

DESEMPENHO DO SATÉLITE SINO-BRASILEIRO DE RECURSOS TERRESTRES CBERS-2 NO MAPEAMENTO DA COBERTURA DA TERRA NO DISTRITO FEDERAL, BRASIL

Helena da Silva Bezerra¹, Edson Eyji Sano² e Laerte Guimarães Ferreira³

Recebido em 11 janeiro, 2006 / Aceito em 27 abril, 2007
Received on January 11, 2006 / Accepted on April 27, 2007

ABSTRACT. The successful launching of two satellites, the assurance of the continuity of the program by the involved federal governments and the availability of its data without costs in the web made the China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS-2) an excellent option for optical and medium spatial resolution remote sensing users in several applications. In this study, the CBERS-2 multispectral and multitemporal data from Federal District (FD) of Brazil were processed to analyze their potential to discriminate representative land cover classes. We analyzed 101 samples over representative areas of natural vegetation (grasslands, shrublands and woodlands) and land use (urban areas, reforestations and croplands). Results from this research showed the potential of CBERS-2 data to discriminate land cover classes of FD and a possible limitation to monitor their seasonal variations due to the persistent cloud cover in most of the images acquired in 2005.

Keywords: CBERS-2, remote sensing, seasonality, Brazilian savanna, land cover.

RESUMO. O sucesso do lançamento de dois satélites, a garantia de continuidade desse programa por parte dos governos federais envolvidos e a disponibilização dos seus dados sem custos na rede mundial de computadores fizeram com que o CBERS-2 (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres, *China-Brazil Earth Resources Satellite*) se tornasse uma excelente opção para os usuários em diversas aplicações de dados ópticos de sensoriamento remoto com resolução espacial intermediária. Nesse estudo, dados multiespectrais e multitemporais do CBERS-2 do Distrito Federal (DF) foram processados para analisar o potencial para discriminar classes representativas de cobertura da terra. Para isso, foram analisadas estatisticamente 101 amostras sobre áreas representativas de vegetação natural (formações herbáceas, arbustivas e arbóreas) e uso antrópico (áreas urbanas, reflorestamentos e culturas agrícolas). Resultados dessa pesquisa demonstraram o potencial dos dados do CBERS-2 para discriminar classes da cobertura da terra do DF e uma possível limitação para monitorar as suas variações sazonais devido à cobertura de nuvens persistente na maioria das imagens obtidas em 2005.

Palavras-chave: CBERS-2, sensoriamento remoto, sazonalidade, cerrado, cobertura da terra.

¹Embrapa Cerrados, BR-020, km 18, CP: 08223 – 73301-970 Planaltina, DF, Brasil. Tel.: (61) 3388-9874; Fax: (61) 3388-9879 – E-mail: heleno@cpac.embrapa.br

²Embrapa Cerrados, BR-020, km 18, CP: 08223 – 73301-970 Planaltina, DF, Brasil. Tel.: (61) 3388-9874; Fax: (61) 3388-9879 – E-mail: sano@cpac.embrapa.br

³Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, Campus Samambaia, CP: 131 – 74001-970 Goiânia, GO, Brasil. Tel.: (62) 3521-1096 – E-mail: laerte@iesa.ufg.br

INTRODUÇÃO

A necessidade de autonomia no monitoramento de recursos terrestres do Brasil resultou em uma parceria entre os governos do Brasil e da China para a criação do programa denominado de CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*). Os satélites CBERS-1 e CBERS-2 foram lançados com sucesso em outubro de 1999 e outubro de 2003, respectivamente. Três sucessores (CBERS-2B, CBERS-3 e CBERS-4) já estão previstos para serem colocados em órbita num futuro próximo, com melhorias nas resoluções espaciais e espectrais e garantia de continuidade desse programa. Visando atender as necessidades de ambos os países no mapeamento em múltiplas escalas, por exemplo, sobre áreas de difícil acesso, os referidos satélites foram configurados para registrar dados da superfície terrestre através de três sistemas ópticos: a câmera imageadora de alta resolução (CCD – *Charge Coupled Device*); o imageador por varredura de média resolução (IR-MSS – *Infrared Multispectral Scanner*); e o imageador de campo de visada amplo (WFI – *Wide Field Imager*) (Lino et al., 2000; INPE, 2006). Os dados do CBERS-2 podem ser obtidos gratuitamente mediante cadastro eletrônico na página eletrônica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE; www.dgi.inpe.br).

Dentre as diversas possibilidades de aplicação dos dados do CBERS-2, destaca-se o mapeamento de cobertura da terra de diferentes ecossistemas e em escalas distintas. Uma região de estudo que apresenta um interesse particular no mapeamento e monitoramento de classes de cobertura da terra é a região do Cerrado. O Cerrado, com cerca de 208 milhões de hectares, tem a maior área agrícola do Brasil. Cerca de 75 milhões de hectares de pastagens cultivadas e nativas nessa região (ano-base: 1995/1996; Sano et al., 2001) vêm produzindo 2,5 milhões de toneladas de carne bovina por ano (~40% da produção nacional) (Barcellos, 1996). Essa exploração intensiva de solos da região do Cerrado necessita ser monitorada de forma contínua e precisa para não provocar danos ambientais irreparáveis, decorrentes da fragmentação da vegetação natural, perda da biodiversidade, erosão de solos e mudanças no ciclo global de gás carbônico e outros gases de efeito estufa, conforme ressaltados por Ratter et al. (1997) e Klink & Moreira (2002).

Em muitos aspectos, o Distrito Federal (DF; latitude sul: 15,47°; longitude oeste: 47,46°) pode ser considerado uma área representativa da região do Cerrado em termos de vegetação natural e uso antrópico. As principais fitofisionomias dessa região podem ser encontradas no DF em áreas de preservação permanente como o Parque Nacional de Brasília, a Reserva Ecológica

de Águas Emendadas e o Campo de Instrução de Formosa do Exército Brasileiro. Na porção leste do DF, na região conhecida como PAD-DF (Plano de Assentamento Dirigido do Distrito Federal), são encontradas algumas das principais culturas agrícolas produzidas na região do Cerrado: soja, milho, trigo, algodão e feijão. Nesse local, Sano et al. (2005) identificaram a presença de 104 pivôs-centrais no DF (ano-base: 2002). Na porção norte do DF, no padrão de relevo classificado por Steinke (2003) como *dissecado*, ocorre vegetação nativa predominantemente arbóreo-arbustiva (Mata Seca, Mata de Galeria e Cerradão, dentre outras, segundo a nomenclatura proposta por Ribeiro & Walter, 1998). O Plano Piloto possui ainda terrenos representativos de áreas urbanas extensas e consolidadas. Ao redor de cidades-satélite como Sobradinho e Paranoá, têm-se diversas áreas urbanas em fase de consolidação.

O objetivo principal desse estudo foi analisar o desempenho dos sensores do CBERS-2 no mapeamento das principais classes de cobertura da terra da região do Cerrado, tendo o DF como estudo de caso.

MATERIAIS E MÉTODO

O DF com uma área de 5.814 km², localiza-se no Planalto Central do Brasil e possui uma altitude média em torno de 1.100 metros. O clima predominante nesta região é, de acordo com a classificação de Köppen, do tipo tropical (Aw) e tropical de altitude (Cwa) (Nimer & Brandão, 1972; Barros, 2003), com dois períodos sazonais bastante distintos: a) período chuvoso, de outubro a março, onde se concentram mais de 80% da precipitação anual; e b) período seco, de abril a setembro, com pluviosidade reduzida (< 50 mm/mês), intensa insolação, pouca nebulosidade, grande amplitude térmica e níveis críticos de umidade relativa do ar. A série histórica da estação meteorológica automática da Embrapa Cerrados (latitude sul: 15,59°; longitude oeste: 47,71°; período: 1986 a 2005), disponível no Laboratório de Biofísica Ambiental desse Centro, aponta para uma precipitação média anual de 1.304 mm, uma temperatura média anual de 22°C e uma umidade relativa média anual em torno de 70% na região de estudo.

