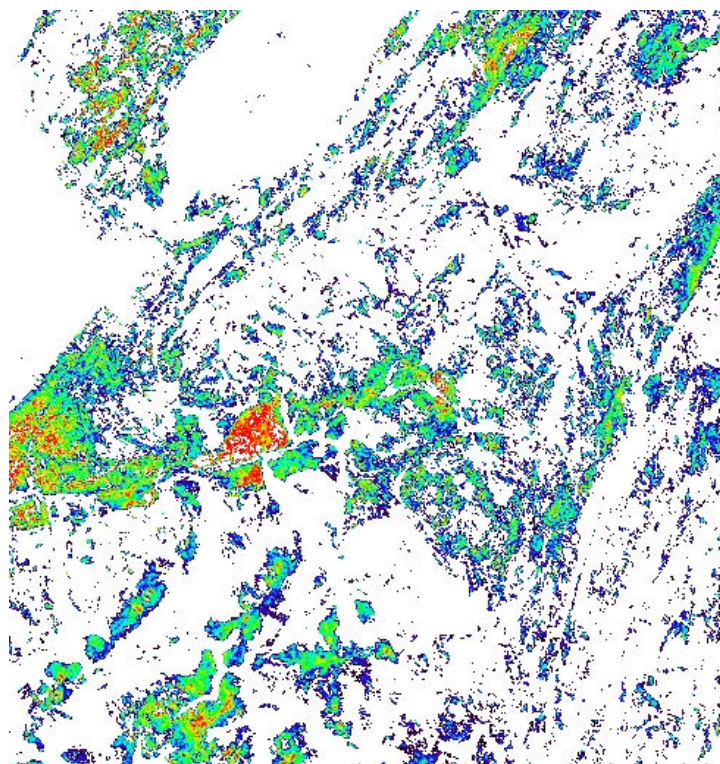


Figura 17: Detalhe da figura anterior, destacando a porção central do Parque.

A separação da classe de matas de galeria, matas ciliares e cerradões mais úmidos foi possível separando-se os valores mais altos do índice 6, como demonstra a Figura 18. Esta classe passou ser denominada como VFA 4.

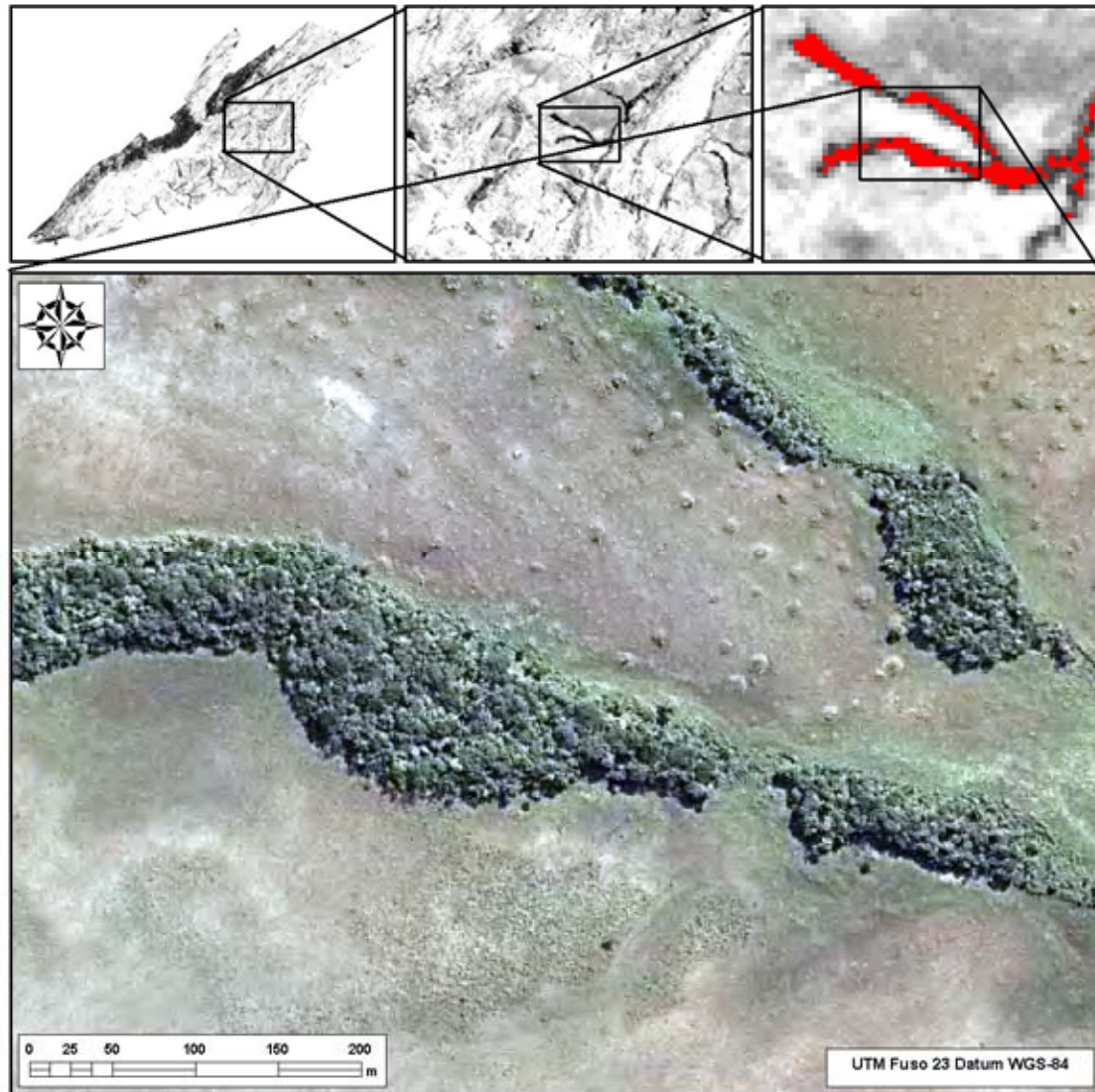


Figura 18: Discriminação da classe VFA 4 na imagem classificada com auxílio da imagem IKONOS de jun-jul/2003.

Na área das encostas localizada nas regiões norte e oeste do Parque Nacional, pôde-se discriminar a ocorrência de vegetação florestal. Ao contrário da mata de galeria, esta fisionomia não parece ter relação direta com os cursos de drenagem perenes. Esta fisionomia foi abrangida pela classe VFA 3 (Fig. 19). Na área da encosta é possível perceber que esta classe surge em locais planos, distantes das áreas mais entalhadas dos talwegues formados na orla da chapada. A área dos talwegues correspondeu à classe VFA 4, que neste caso se assemelha a um cerradão mais denso ou mesmo às matas de galeria.