A análise do desempenho dos dados do CBERS-2 na discriminação de classes de cobertura da terra do DF foi feita com o uso de duas cenas do CBERS-2 de 08 de setembro de 2004 (órbita: 157; pontos: 117 e 118) e mais duas cenas do mesmo satélite de 15 de julho de 2004 (órbita: 158; pontos: 117 e 118). Esse conjunto de quatro órbitas/pontos é o que os usuários necessitam para ter toda a extensão do DF coberta pelos sensores CCD e IR-MSS. Com relação à imagem do WFI, foram adquiri-

Tabela 1 – Parâmetros de imageamento do CBERS-2 CCD, IR-MSS e WFI e Landsat ETM+ (pan = pancromático; IV = infravermelho).

Parâmetro	CBERS-2 ^a			Landsat ETM+ ^b	
		CCD	IR-MSS		WFI
Bandas (μm)	1	0,45-0,52	0,50-1,10 (pan)	0,63-0,69	0,45-0,52
	2	0,52-0,59	1,55-1,75	0,76-0,90	0,53-0,61
	3	0,63-0,69	2,08-2,35		0,63-0,69
	4	0,77-0,89	10,40-12,50		0,78-0,90
	5	0,51-0,73 (pan)			1,56-1,75
	6				10,4-12,5 (termal)
	7				2,09-2,35
	8				0,52-0,90 (pan)
Resolução espacial	20 metros	80 metros (pan e IV) 160 metros (termal)	260 metros	30 metros 15 metros (pan) 120 metros (termal)	
Resolução temporal	26 dias	26 dias	3-5 dias	16 dias	
Faixa de imageamento	113 km	120 km	890 km	185 km	

^a INPE (2006). ^b Goward et al. (2001) e Campbell (2002).

das as cenas de 22 de junho de 2004 e 08 de setembro de 2004 (órbita/ponto: 157/116). As principais especificações técnicas do CBERS encontram-se na Tabela 1.

Estas imagens foram registradas para o sistema de projeção cartográfica UTM (*Universal Transverse de Mercator*) e datum horizontal SAD69. O registro imagem-imagem foi feito através de uma cena ortoretificada do Landsat ETM+ (*geocover*), disponível na página eletrônica da NASA (<http://glofapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>). Para subsidiar a análise das imagens do CBERS-2, foi incluída ainda uma cena do satélite Landsat ETM+ de 20 de julho de 2001 do DF (órbita: 221; ponto: 71). A descrição dos parâmetros do Landsat ETM+ encontra-se na Tabela 1.

Baseados em Araújo Filho (2005), nos conhecimentos de campo dos autores e na imagem do satélite Landsat ETM+ de julho de 2001, foram definidas 101 áreas irregulares de treinamento, localizadas sobre as seguintes classes de cobertura da terra (Fig. 1): área urbana consolidada; área urbana não-consolidada; cultura agrícola; pastagem cultivada; reflorestamento;

mata indiferenciada (mosaico de Mata Seca, Mata de Galeria, Cerradão e Cerrado Denso); Mata de Galeria; formações savânicas do Cerrado (mosaico de Cerrado Ralo e Cerrado Típico); e formações campestres do Cerrado (mosaico de Campo Limpo, Campo Sujo, Campo Limpo Úmido e Campo com Murundus). Áreas de treinamento com vegetação natural foram obtidas principalmente na porção norte do DF, mais especificamente, dentro do Parque Nacional de Brasília (PNB) e nas áreas de relevo dissecado. Áreas antrópicas de treinamento foram obtidas principalmente na porção central (áreas urbanas e reflorestamento) e oriental (culturas agrícolas e pastagens cultivadas) do DF.

Valores digitais médios, nas bandas do vermelho (VM) e do infravermelho próximo (IVP) dos sensores ETM+, CCD e WFI foram calculados para cada área de treinamento e analisados através de gráficos de dispersão. Esse tipo de análise é frequentemente encontrado na literatura (e.g., Huete et al., 1997), pois consegue separar alvos com cobertura vegetal verde de alvos desprovidos de folhas verdes (por exemplo, solo exposto ou terrenos cobertos com palhada seca). Alvos sem vegetação verde cos-

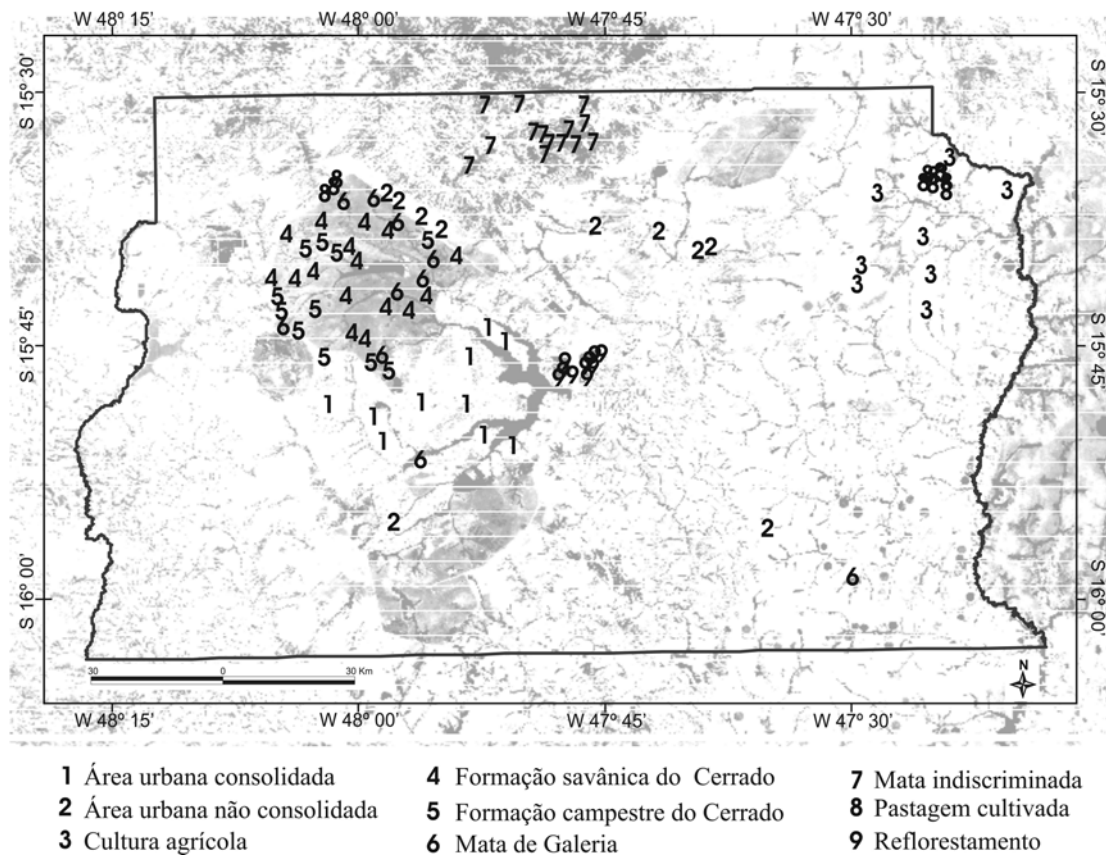


Figura 1 – Mosaico de imagens da banda 3 do CBERS-2 CCD do Distrito Federal com a localização das áreas de treinamento.

tumam se alinhar ao longo de uma reta, conhecida como linha do solo (Baret et al., 1993). A maior ou a menor dispersão ao longo dessa linha de solo depende, por exemplo, das condições de umidade e de rugosidade ou do conteúdo de matéria orgânica e de íons de ferro nos alvos. Para o sensor IR-MSS, o gráfico de dispersão envolveu dados obtidos pelas duas bandas no infravermelho médio. Esse último gráfico foi ainda comparado com os valores digitais obtidos pelas bandas 5 e 7 do ETM+, os quais operam em intervalos espectrais correspondentes às duas bandas do infravermelho médio do IR-MSS.

Dados dos sensores CCD e ETM+ foram ainda analisados através de testes de correlação. Essa análise estatística também foi aplicada para as duas bandas do infravermelho médio do sensor IR-MSS, utilizando-se, além da cena do DF, imagens provenientes de cinco outros biomas brasileiros (Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa). Para cada bioma, foi selecionada uma cena de 2004 com menor cobertura de nuvens, integrando-se os mapas dos biomas brasileiros com o mapa de localização de cenas do CBERS-2 num aplicativo de sistema

de informações geográficas. Na parte central de cada imagem, foram definidos um ou mais polígonos regulares até atingir um mínimo de 2.200 pixels. Os valores digitais das bandas 2 e 3 contidos nesses polígonos foram comparados através de coeficientes de correlação.

Três conjuntos com 30 amostras de valores digitais da câmera CCD do DF, provenientes de áreas cobertas com Mata de Galeria, foram ainda adquiridas e analisadas estatisticamente através do teste t , com nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Selecionou-se a Mata de Galeria por ser a classe de uso da terra da área de estudo com maior homogeneidade em termos de resposta espectral e por estar bem distribuída em toda a região de estudo. O propósito dessa análise foi verificar a existência ou não de diferenças estatisticamente significativas nos valores digitais causadas pelas variações nas calibrações relativas inerentes a essa câmera e associadas às três subfaixas que compõem a largura total de imageamento de 113 km (Ponzoni, 2006).

O potencial do CBERS-2 em discriminar as classes de cobertura da terra da área de estudo foi ainda avaliado através da análise

Tabela 2 – Características dos alvos selecionados para análise do efeito da sazonalidade na suas discriminações com imagens do satélite CBERS-2.

Área	Cobertura da terra	Localização	Coordenadas		Características da cobertura vegetal
			Latitude	Longitude	
1	Campo Sujo	Parque Nacional de Brasília	15°35'21"	48°00'24"	Extrato herbáceo dominante (~95%) com presença esparsa de arbustos (~5% de arbustos) ^(a)
2	Cerrado Ralo	Parque Nacional de Brasília	15°36'26"	48°01'49"	Extrato herbáceo dominante (~70%) com ~25% de arbustos e 5% de espécies lenhosas ^(a)
3	Cerrado Típico	Parque Nacional de Brasília	15°43'59"	48°00'12"	Mistura de extratos herbáceo, arbustivo e arbóreo (~55, 20 e 25%), respectivamente ^(a)
4	Pastagem cultivada	Limite norte do Parque Nacional de Brasília	15°35'08"	48°00'57"	<i>Brachiaria decumbens</i>

(a) Fonte: Ferreira et al. (2003).

estatística multivariada por agrupamento hierárquico (*hierarchical cluster analysis*; Dillon & Goldstein, 1984) e pelo teste Tukey (Kuehl, 2000). A análise de agrupamento, cuja medida de separabilidade entre as classes é apresentada na forma de um dendrograma de similaridade (Moita Neto & Moita, 1998), foi aplicada para as bandas 2, 3 e 4 do sensor CCD, bandas 2 e 3 do IR-MSS e bandas 1 e 2 do WFI. No teste Tukey, duas classes são consideradas distintas toda vez que a hipótese nula (i.e., duas classes apresentam respostas idênticas) for associada a um valor de probabilidade (p) menor ou igual a 0,05 ($p \leq 0,05$). O teste Tukey foi aplicado para dados do ETM+, CCD e WFI, considerando-se os valores digitais das bandas do VM e do IVP convertidos para índice de vegetação por diferença normalizada (*IVDN*) (Tucker, 1979):

$$IVDN = \frac{VD_{IVP} - VD_{VM}}{VD_{IVP} + VD_{VM}} \quad (1)$$

onde: VD = valor digital; IVP = infravermelho próximo; e VM = vermelho.

Para abordar a questão do efeito da sazonalidade na discriminação de classes de cobertura vegetal por meio de dados do CCD/CBERS-2, foram selecionadas quatro áreas-teste na porção norte do DF, cujas características principais são mostradas na Tabela 2. As áreas 1, 2, 3 e 4 desta tabela corresponderam às áreas de Campo Sujo, Cerrado Ralo, Cerrado Típico e pastagem cultivada com gênero *Brachiaria*, respectivamente. As áreas com vegetação natural situaram-se no PNB e corresponderam aos mesmos pontos de controle do experimento realizado em 2000 sob o escopo da LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Expe-*

rimet in Amazonia, Ferreira et al., 2003). A área de pastagem plantada situou-se no limite norte do referido parque. Formações florestais como a Mata de Galeria e a Mata Seca, também presentes na área de estudo, não foram incluídas nessa análise por causa da sua baixa variação sazonal relativa da biomassa verde (Ferreira et al., 2003).

A sazonalidade relativa a essas quatro classes de cobertura da terra, ao longo do ano de 2005, foi caracterizada no campo em termos de variações nas porcentagens de cobertura verde (%CV, proporção, em área, do terreno ocupada por vegetação verde). Fotografias a nadir e no sentido descendente, a uma altura média de 1 metro em relação à superfície do terreno, foram obtidas próximas às passagens do CBERS-2 de 2005 a cada três metros e ao longo de um transecto norte-sul com 30 metros de comprimento. Para isso, foi utilizada uma câmera digital RGB convencional com as seguintes características: resolução de 1.280 pixels \times 960 pixels; lente com distância focal de 6,1-18,3 mm; e formato de gravação em jpg. A área no terreno fotografada pela câmera foi de aproximadamente 1 metro \times 80 centímetros. Nas extremidades de cada transecto, foram fixadas estacas de madeira para que as medidas pudessem ser repetidas nos mesmos locais durante todo o ano de 2005.

A %CV foi calculada através do uso da técnica de classificação supervisionada. Para cada fotografia, foram selecionadas, no monitor do computador, áreas de treinamento correspondentes à vegetação verde, solo, palhada seca e eventuais sombreamentos para a obtenção de assinaturas espectrais específicas de cada alvo. Essas assinaturas foram utilizadas para classificar toda a

área de cobertura pelas fotografias, através do critério de máxima verossimilhança (MAXVER; Schowengerdt, 1997). As análises dos dados de %CV foram efetuadas com base nas médias de cada transecto.

Pretendeu-se ainda extrapolar essa análise sazonal para as imagens multitemporais do CBERS-2. Para isso, foram obtidas todas as imagens disponíveis do CCD do DF de 2005, independentemente da porcentagem de cobertura de nuvens. Na Tabela 3, são mostradas as datas de passagens do satélite CCD/CBERS-2 sobre o Distrito Federal e as suas respectivas porcentagens de cobertura de nuvens e datas das campanhas de campo para caracterização da vegetação (%CV). A porcentagem de cobertura de nuvens em cada imagem foi estimada através da técnica de classificação não-supervisionada por K-médias. O número de classes adotado nessa classificação foi 10. As imagens utilizadas para esse cálculo foram os *quick-looks* (512 pixels \times 512 pixels; formato jpg) disponíveis na página eletrônica da Divisão de Geração de Imagens do INPE (www.dgi.inpe.br).

Tabela 3 – Órbitas/pontos e datas de passagem dos sensores CCD, IR-MSS, WFI e ETM+ da área de estudo.