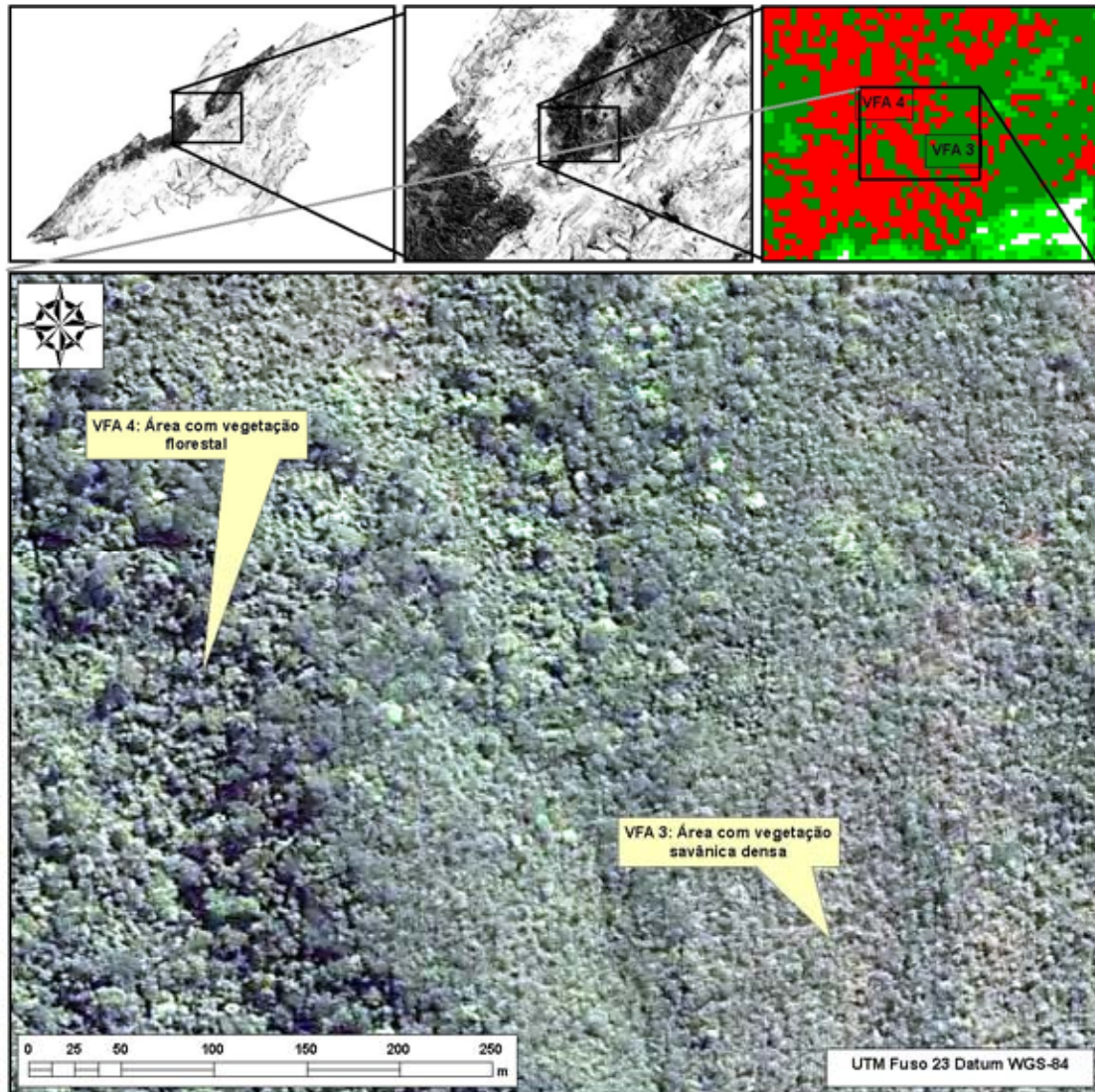


Figura 19: Discriminação da classe VFA 3 e diferenciação entre esta classe e a classe VFA 4 numa imagem IKONOS de jun-jul/2003.

Esta mesma classe, no entanto, englobou áreas de campos úmidos, em que a zona de saturação emerge à superfície, como nas veredas (Fig. 20). Essa confusão ocorreu por causa da semelhança dos valores de umidade nas duas fitofisionomias, seja na quantidade de água presente nas folhas como na água presente no solo.

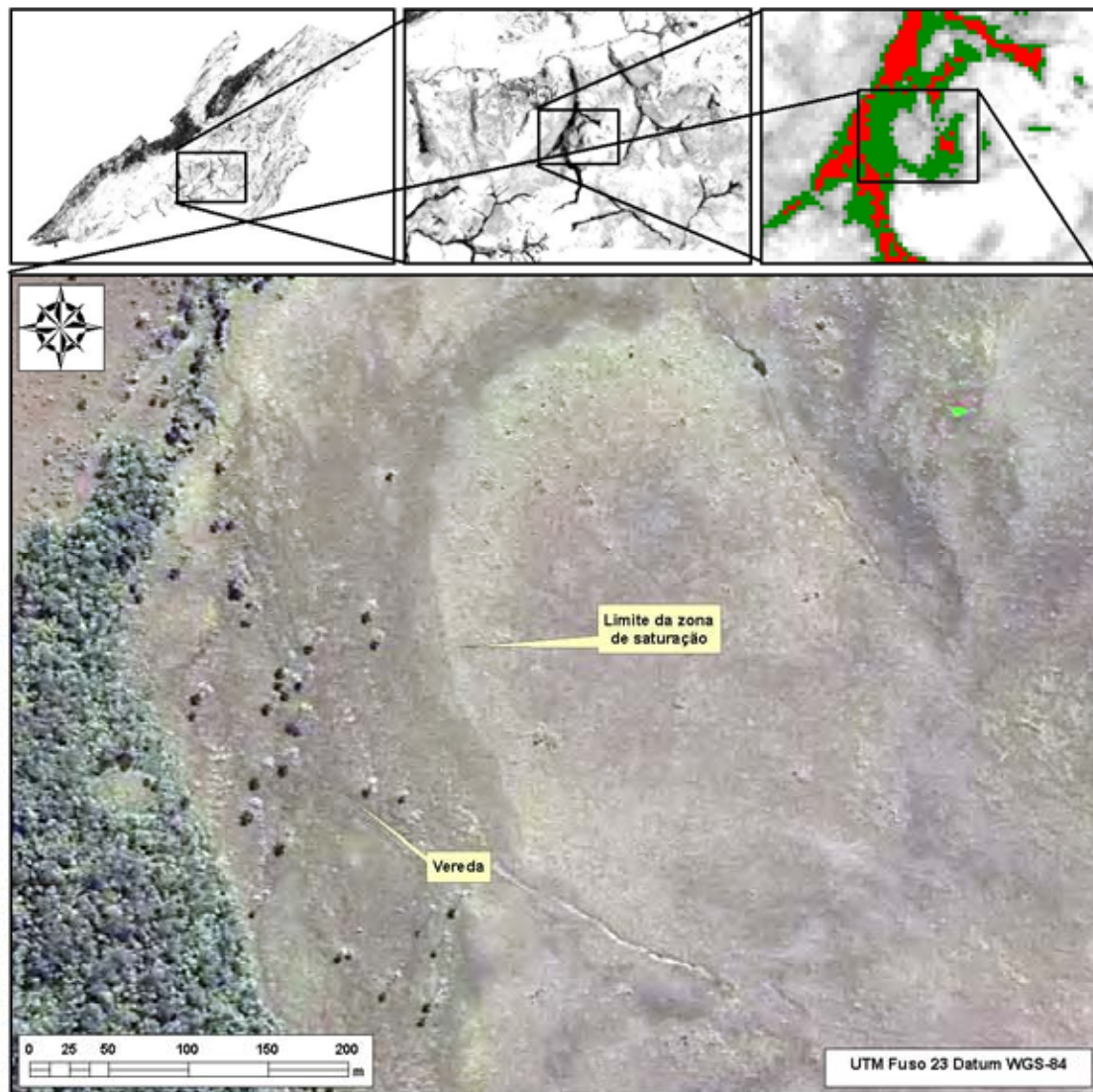


Figura 20: Classe VFA 3 englobando também a vegetação de veredas, e imagem IKONOS de jun-jul/2003 da mesma área.

As demais áreas com VFA apresentaram duas variações predominantes de vegetação: a primeira com predomínio do estrato herbáceo e graminoso, às vezes com murundus enquanto a segunda apresenta arbóreas com maior densidade de indivíduos. Estas duas classes apresentaram grande semelhança entre si e sua distribuição variou em cada imagem Landsat analisada, de modo que uma classe avança sobre a outra à medida em que há maior ou menor disponibilidade de água. As duas classes passaram a ser denominadas de VFA 1 e 2 (Fig. 21). Ao longo da série de imagens, é possível perceber que essas duas classes, junto com as áreas da classe VFA 3 relacionada às veredas, estão relacionadas à variação sazonal da altura do nível de saturação do solo.