Sensor	Órbita/Ponto	Data de passagem
CCD	157/117	08/09/2004
	157/118	08/09/2004
	158/117	15/07/2004
	158/118	15/07/2004
IR-MSS	157/117	08/09/2004
	157/118	08/09/2004
	158/117	15/07/2004
	158/118	15/07/2004
WFI	157/116	08/09/2004
		22/06/2004
ETM+	221/71	20/07/2001

RESULTADOS

Na Tabela 4 são mostradas as precisões de georreferenciamento das imagens CCD, IR-MSS, WFI e ETM+. O total de áreas de treinamento definido para cada classe de uso da terra e o correspondente total de pixels que foram estatisticamente analisados para cada sistema sensor são mostrados na Tabela 5. Na Tabela 6, são mostrados os valores digitais médios das bandas 3 e 4 que foram extraídos sobre áreas de Mata de Galeria do DF, em três subfaixas de imageamento da câmera CCD. Resultados do teste *t* (Tab. 7) indicaram que, a um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), houve uma diferença estatisticamente significativa de cinco pixels em média entre as faixas 1 e 2 e entre 1 e 3 da banda 3 (valores

médios de 35, 40 e 40 para as faixas 1, 2 e 3, respectivamente). Portanto, para minimizar esse efeito de diferenças na calibração relativa da banda 3, todas as amostras de valores digitais obtidos na faixa 1 da banda 3 foram acrescidas pelo fator de correção (FC) igual a cinco (FC = 5). Os outros testes não apresentaram diferenças significativas.

Tabela 4 – Erro quadrático médio do georreferenciamento das imagens do CCD, IR-MSS, WFI e ETM+.

Sensor	Órbita/Ponto	Erro Quadrático Médio (pixel)
CCD	157/117	0,45
	157/118	0,47
	158/117	0,53
	158/118	0,80
IR-MSS	157/117	0,59
	157/118	0,59
	158/117	0,77
	158/118	0,77
WFI	157/116	0,71
		0,73
ETM+	221/71	0,76

O diagrama de dispersão da Figura 2a, correspondente ao sensor ETM+, mostra as áreas urbanas consolidadas, as culturas agrícolas e as pastagens cultivadas, todas com pouca atividade fotossintética quando da passagem do satélite (mês de julho, estação seca), situadas próximas à linha diagonal 1:1. Áreas de Reflorestamento, Mata de Galeria e Mata indiscriminada situaram-se nas posições mais afastadas da linha 1:1. Formações savânicas e campestres, além de áreas urbanas não-consolidadas, com presença ainda significativa de vegetação nas suas áreas interiores, localizaram-se em posições intermediárias do gráfico. Dispersão mais significativa ocorreu ao longo da linha 1:1 e, em menor extensão, diagonalmente à mesma linha, indicando que variações espectrais devido ao substrato geológico, pedológico e matéria seca foram mais dominantes em relação a variações devido às atividades fotossintéticas. De uma maneira geral, as observações citadas acima para o sensor ETM+ valem também para os dados do CBERS-2 CCD (Fig. 2b), exceto para uma maior dispersão intraclasses de pontos nos dados do CCD.

A correlação entre os valores digitais da banda 3 do CCD e do ETM+ foi de 0,34. Essa baixa correlação relativa entre os dois sensores pode ter sido provocada pelas diferenças nas datas de passagem das duas plataformas e pela interferência distinta nas condições atmosféricas das duas imagens. Essa baixa correlação

Tabela 5 – Número total de áreas de treinamento definidas para diferentes classes de uso da terra e o correspondente número total de pixels analisados estatisticamente (*cluster analysis* e teste Tukey) nos seguintes sistemas sensores: ETM+, CCD, IR-MSS e WFI.

Classes temáticas	Número total de áreas de treinamento	Número total de pixels			
		ETM+	CCD	IR-MSS	WFI
Área urbana consolidada	10	33.098	74.275	4.681	458
Área urbana não-consolidada	10	14.546	32.815	2.072	202
Cultura agrícola	9	12.947	28.932	1.826	190
Pastagem cultivada	11	1.347	2.985	204	25
Reflorestamento	10	1.549	3.483	232	29
Mata indiscriminada	14	4.014	9.058	594	62
Mata de Galeria	10	2.998	6.615	452	45
Formação savânica do Cerrado	16	13.675	30.734	1.969	200
Formação campestre do Cerrado	11	8.513	19.057	1.227	129
Total	101	92.687	207.954	13.257	1.340

também foi observada para os dados da banda 4 dos dois referidos sensores ($r^2 = 0,48$).

Tabela 6 – Valores digitais médios correspondentes à classe Mata de Galeria nas bandas 3 e 4 da câmera CCD e em três sub-faixas de imageamento (faixa 1 = porção oeste da imagem; faixa 2 = porção central da imagem; faixa 3 = porção leste da imagem).

Banda	Faixa	Valor digital médio
3	1	35
	2	40
	3	40
4	1	148
	2	148
	3	147

O gráfico de dispersão envolvendo as duas bandas do IR-MSS nas faixas do infravermelho médio (Fig. 3a) mostra a disposição dos alvos predominantemente ao longo da linha 1:1. Alvos com coberturas vegetais menores, isto é, áreas urbanas consolidadas e não-consolidadas, pastagens cultivadas e áreas com culturas agrícolas apresentaram valores digitais maiores. Alvos com porcentagens de cobertura vegetal intermediária, como as formações savânicas, apresentaram valores digitais intermediários. Outro aspecto observado nessa última figura é a

correlação bastante elevada das duas bandas do infravermelho médio do IR-MSS ($r^2 = 0,98$). Essa correlação elevada indica que as duas bandas estão registrando dados espectrais do terreno de uma forma similar. Resultados de testes adicionais de correlação realizados por este estudo, com imagens provenientes de outro sensor (ETM+) e outros biomas brasileiros (Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal), confirmaram essa alta correlação (Fig. 3b e Tab. 8, respectivamente). Para o ETM+, a correlação foi igualmente elevada: $r^2 = 0,94$. Para os cinco biomas, a média das correlações, considerando-se as cinco imagens selecionadas aleatoriamente dentro de cada região, em termos de data e localização, foi de $r^2 = 0,96$; a menor correlação foi encontrada para a imagem da Amazônia ($r^2 = 0,94$); e a maior para os biomas Caatinga e Pantanal ($r^2 = 0,99$). Aparentemente, as duas bandas espectrais do IR-MSS possuem informações bastante similares, isto é, o analista interessado em discriminar diferentes classes de cobertura de terras com dados do IR-MSS precisaria analisar apenas uma das duas bandas.

Dados do sensor WFI de 8 de setembro mostraram vários pontos, especialmente os correspondentes aos alvos com pouca vegetação, situados abaixo da linha diagonal 1:1 (Fig. 4a). Alvos com vegetação verde localizaram-se muito próximo da mesma linha diagonal. Os resultados mostrados nessa figura indicam que o sensor WFI do CBERS-2 desta data pode ter apresentado

Tabela 7 – Resultados do teste t envolvendo valores digitais das três subfaixas (F1, F2 e F3) de imageamento da câmera CCD.

Parâmetros	Banda 3			Banda 4		
	F1 × F2	F1 × F3	F2 × F3	F1 × F2	F1 × F3	F2 × F3
Grau de liberdade	29	29	29	29	29	29
$t_{\text{crítico}}$	2,364	2,364	2,364	2,364	2,364	2,364
$t_{\text{calculado}}$	-10,514	-7,906	0,559	-0,149	0,537	0,645
Probabilidade	0	0	0,581	0,883	0,595	0,524
Hipótese H_0	rejeita	rejeita	aceita	aceita	aceita	aceita

Tabela 8 – Coeficientes de correlação entre as bandas 2 (1,55-1,75 μm) e 3 (2,08-2,35 μm) do CBERS-2 IR-MSS adquiridas de cinco biomas brasileiros diferentes: Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal.