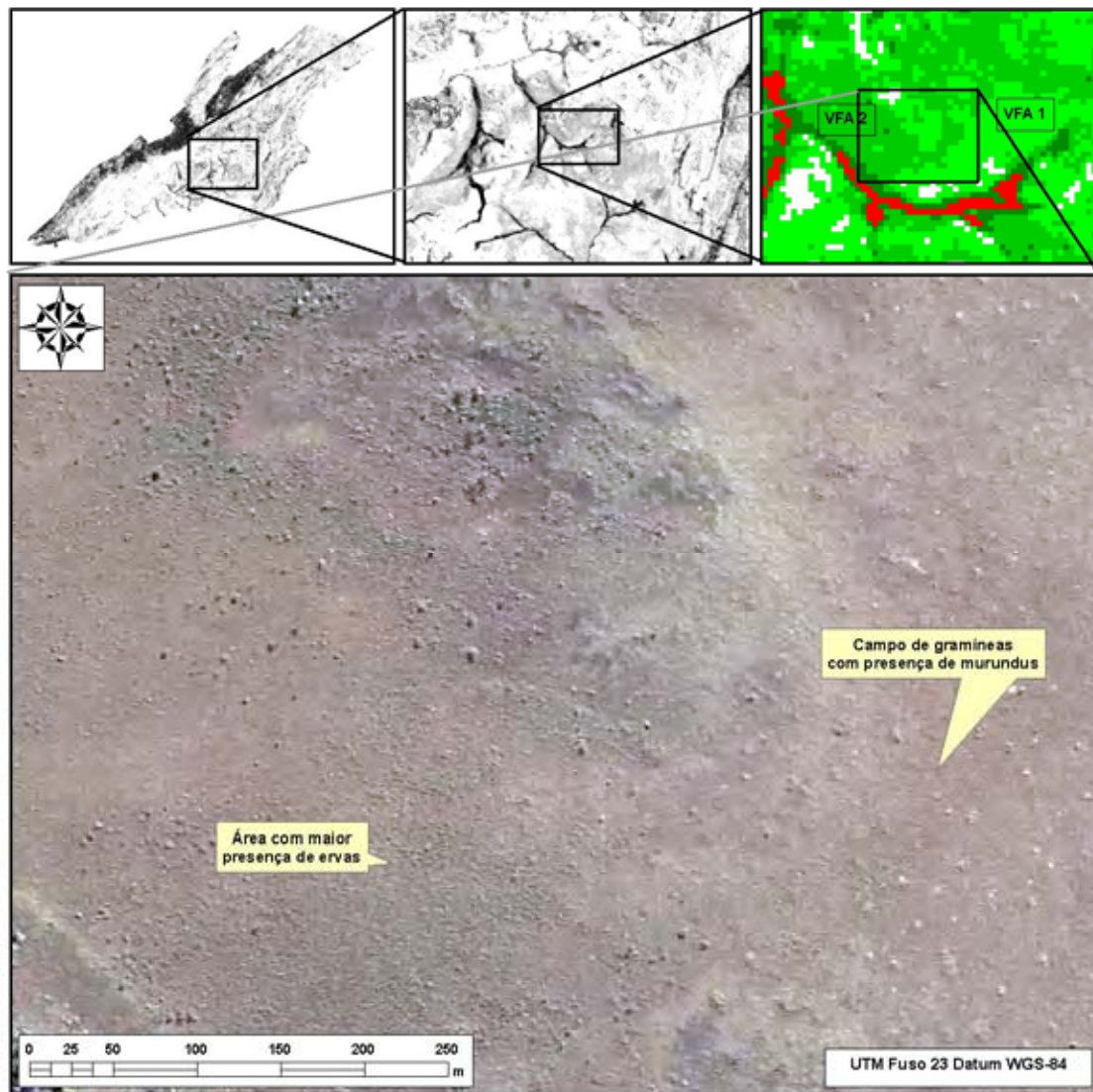


Figura 21: Discriminação das classes VFA 1 e VFA 2 na imagem IKONOS de jun-jul/2003.

A diferenciação entre as classes de VFA está ilustrada na Figura 22, que mostra que a variação entre as classes está relacionada à diferença entre a absorção da banda do vermelho ($0,66 \mu\text{m}$) e a reflectância do infravermelho próximo ($0,83 \mu\text{m}$). Esta diferença se deve à atividade fotossintética da vegetação, que diminui à medida que fatores de estresse, como a escassez de água atinge a população de vegetais. A feição de absorção da banda do infravermelho de ondas curtas, localizada em $1,65 \mu\text{m}$, relacionada à presença da água, também exerceu influência na classificação dos espectros.

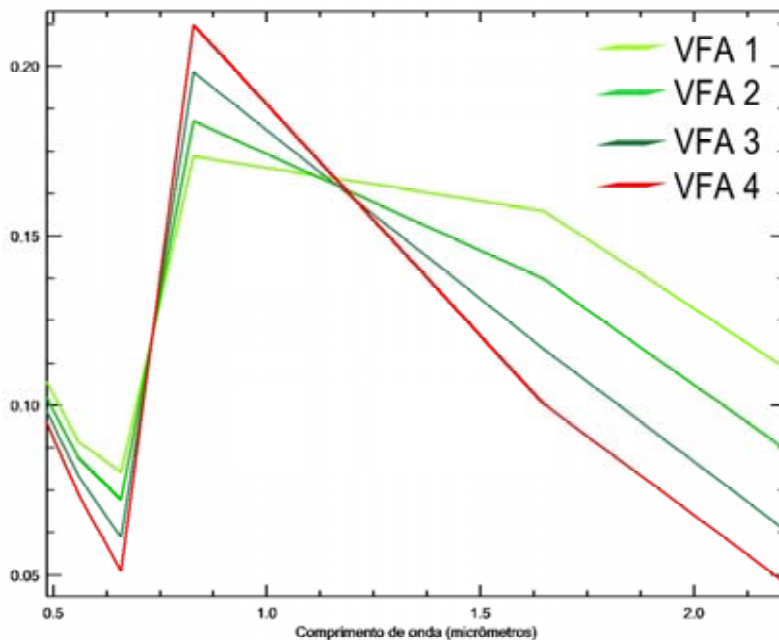


Figura 22: Média de reflectância do espectro das classes de VFA identificadas na imagem de 13/jun/2008. O VFA 4 é a classe mais fotossinteticamente ativa

A determinação das classes de vegetação para cada uma das classes VFA foi estabelecida numa segunda etapa, em que os mapas de vegetação das diferentes datas foram cruzados.

As áreas consideradas como VNFA se diferenciaram praticamente pela quantidade de vegetação, que permite uma maior ou menor exposição do solo ou do substrato rochoso. A umidade também exerceu influência sobre a diferenciação destas classes, especialmente a falta de umidade do solo.

A delimitação das classes de VNFA foi estimada pelos valores do índice 5, que avalia a área foliar da vegetação estudada. Por meio deste índice, quatro classes foram estabelecidas para analisar a imagem e verificar quais classes de vegetação poderiam ser identificadas. A delimitação das classes foi estabelecida após várias tentativas de determinar valores de corte que gerassem grupos que apresentassem distribuição espacial homogênea.

As classes delimitadas por meio desta metodologia estão representadas nas Figuras 23–26. A imagem do dia 09/03/2008 apresenta áreas não classificadas devido à presença de nuvens sobre a área do Parque.