Bioma	Órbita/Ponto	Data da imagem	Número total de pixels	Correlação (r^2)
Amazônia	172/106	20/08/2004	2.857	0,94
Caatinga	150/107	29/09/2004	2.995	0,99
Mata Atlântica	157/129	22/06/2004	2.286	0,94
Pampa	158/135	27/10/2004	2.488	0,96
Pantanal	166/121	07/09/2004	2.654	0,99

problemas técnicos no sistema sensor durante alguma etapa de gravação ou pré-processamento. Essa constatação é baseada, por exemplo, no fato de que as diferenças entre os valores digitais das bandas 1 (vermelho) e 2 (infravermelho próximo) deveriam ser muito maiores do que as mostradas nessa última figura, notadamente para alvos com densa cobertura vegetal como são os casos do Reflorestamento, da Mata de Galeria e da Mata indiscriminada, conforme pode ser verificada nos gráficos correspondentes aos sensores ETM+ e CCD da Figura 2. Para esses alvos, a banda 1 apresenta uma forte absorção da radiação devido às atividades fotossintéticas, enquanto a banda 2 apresenta uma forte reflexão da radiação devido à estrutura interna das folhas. Uma outra constatação desse problema técnico é o coeficiente de correlação entre as bandas do vermelho e do infravermelho próximo relativamente elevado para esse sensor ($r^2 = 0,66$), em comparação com as correspondentes correlações para o CCD e ETM+ (0,47 e 0,34, respectivamente). Análise adicional de dados do WFI sobre o DF foi conduzida então com a imagem de 22 de junho de 2004, apresentando tendência similar à descrita acima (Fig. 4b).

Na Figura 5a, é mostrado o dendrograma relativo à similaridade de classes de cobertura da terra do DF, tendo como variáveis, as bandas espectrais 2, 3 e 4 do CCD. A banda 1 não foi

incluída nessa análise por teoricamente apresentar baixa relação com a cobertura vegetal e também por causa dos efeitos significativos de espalhamento atmosférico nos dados sem correção atmosférica. Os seguintes grupos espectrais podem ser destacados dessa figura, em ordem decrescente de similaridade: a) Pastagens cultivadas, Formações savânicas e Formações campestres do Cerrado; b) Mata de Galeria e Mata indiscriminada; c) Áreas urbanas não-consolidadas e Culturas agrícolas; d) Reflorestamento; e e) Áreas urbanas consolidadas. O primeiro grupo representa as classes de cobertura vegetal predominantemente herbácea e seca durante a passagem do satélite. A proximidade entre Mata de Galeria e Mata indiscriminada no CCD também já era esperada devido à semelhança nos índices elevados de cobertura vegetal verde. As duas classes espectralmente similares do último grupo, isto é, áreas urbanas não-consolidadas e culturas agrícolas, podem ser discriminadas numa imagem de satélite por meio de diferenças na textura. Os talhões agrícolas normalmente apresentam texturas mais lisas, enquanto que as áreas urbanas não-consolidadas apresentam textura mais rugosa.

Para o sensor IR-MSS, tendo como variáveis as bandas 2 e 3 (Fig. 5b), foram obtidos os seguintes grupos espectrais, em ordem decrescente de similaridade: a) Matas de Galeria e Matas indiscriminadas; b) Formações savânicas e campestres do Cer-

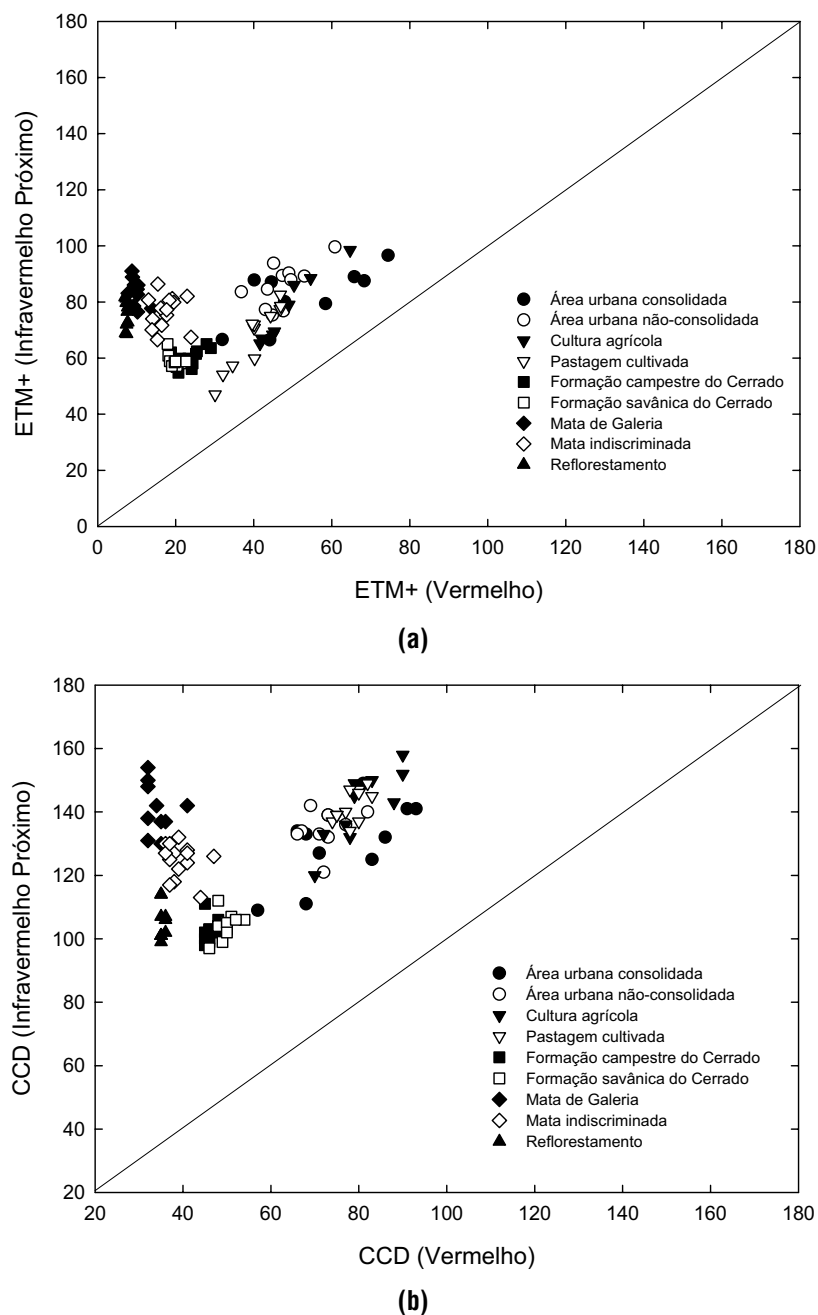


Figura 2 – Gráfico de dispersão de valores digitais médios das classes de cobertura da terra do Distrito Federal nas bandas 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo) do Landsat ETM+ (a) e do CBERS-2 CCD (b). Os coeficientes de correlação foram 0,34 e 0,48, respectivamente.

rado; c) Áreas urbanas consolidadas e não-consolidadas; d) Culturas agrícolas e Pastagens cultivadas; e) Reflorestamento. A formação desses grupos provavelmente está relacionada com diferenças no conteúdo de água dos alvos. De acordo com Jensen (2000) e Huete (2004), a quantidade de água nas plantas e

nas porções superficiais dos solos é o principal parâmetro que controla as respostas espectrais dos alvos na faixa espectral do infravermelho médio. A apresentação e análise do dendograma do sensor WFI não é apresentado nesse artigo devido à inconsistência na aquisição de dados sobre a área de estudo, conforme