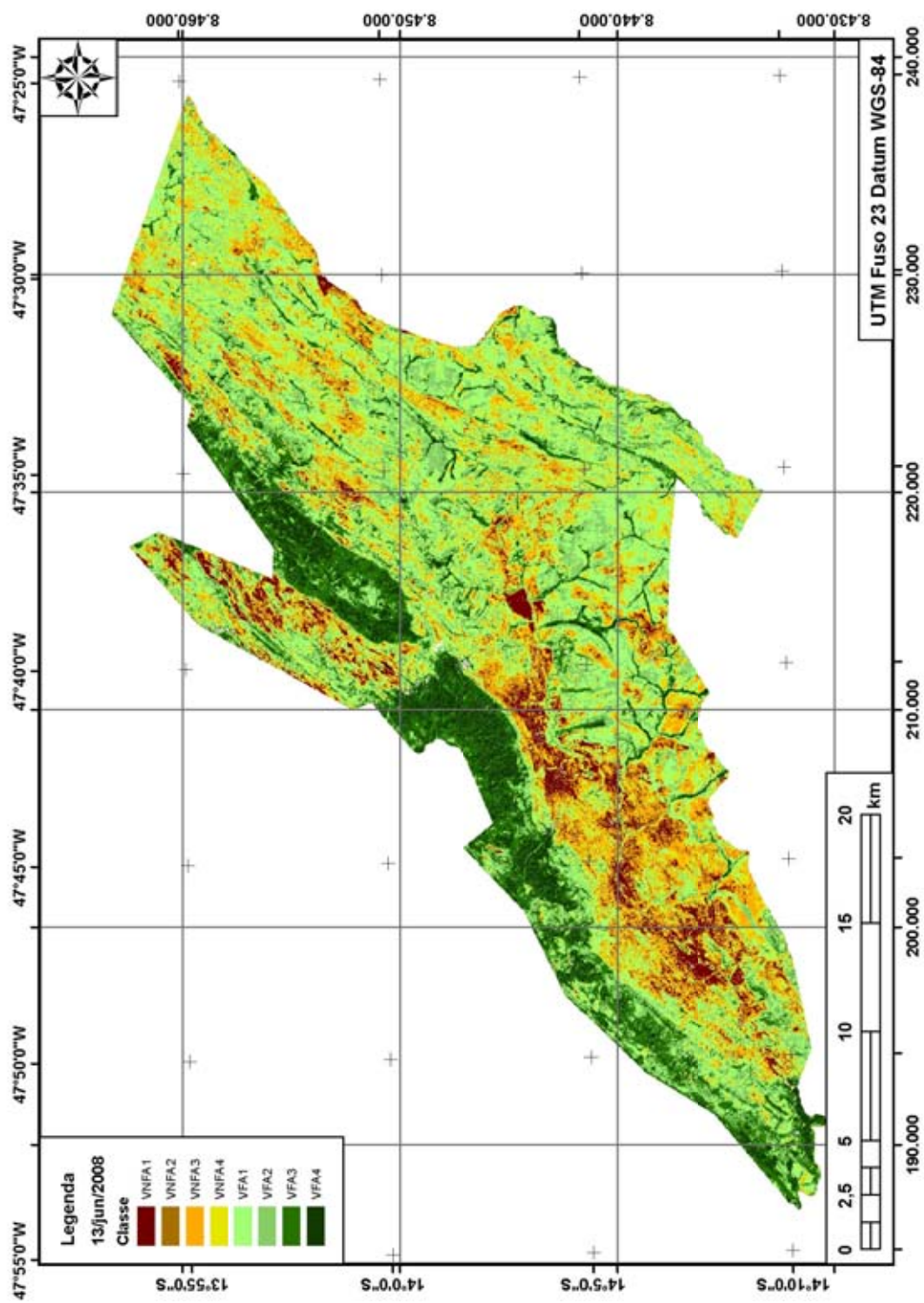


Figura 23: Mapa de classes de vegetação do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros obtido da imagem de 13/06/2008.

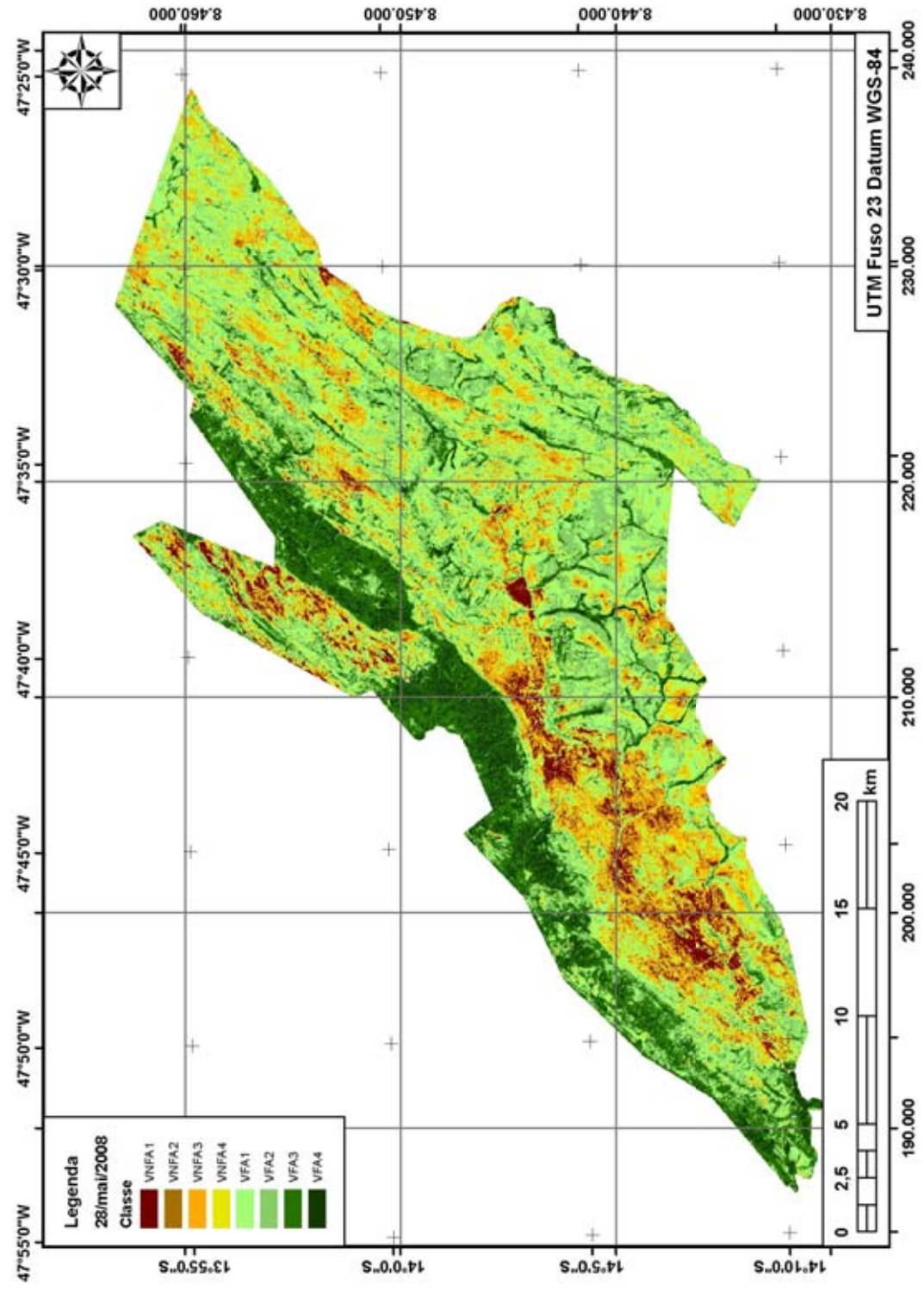


Figura 24: Mapa de classes de vegetação do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros obtido da imagem de 28/05/2008.