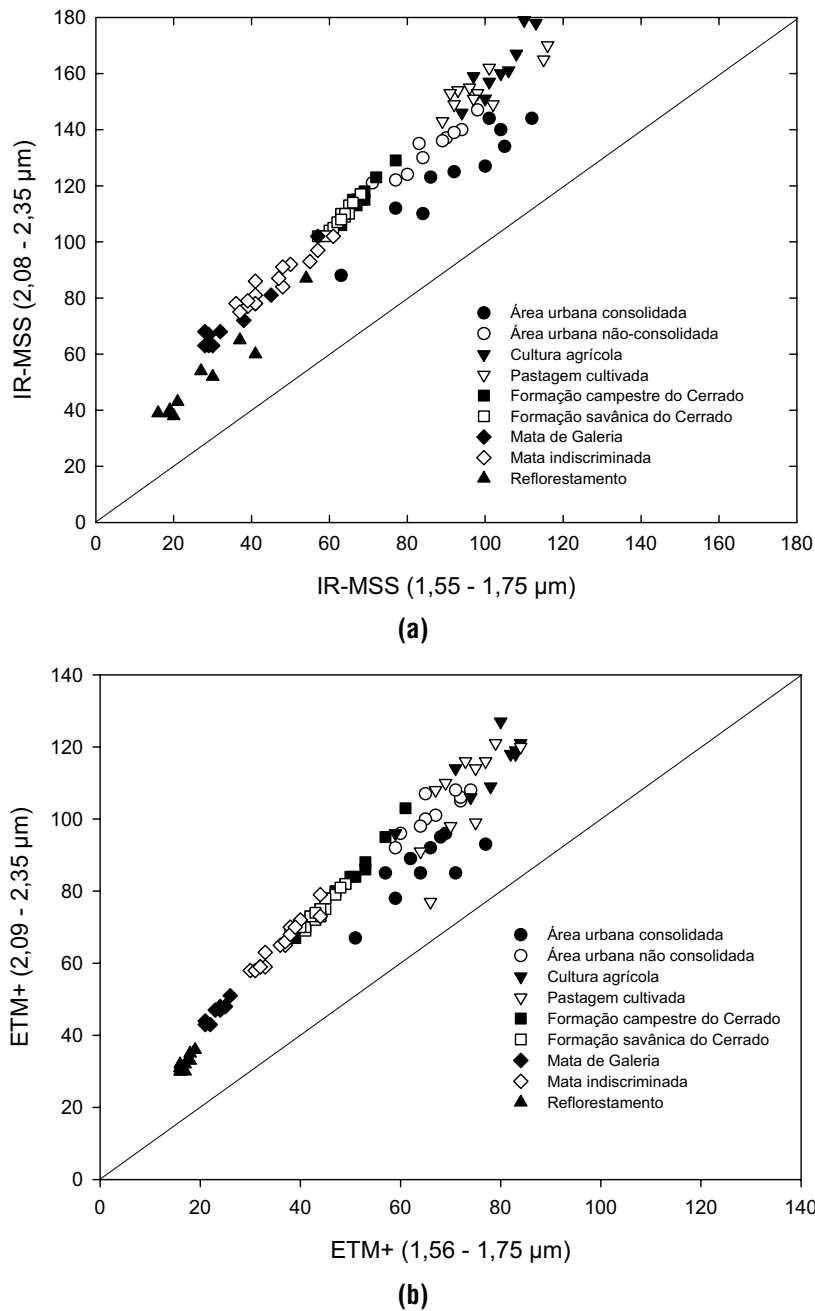
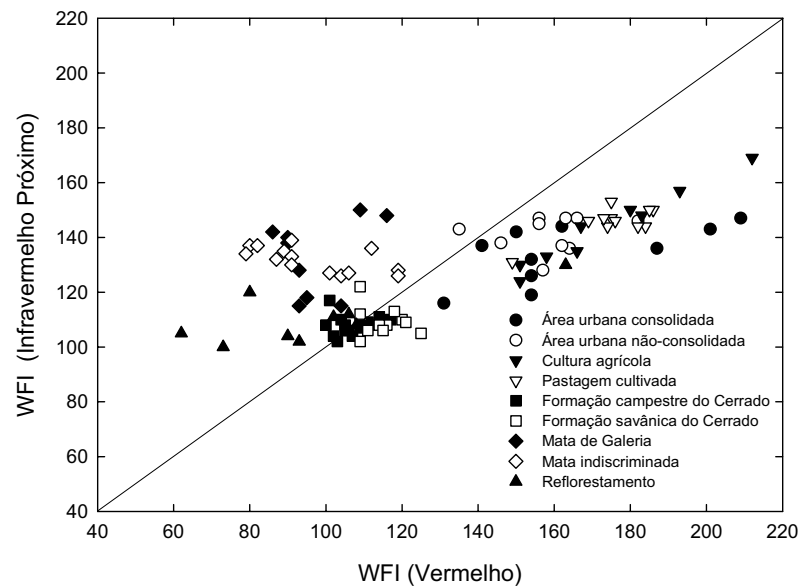


Figura 3 – Gráfico de dispersão de valores digitais médios das classes de cobertura da terra do Distrito Federal nas bandas 2 (1,55-1,75 μm) e 3 (2,08-2,35 μm) do CBERS-2 IR-MSS (a) e nas bandas 5 (1,56-1,75 μm) e 7 (2,09-2,35 μm) do Landsat ETM+ (b).

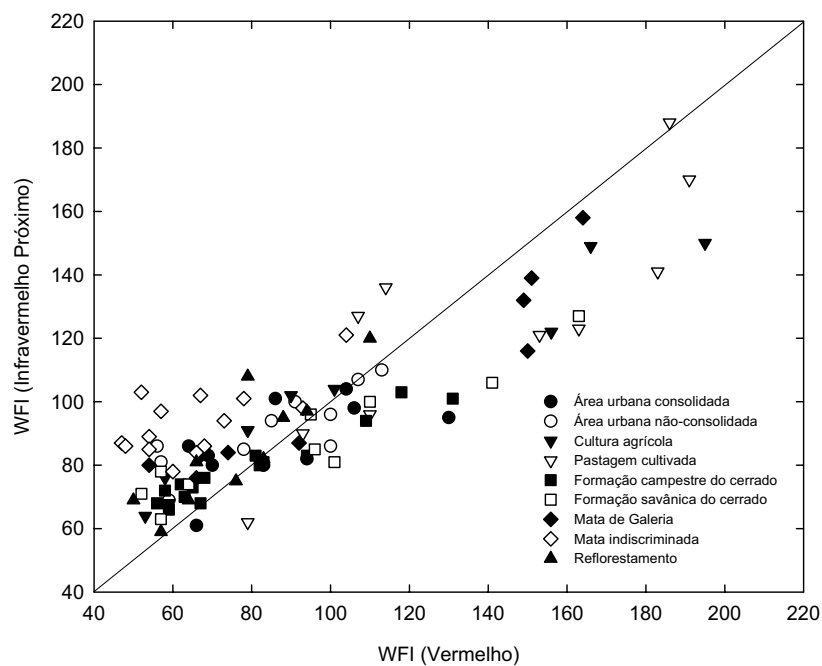
comentado anteriormente.

Os resultados do teste Tukey para os dados do CCD convertidos para índice de vegetação indicaram a discriminação das seguintes classes de cobertura da terra (Tab. 9): Formações campestres, Formações savânicas e Pastagem cultivada; Cultu-

ras agrícolas, Áreas urbanas consolidadas e Áreas urbanas não-consolidadas; Mata de Galeria; e Matas indiscriminadas e Reflorestamento. Tais agrupamentos são similares aos obtidos pela análise de agrupamento envolvendo valores digitais originais. As classes correspondentes à Mata de Galeria e Áreas urba-



(a)



(b)

Figura 4 – Gráfico de dispersão de valores digitais médios das classes de cobertura da terra do Distrito Federal nas bandas do vermelho e infravermelho próximo do CBERS-2 WFI de duas datas de passagem: 8 de setembro de 2004, $r^2 = 0,66$ (a) e 22 de junho de 2004, $r^2 = 0,89$ (b).

nas não-consolidadas apareceram juntos ou separadamente, dependendo da análise estatística (análise de agrupamento ou teste Tukey). Resultado similar foi obtido para o sensor ETM+. As exceções ficaram por conta da inseparabilidade entre Reflo-

restamento e Mata de Galeria e da separação entre Mata Indiscriminada e Reflorestamento. O desempenho do sensor IR-MSS na discriminação de classes de cobertura da terra do DF foi pior em relação aos outros dois sensores, principalmente pela con-

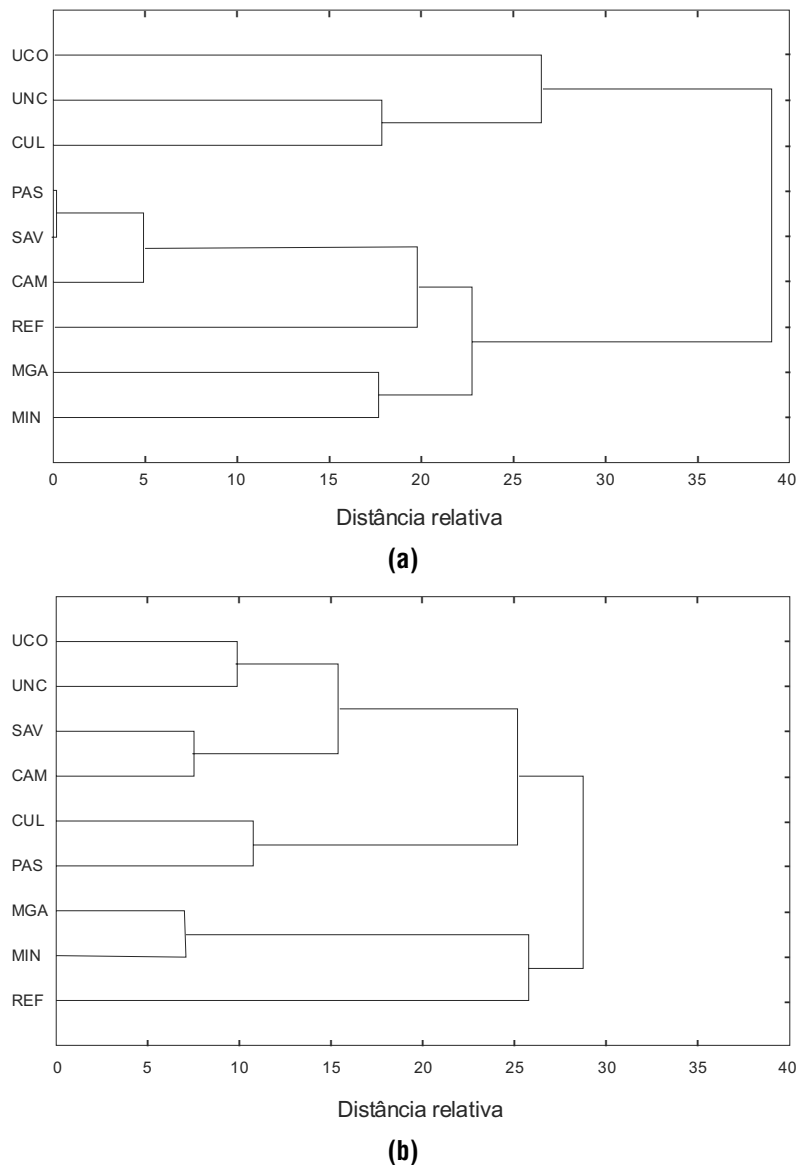


Figura 5 – Dendrogramas obtidos da análise de agrupamento hierárquico utilizando como variáveis as bandas espectrais do CBERS-2. Variáveis: bandas 2, 3 e 4 do CBERS-2 CCD (a); e bandas 2 e 3 do CBERS-2 IR-MSS (b). UCO = Área urbana consolidada; UNC = Área urbana não-consolidada; SAV = Formação savânica do Cerrado; CAM = Formação campestre do Cerrado; CUL = Cultura agrícola; PAS = Pastagem cultivada; MGA = Mata de Galeria; MIN = Mata indiscriminada; e REF = Reflorestamento.

fusão espectral apresentada entre as seguintes classes: formação campestre, culturas agrícolas, pastagens cultivadas, formações savânicas e áreas urbanas não-consolidadas.

De um total de 10 cenas do DF disponível na página eletrônica do INPE para o ano de 2005, apenas duas apresentaram coberturas de nuvens inferiores a 10% (Tab. 10). Todas as outras apresentaram cobertura igual ou superior a 19%. Essa situação

fornece um indicativo de que a resolução temporal de 26 dias do sistema sensor CCD/CBERS-2 é inadequada para monitorar a acentuada sazonalidade da região do Cerrado e impediu os autores de realizarem a análise do potencial do CCD/CBERS-2 para detectar mudanças sazonais dos alvos representativos da área de estudo. Convém ressaltar, no entanto, a necessidade de analisar um conjunto maior de cenas para comprovar tal inadequação.

Tabela 9 – Resultados do teste Tukey para os dados do CCD, ETM+ e IR-MSS. Letras iguais indicam que as classes não foram discriminadas. Para identificação dos símbolos, vide legenda da Figura 5.

Classe	CCD	ETM+	IR-MSS
CAM	A	A	A
CUL	B	B	A
MGA	C	C	B
MIN	D	D	B
PAS	A	B	A
REF	D	C	C
SAV	A	A	A
UCO	B	B	D
UNC	B	B	A

Tabela 10 – Estimativa de cobertura de nuvens para as passagens do satélite CBERS-2 sobre o Distrito Federal em 2005.

Cena	Data de Passagem do CBERS-2 do CBERS-2	% de Cobertura de Nuvens
1	16/01/2005	não disponível
2	11/02/2005	91
3	09/03/2005	40
4	04/04/2005	7
5	30/04/2005	61
6	26/05/2005	92
7	21/06/2005	47
8	17/07/2005	7
9	12/08/2005	19
10	07/09/2005	86
11	03/10/2005	não disponível
12	29/10/2005	79

Em termos de dados de campo, em média, o máximo de cobertura verde foi encontrado no mês de fevereiro (55% de cobertura verde, Fig. 6a). Por outro lado, as taxas mais baixas de cobertura verde foram obtidas no mês de agosto (porcentagem média de 14%). Outra característica encontrada foi a tendência dos quatro alvos apresentarem padrões similares de variação sazonal ao longo do ano. Isto significa que não houve indicação clara sobre a existência de uma época específica do ano onde a capacidade de discriminação dos alvos selecionados fosse mais acentuada. A pastagem cultivada apresentou valores altos de cobertura verde no início do ano (janeiro e fevereiro), porém, a partir de março, sofre uma redução mais acentuada em relação aos outros alvos, passando a aumentar novamente no final do ano. Essa classe de uso da terra foi a que apresentou maior sensibilidade em relação às variações sazonais. Convém ressaltar que essa conclusão está sendo baseada sem levar em consideração as diferenças na densidade de cobertura dos extratos arbustivo e arbóreo em cada alvo

selecionado. Além disso, constatações visuais de campo indicaram que não houve interferência significativa do pastoreio na %CV da área ocupada pela pastagem cultivada, com altura média dessa pastagem permanecendo constante durante todo o ano, em torno de 5 a 7 centímetros.

Quando as porcentagens de cobertura verde são acumuladas (Fig. 6b), em uma abordagem multitemporal, nota-se uma melhora na capacidade de discriminação dos alvos selecionados, principalmente a partir do mês de abril (início da estação seca) e entre o Cerrado Ralo e o Cerrado Típico. As porcentagens acumuladas de cobertura verde integram as variações temporais dos alvos para todo o ciclo de crescimento e são amplamente usados como parâmetros de entrada nos modelos de produção primária bruta (Ratana et al., 2005). Todas as curvas apresentaram formas sigmoidais, refletindo uma desaceleração no aumento ou manutenção da cobertura verde durante a estação seca, nos meados do ano. O Cerrado Ralo foi a classe que apresentou as maiores taxas de cobertura verde acumulada no extrato herbáceo, enquanto o Cerrado Típico apresentou as menores taxas.

CONCLUSÕES

A análise quantitativa do desempenho dos sensores CCD e IR-MSS do CBERS-2 mostrou que os mesmos são apropriados para discriminação de grupos de classes de cobertura da terra do Distrito Federal e, por extensão, da região do Cerrado. Os dados de campo referentes à porcentagem acumulada de cobertura verde indicaram que a abordagem multitemporal de imagens possui um potencial maior de discriminação de alvos da região do Cerrado que com os dados monotemporais. Finalmente, o monitoramento da variação sazonal das classes de cobertura da terra da região do Cerrado através de imagens CCD do satélite CBERS-2 é dificultado por causa da baixa periodicidade de aquisição de dados CCD do CBERS-2.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Embrapa Cerrados e à Universidade Federal de Goiás pelo suporte computacional e financeiro e pela oportunidade que foi dada ao primeiro autor para desenvolver curso de pós-graduação. O CNPq forneceu bolsas de produtividade em pesquisa aos dois co-autores desse trabalho. Reconhecimento e gratidão são extensivos ao Luciano Shiratsuchi, Edim Borges e Elaine C. Oliveira pelo apoio nos trabalhos de campo.