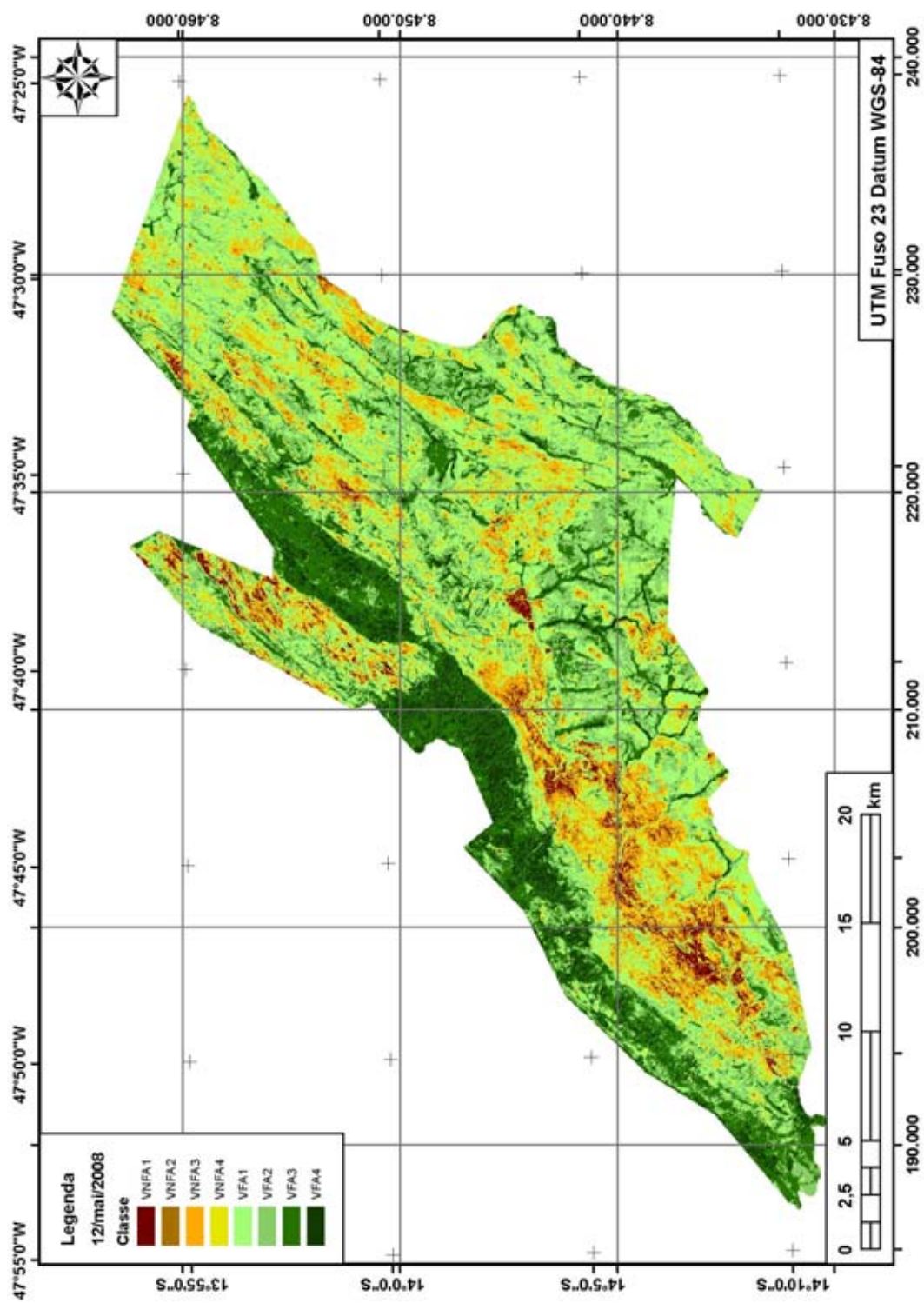


Figura 25: Mapa de classes de vegetação do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros obtido da imagem de 12/05/2008.

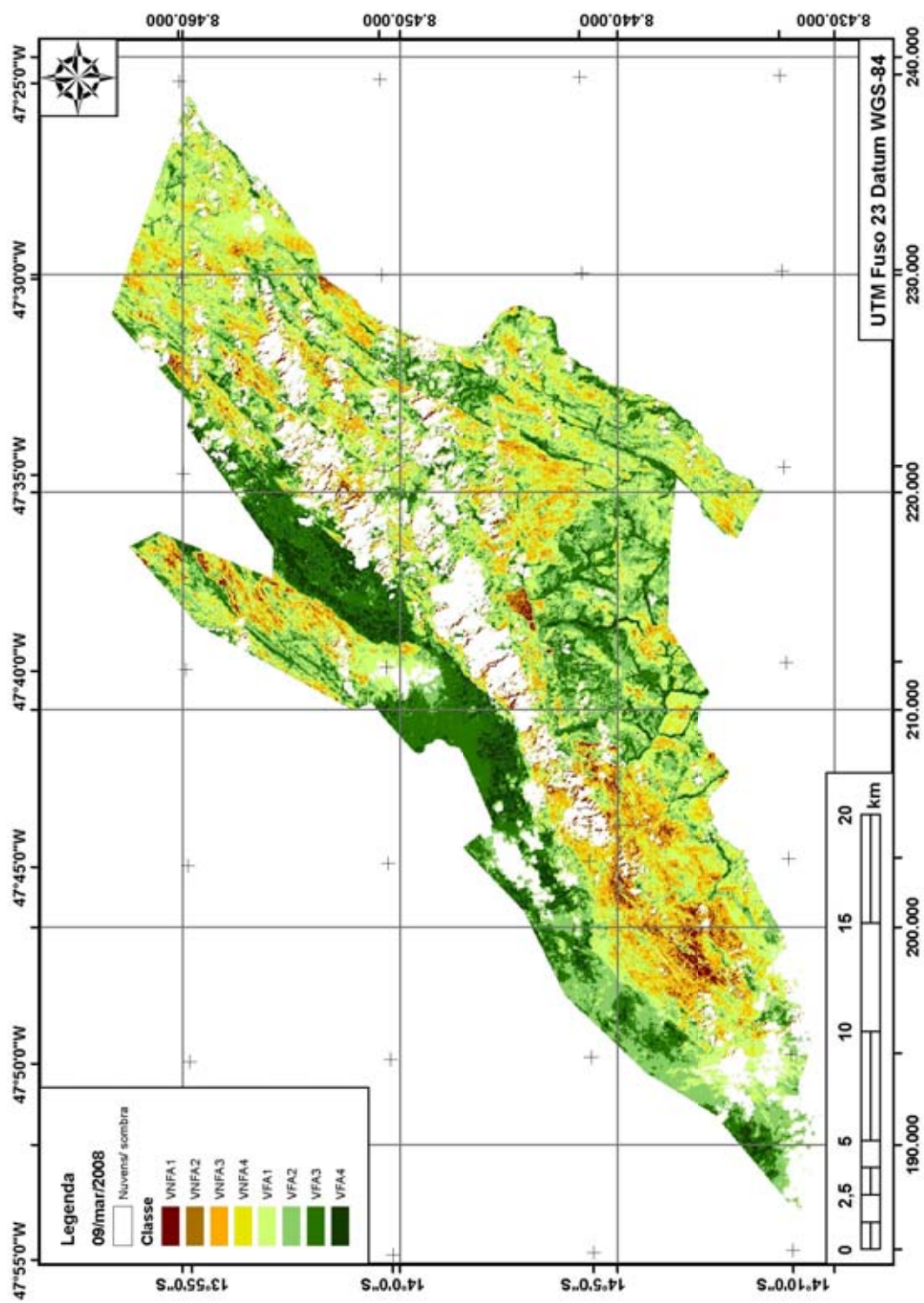


Figura 26: Mapa de classes de vegetação do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros obtido da imagem de 09/03/2008.

Com a delimitação das classes para cada ano, verificou-se que a abrangência de cada classe VNFA ou VFA apresentou modificações ao longo da série temporal, como pode ser observado na Figura 27.

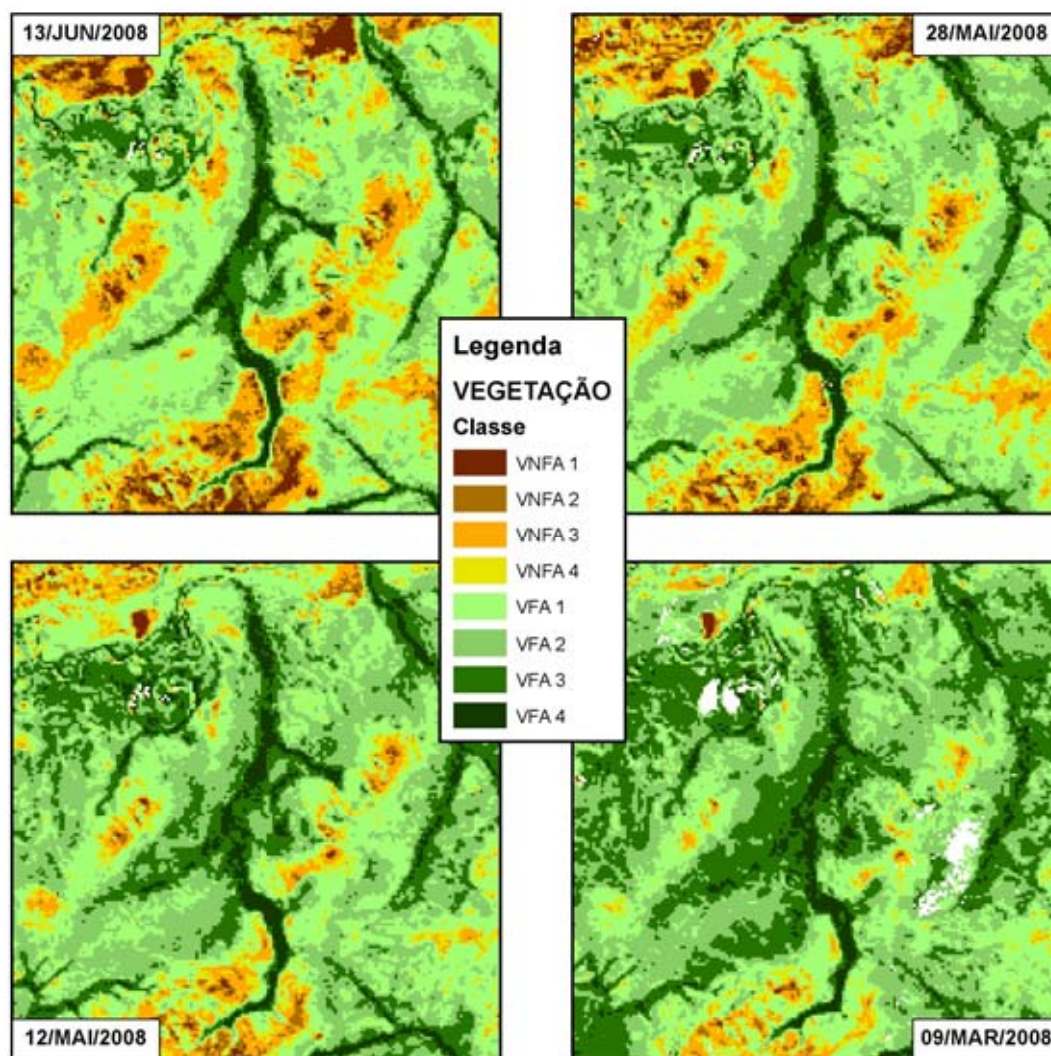


Figura 27: Variação temporal das classes de vegetação.

A partir dessas modificações foram estabelecidas as classes finais de vegetação para o Parque Nacional, utilizando duas imagens: a de 13 de junho de 2008, para representar o período seco, e a de 12 de maio de 2008, representando o período úmido. A imagem de 9 de março, gerada no meio da estação chuvosa, não foi utilizada pela quantidade de nuvens que nela recobrem a área do Parque.

A elaboração das classes finais (Fig. 28) foi realizada a partir da intersecção entre as classes de vegetação delimitadas na imagem de 12 de maio e na imagem de 13 de junho.

A primeira classe a ser diferenciada é a VFA 4, que praticamente não apresentou mudanças entre as duas datas. Ela abrange as áreas de matas de galeria e parte das matas das encostas da chapada. Na encosta, apresenta grande coincidência com as rochas da Formação Ticunzal. A classe foi denominada **Matas de galeria e de interflúvio**, por não ser possível separar as classes de mata galeria das demais formações florestais. Além disso não é possível determinar se as matas de interflúvio são matas secas ou cerradões pelas imagens IKONOS.

Em seguida, verificou-se que parte da classe VFA 3 observada na imagem da estação chuvosa foi modificada para classes mais secas ou menos densas na estação seca. As áreas que permaneceram na mesma classe foram selecionadas e agrupadas com o nome **Cerradão, mata ciliar e vereda**. As demais áreas foram classificadas de acordo com a classe em que surgiram na imagem de junho. Cabe ressaltar que o número de pixels que surgiram como VFA 3 em maio e VFA 4 em junho foi irrelevante para as dimensões da área do Parque.

As próximas três classes finais identificadas tiveram modificações significativas nos resultados apresentados nas duas imagens. Os pixels classificados em qualquer classe VNFA na imagem de maio e VFA 1 na imagem de junho foram agrupados como **Cerrado sentido restrito**. O mesmo foi feito para os pixels que em maio estavam nas classes VFA e em junho surgiram como VNFA 4. Completam esse grupo as áreas que se mantiveram como VFA 1 nas duas imagens.

Os pixels que foram classificados como VFA 2, VFA 3 e VFA 4 na imagem de maio e como VFA 1 na imagem de junho foram agrupados como **Campo úmido**. Esta classe abrangeu também algumas áreas de campo sujo, porém somente nos casos em que a zona de saturação do solo emerge à superfície, permitindo a ocorrência de murundus. Completam esta classe final todos os pixels classificados como VFA 2 na imagem de junho, independentemente da classificação obtida na imagem de maio.

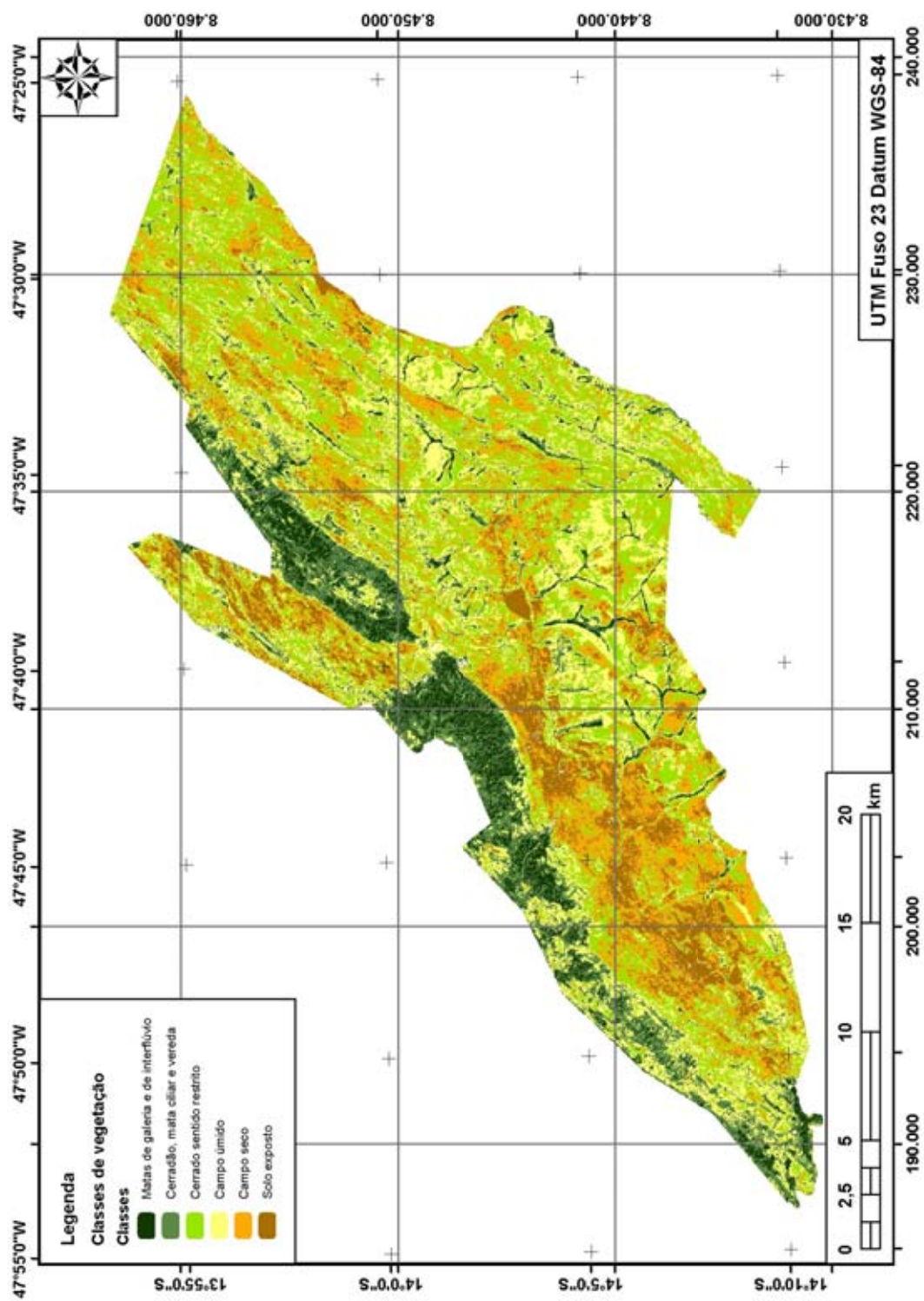


Figura 28: Classificação das fitofisionomias de cerrado no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros.

A classe final **Campo seco** abrangeu toda a área classificada como VNFA 3 na imagem de junho, independentemente da classificação na imagem de maio. Os pixels que foram classificados como VNFA 1, VNFA 2, VNFA 3 em maio e como VNFA 4 na imagem de junho foram englobados nesta classe final, junto com os pixels classificados como VNFA 4 em ambas imagens.

Por fim, os pixels classificados como VNFA 1 e VNFA 2 não agrupados nas classes anteriores não apresentaram mudanças significativas e portanto foram reunidas num único grupo. Verificou-se que a classe resultante tinha relação com áreas de solo exposto e de vegetação com baixos índices de área foliar, notadamente campos. Uma área de campo limpo bastante homogênea foi também identificada neste grupo, no centro do Parque. Apesar de apresentar vegetação de campo englobada nesta classe, este grupo foi denominado de **Solo exposto**.

Algumas áreas do Parque Nacional não foram classificadas, por causa da presença de algumas nuvens na imagem de 13 de junho de 2008. As áreas sombreadas pela topografia do terreno ou em razão da presença de nuvens, bem como alguns corpos d'água, também não foram classificados.

5. Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste trabalho percebemos que a metodologia proposta é aplicável para o mapeamento de fitofisionomias do cerrado, apesar das restrições na diferenciação de classes específicas.

A equação 4 permitiu identificar todos os alvos presentes na imagem e agrupá-los de acordo com o interesse da pesquisa. Desta forma, foi possível agrupar os espectros considerados como de vegetação fotossinteticamente ativa e separá-los dos espectros de alvos não fotossinteticamente ativos. A partir da separação destes dois grupos é que toda a metodologia de diferenciação das fitofisionomias se desenvolve.

O índice gerado para as áreas de vegetação fotossinteticamente ativa teve papel muito importante na distinção das classes finais do mapeamento. Os comprimentos de onda utilizados na elaboração do índice mostraram a sensibilidade destes para avaliar variações relacionadas às diferenças em relação à clorofila e água na região do cerrado. Além disso, o pico de reflectância na banda do infravermelho próximo, ocasionado pelo

espalhamento que a luz emitida neste comprimento de onda sofre no interior da estrutura da folha, também é levado em consideração. Estas características são muito importantes, à medida que permitem que a vegetação seja analisada por meio das feições mais marcantes que a folha sadia exerce na radiação eletromagnética.

Da mesma forma, o índice aplicado à vegetação não fotossinteticamente ativa permitiu identificar as classes de vegetação por meio da análise da área foliar da vegetação. Esta análise foi enriquecida com o cruzamento das classes de vegetação obtidas a partir de duas imagens captadas em estações distintas.

A primeira imagem foi captada no período de chuvas e a segunda, no período de seca. A diferença dos resultados obtidos com o uso dessas duas imagens possibilitou diferenciar classes de vegetação especialmente nas áreas classificadas como VFA numa das imagens e como VNFA na outra. A abordagem multitemporal permitiu identificar a variação do comportamento da vegetação de cerrado de acordo com sua principal condição natural de estresse: a seca.

Apesar dos resultados positivos, houve dificuldade em diferenciar certas fitofisionomias entre si, como cerradão e vereda ou campo sujo e cerrado ralo. Esta dificuldade pode ser parcialmente explicada pela complexidade ambiental do cerrado na área estudada e pela falta de imagens no período chuvoso com pequena quantidade de nuvens. Novas análises devem ser feitas em áreas de cerrado menos afetadas por nuvens durante os meses chuvosos e também em ambientes onde a complexidade do bioma é menos intensa.

Esta dificuldade demonstra ainda que a continuidade do projeto é necessária, para que as ferramentas utilizadas sejam aperfeiçoadas na discriminação de classes de vegetação. Melhorias na classificação podem ser alcançadas ao se utilizar índices que avaliem a atividade fotossintética, a quantidade de água na vegetação e a área foliar, simultaneamente. Com isso, a discriminação das classes de vegetação seria potencialmente intensificada pelas próprias características da resposta espectral das plantas.

Apesar dos problemas identificados na diferenciação de algumas classes entre si, os resultados alcançados foram bastante satisfatórios. As matas foram bem diferenciadas das demais fitofisionomias, com exceção da vereda e grandes áreas de campo puderam ser reconhecidas na classificação

final. A delimitação das áreas com pouca vegetação também foi muito eficiente, à medida em que as áreas rupestres foram agrupadas junto com as áreas de solo exposto. No que diz respeito à diferenciação das formações de cerrado, a metodologia aplicada demonstrou um bom desempenho. As dificuldades de separação das classes mais refinadas de fitofisionomias são comuns para qualquer tentativa de classificação automática de vegetação.

6. Referências

- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G.; NETTO, J. M. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, W. J. (Ed). **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC; São Paulo: Nobel, 1987.
- ALHO C. J. R.; MARTINS, É. de S. Bit by the cerrado loses space. **Technical Report for WWF**. Brasília: WWF, 1995.
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v.64, p. 234-253, 1998.
- ASNER, G. P. Biophysical remote sensing signatures of arid and semiarid ecosystems. In: USTIN, S. (Ed.) **Remote sensing for natural resources management and environmental monitoring: Manual of remote sensing**. New York: John Wiley & Sons, p. 53-109, 2004.
- ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T.; HATFIELD, J. L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v. 76, p. 300-306, 1984
- BACCARO, C. A. D. Processos erosivos no domínio do cerrado. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.) **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 195-228, 1999.
- BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; BAARS, F. J.; DELGADO, I. M.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G. M. M.; SANTOS, J. O. S. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas - SIG e Mapas na escala 1:2.500.000 = Geology, Tectonics and Mineral Resources of Brazil: Geographic Information System - GIS and Maps at the 1:2.500.000 scale**. Brasília : CPRM, 2001. 4 CD-ROM. Escala: 1: 2.500.000.
- CARLSON, T. N.; RIPLEY, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, p. 241-254, 1997;

CARVALHO, A. P. F.; BUSTAMANTE, M. M. da C.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Classificação de padrões de vegetação na região de transição entre o cerrado e a floresta amazônica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 11., 2003. Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2679-2687.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; ROCHA, V. M. S.; CARVALHO, A. P. F. Desenvolvimento de algoritmo para classificação de vegetação considerando o comportamento espectral das imagens Landsat 7/ETM+. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 20., 2001, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2001a. CD-ROM.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, É. S.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, A. P. F. **Compartimentação geomorfológica do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros baseada em técnicas de geoprocessamento**. Planaltina, DF: Embrapa CPAC, 2001b.

CASTRO, E. A. de; KAUFFMAN, J. B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**, n. 14, p. 263- 283, 1998.

CECCATO, P.; FLASSE, S.; GREGOIRE, J. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, p. 198-297, 2002.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, p. 2674-2677, 2003.

CHEN J. M.; CIHLAR, J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, p. 153-162, 1996.

CHEN, D.; JACKSON, T. J.; LI, F.; COSH, M. H.; WALTHALL, C.; ANDERSON, M. Estimation of vegetation water content for corn and soybeans with a Normalized Difference Water Index (NDWI) using Landsat Thematic Mapper data. INTERNATIONAL GEOSCIENCES AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2003. **Proceedings...** New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 2853-2856, 2003.

CHEN, D.; HUANG, J.; JACKSON, T. J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, p. 225-236, 2005.

CIBULA, W. G.; ZETKA, E. F.; RICKMAN, D. L. Response of thematic bands to plant water stress. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, p. 1869-1880, 1992.

CLARK, R. N.; GALLAGHER, A.; SWAYZE, G. A. Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra. In: AIRBORNE

VISIBLE/INFRARED IMAGING SPECTROMETER (AVIRIS) WORKSHOP, 2., 1990, Pasadena. **Proceedings...** Pasadena: JPL Publication 90-54, p. 35-38, 1990.

CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; KOCH, C.; AGER, C. Mapping vegetation types with the multiple spectral feature mapping algorithm in both emission and absorption. In: ANNUAL JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, 3., 1992, Pasadena. **Summaries...** Pasadena: JPL Publication 92-14, p. 60-62, 1992.

CLARK, R. N.; KING, T. V. V.; AGER, C.; SWAYZE, G. A. Initial vegetation species and senescence/stress indicator mapping in the San Luis Valley, Colorado using imaging spectrometer data. In: ANNUAL JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, 5., 1995, Pasadena. **Summaries...** Pasadena: JPL Publication 95-1, p. 35-38, 1995.

COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 3, p. 175-183, 1974.

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. In: J. G. Goldammer, **Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges**. Berlin: Springer-Verlag, p.82-103, 1990.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta Brasília: Geologia**. Brasília: CPRM, 2007. Escala: 1: 1.000.000.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, p. 271-278, 1989.

DANK, S. M.; EVANS, E. H.; WHITTAKER, P. A. **Photosynthetic Systems: structure, function and assembly**. New York: Wiley, 1984.

EITEN, G. The Cerrado vegetation of Brazil. **The Botanical Review**, v. 38, n. 2, p. 201-341, 1972.

EITEN, G. Vegetação. In: PINTO, M. N. (Org.) **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. 2. ed. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1993.

ELMORE, A. J.; MUSTARD, J. F.; MANNING, S. J.; LOBELL, D. B. Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 73, p. 87-102, 2000.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FARRAR, T. J.; NICHOLSON, S. E.; LARE, A. R. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI Response to soil moisture. **Remote sensing of Environment**, v. 50, p. 121-133, 1994.

FURLEY, P. A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. **Global Ecology and Biogeography**, n. 8, p. 223-241, 1999.

GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; GOULDEN, M. L.; GRIFFIN, K. L.; HARTLEY, A. E.; JOEL, G.; PEÑUELAS, J.; VALENTINI, R. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. **Ecological Applications**, v. 5, p. 28-41, 1995.

GAO, B.-C. Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. In: SPIE IMAGING SPECTROMETRY SYMPOSIUM, Orlando, 1995. **Proceedings...** Orlando: SPIE, v. 2480, p. 225-236, 1995.

GAO, B.-C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.

GAO, B.-C.; GOETZ, A. F.H. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 52, p. 155-162, 1995.

GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

GONG, P.; PU, R.; BIGING, G. S.; LARRIEU, M. R. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, p.1355-1362, 2003.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p. 295-309, 1988.

HUETE, A. R.; JACKSON, R. D.; POST, D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, p. 37-53, 1985.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, p. 224-234, 1994

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p.440-451, 1997.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

HUNT JR., E. R.; ROCK, B. N.; NOBEL, P. S. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 22, p. 429-435, 1987.

IBAMA / Proaves. **Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros: Plano de manejo – Fase 3 (versão preliminar)**. Brasília: Ibama / Proaves, 1998.

JACKSON, R. D. Spectral indices in N-space. **Remote Sensing of Environment**, v. 14, p. 409-421, 1983.

JACKSON, R. D.; SLATER, P. N.; PINTER JR., P. J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres, **Remote Sensing of Environment**, v. 13, p. 187-208, 1983.

JACKSON, T. J.; CHEN, D.; COSH, M.; LI, F.; ANDERSON, M.; WALTHALL, C. et al. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. **Remote sensing of Environment**, v. 92, p. 475-482, 2004.

JEPSON, W. A disappearing biome? Reconsidering land-cover change in Brazilian Savanna. **The Geographical Journal**, 171, p. 99-111, 2005.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; CHEN, J.; CHEN, Y.; LI, J.; YAN, G.; ZHANG, X. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, p. 366-378, 2006.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 2, p. 155-159, 1970.

KNYAZIKHIN, Y.; MARTONCHIK, J. V.; MYNENI, R. B.; DINER, D. J.; RUNNING, S. W. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 32257-32274, 1998.

KNYAZIKHIN, Y.; GLASSY, J.; PRIVETTE, J. L.; TIAN, Y.; LOTSCH, A.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; MORISETTE, J. T.; VOTAVA, P.; MYNENI, R. B.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. **MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm**. Theoretical Basis Document. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 1999.

LILLESAND, M. T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. Earth resource satellites operating in the optical spectrum. In: **Remote sensing and image interpretation**. 6. Ed. New York: John Wiley & Sons, p.392-481, 2008.

LIU, H. Q.; HUETE, A. R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.33, p. 457-465, 1995.

LYON, J. G.; YUAN, D.; LUNETTA, R. S.; ELVIDGE, C. D. A change detection experiment using vegetation indices. **Photogrammetry Engineering and Remote Sensing**, v. 64, p. 143-150, 1998.

MENESES, P. R. Fundamentos de radiometria óptica espectral. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO J. Da S. (Org.) **Sensoriamento remoto: reflectância**

de alvos naturais. Brasília: Editora da Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 13-40, 2001a.

MENESES, P. R. Origem das feições espectrais. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO J. Da S. (Org.) **Sensoriamento remoto**: reflectância de alvos naturais. Brasília: Editora da Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 41-60, 2001b.

MENESES, P. R.; FERREIRA JUNIOR, L. F. Comportamento espectral de minerais e rochas. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO J. Da S. (Org.) **Sensoriamento remoto**: reflectância de alvos naturais. Brasília: Editora da Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 61-123, 2001.

MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. C.; MIRANDA, A. C. The fire factor. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Ed.) **The Cerrados of Brazil**: ecology and natural history of a neotropical savanna. New York: Columbia University Press, 2002.

MME. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAM Brasil**: Mapa exploratório de solos. Escala: 1: 1.000.000. 1 mapa, 1982

MOREIRA, A. G. Effects of fire protection on savanna structure in Central Brazil. **Journal of Biogeography**, v. 27, p. 1021-1029, 2000.

MYNENI, R. B.; HOFFMAN, S.; KNYAZIKHIN, Y.; PRIVETTE, J. L.; GLASSY, J.; TIAN, Y.; WANG, Y.; SONG, X.; ZHANG, Y. SMITH, G. R.; LOTSCH, A.; FRIEDL, M.; MORISSETTE, J. T.; VOTAVA, P.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 214-231, 2002.

NASA. **Landsat 7 science data users handbook**. Online document, 2008.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto**: princípios e aplicações. 2. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 308 p., 1992.

PIMENTEL, M. M.; DARDENNE, M. A.; FUCK, R. A.; VIANA, M. G.; JUNGES, S. L.; FISCHER, D. P.; SEER, H. J.; DANTAS, E. L. Nd isotopes and the provenance of detrital sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, p. 571-585, 2001.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO J. Da S. (Org.) **Sensoriamento remoto**: reflectância de alvos naturais. Brasília: Editora da Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 157-199, 2001.

PUREVDORJ, T. S.; TATEISHI, R.; ISHIYAMA, T.; HONDA, Y. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, p. 3519-3535, 1998.

RATHER, J. A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. The Brazilian Cerrado vegetation and threats to its biodiversity. **Annals of Botany**, n. 80, p. 223-230, 1997.

- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 89-166, 1998.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As matas de galeria no contexto do bioma Cerrado. In: **Cerrado: caracterização e recuperação de matas de galeria**. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 29-47, 2001.
- RIPPLE, W. J. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, p. 1669-1675, 1986;
- ROBERTS, D. A.; GREEN, R. O.; ADAMS, J. B. Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, p. 223-240, 1997.
- RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, p.95-107, 1996.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: 3rd ERTS SYMPOSIUM. **Proceedings...**, 1973.
- SAMPAIO, C. S. **Abordagem metodológica abordada nos dados multitemporais MODIS EVI/NDVI para classificação da cobertura vegetal na região do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros / GO**. 2007. 73 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, 2007.
- SELLERS, P. J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 6, p. 1335-1372, 1985.
- SELLERS, P. J.; RANDALL, D. A.; BETTS, A. K.; HALL, F. G.; BERRY, J. A.; COLLATZ, G. J.; DENNING, A. S.; MOONEY, H. A.; NOBRE, C. A.; SATO, N.; FIELD, C.; HENDERSON-SELLERS, A. Modelling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, v. 275, p. 502-509, 1997.
- SLATER, P. N.; JACKSON, R. D. Atmospheric effect on radiation reflected from soil and vegetation as measured by orbiting sensors using various scanning directions. **Applied Optics**, v. 21, p. 3923-3931, 1982.
- SPERA, S. T.; REATTO, A.; MARTINS, É. S.; CORREIA, J. R.; BLOISE, G. L. F.; SILVA, A. V. Aptidão agrícola das terras da Bacia do Rio Jardim, DF. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003.
- STENBERG, P.; RAUTIAINEN, M.; MANNINEN, T.; VOIPIO, P.; SMOLANDER, H. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands. **Silva Fennica**, v. 38, p. 3-14, 2004.
- USTIN, S. L.; ROBERTS, D. A.; PINZON, J.; JACQUEMOUD, S.; GARDNER, M.; SCHEER, G et al. Estimation canopy water content of chaparral shrubs using optical methods. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, p. 280-291, 1997.

VALERIANO, M. M. Reflectância spectral de culturas agrícolas anuais (I): espectrorradiometria. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, p. 1-27, 2003.

WANG, X.; XIE, H.; GUAN, H.; ZHOU, X. Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. **Journal of Hydrology**, v. 340, p. 12-24, 2007.

WOOLLEY, J. T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, v. 47, p. 656-662, 1971.