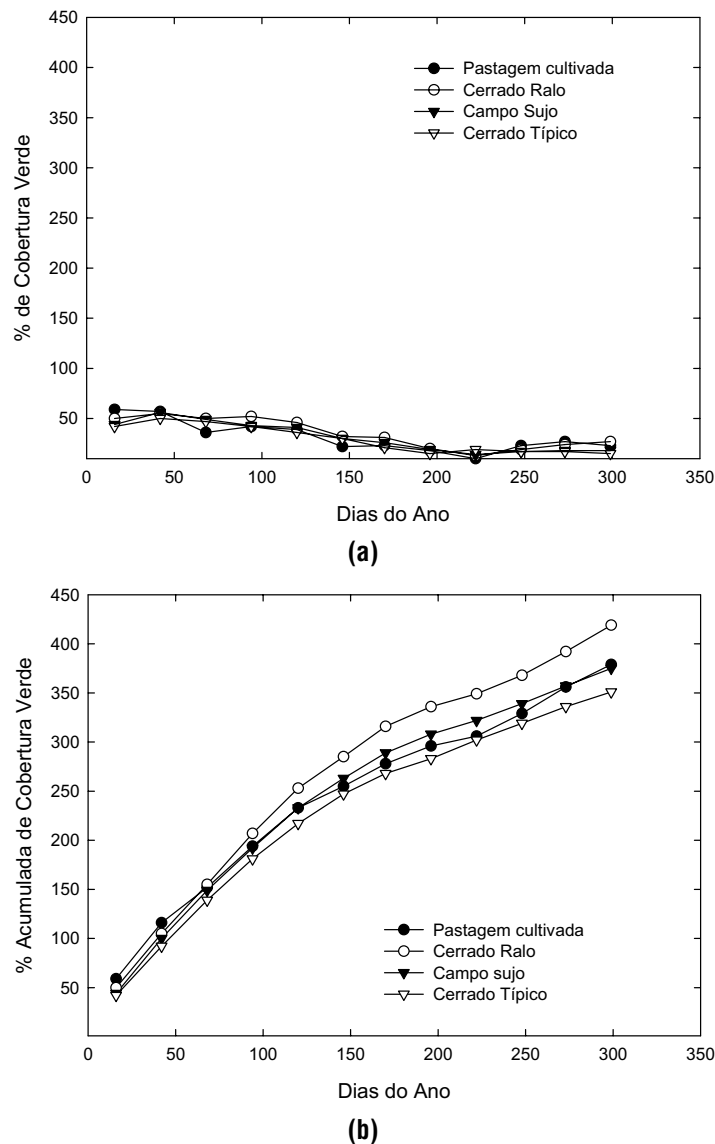


Figura 6 – Variações sazonal anual simples (a) e acumulada (b) da porcentagem de cobertura verde, obtida sobre áreas de pastagem cultivada, Cerrado Ralo, Campo Sujo e Cerrado Típico do Distrito Federal.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO FILHO MC. 2005. Desenvolvimento de um sistema de classificação hierárquico para mapas de uso e cobertura da terra por meio de imagens do satélite Landsat ETM+. Brasília: Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, (dissertação de mestrado). 126 p.

BARCELLOS AO. 1996. Sistemas extensivos e semi-intensivos de produção: pecuária bovina de corte nos Cerrados. In: Simpósio sobre o Cerrado, 8, 24-29 março 1996, Brasília, DF, Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados. Anais. Planaltina: Embrapa-CPAC, p. 130-136.

BARET F, JACQUEMOUD S & HANOCQ JF. 1993. About the soil line concept in remote sensing. *Advances in Space Research*, 13(5): 281-284.

BARROS JR. 2003. A chuva no Distrito Federal: o regime e as excepcionalidades do ritmo. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, Departamento de Geografia, (dissertação de mestrado). 221 p.

CAMPBELL JB. 2002. *Introduction to Remote Sensing*. New York: The Guilford Press, 3rd ed., cap. 6, 157-203.

DILLON WR & GOLDSTEIN M. 1984. *Multivariate analysis. Methods and Applications*. New York: John Wiley & Sons, cap. 5, 157-208.

- FERREIRA LG, YOSHIOKA H, HUETE A & SANO EE. 2003. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: an analysis within the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). *Remote Sensing of Environment*, 87: 534–550.
- GOWARD SN, MASEK JG, WILLIAMS DL, IRONS JR & THOMPSON RJ. 2001. The Landsat 7 mission. *Terrestrial research and applications for the 21st century. Remote Sensing of Environment*, 78: 3–12.
- HUETE AR. 2004. Remote sensing of soils and soil processes. In: USTIN SL. (Ed.). *Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring*. Hoboken: John Wiley & Sons, 3rd ed., v. 4: 3–52.
- HUETE AR, LIU HQ, BATCHILY K & van LEEUWEN W. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59: 440–451.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2006. Satélite sino-brasileiro de recursos terrestres. São José dos Campos: INPE. Disponível em: < http://www.cbers.inpe.br/pt/index_pt.htm >. Acesso em: 02 out. 2006.
- JENSEN JR. 2000. *Remote Sensing of the Environment. An Earth Resources Perspective*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc., 10: 333–377.
- KLINK CA & MOREIRA AG. 2002. Past and current human occupation, and land use. In: OLIVEIRA PS & MARQUIS RJ. (Ed.). *The Cerrados of Brazil*. New York: University Press, 5: 69–88.
- KUEHL RO. 2000. *Design of Experiments. Statistical Principles of Research Design and Analysis*. Brooks, Cole: Duxbury Press, 2nd ed., 666 p.
- LINO CO, LIMA MGR & RUBSCHER GL. 2000. CBERS – An international space cooperation program. *Acta Astronautica*, 47(2-9): 559–564.
- MOITA NETO JM & MOITA GC. 1998. Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados. *Química Nova*, 21(4): 467–469.
- NIMER E & BRANDÃO AMPM. 1972. *Balanço hídrico e clima da região dos Cerrados*. Rio de Janeiro: IBGE, 166 p.
- PONZONI FJ. 2006. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por sano@cpac.embrapa.br em 19 maio 2006.
- RATANA P, HUETE AR & FERREIRA L. 2005. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. *Earth Interactions*, 9(3): 1–22.
- RATTER JA, RIBEIRO JF & BRIDGEWATER S. 1997. The Brazilian Cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Annals of Botany*, 80: 223–230.
- RIBEIRO JF & WALTER TMB. 1998. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO SM & ALMEIDA SP. (Ed.). *Cerrado: Ambiente e Flora*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 3: 89–166.
- SANO EE, JESUS ET & BEZERRA HS. 2001. Mapeamento e quantificação de áreas remanescentes do Cerrado através de um sistema de informações geográficas. *Sociedade & Natureza*, 13(25): 47–62.
- SANO EE, LIMA JEW, SILVA EM & OLIVEIRA EC. 2005. Estimativa da variação na demanda de água para irrigação por pivô-central no Distrito Federal entre 1992 e 2002. *Revista Engenharia Agrícola*, 5(2): 508–515.
- SCHOWENGERDT RA. 1997. *Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing*. San Diego: Academic Press, 2nd ed., 9: 389–474.
- STEINKE VA. 2003. *Uso integrado de dados digitais morfométricos (altimetria e sistema de drenagem) na definição de unidades geomorfológicas no Distrito Federal*. Brasília: Universidade de Brasília, (dissertação de mestrado). 102 p.
- TUCKER CJ. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127–150.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Helena da Silva Bezerra é Geógrafo (UPIS/1990), Especialista em Sensoriamento Remoto (UnB/1993) e Mestre em Geografia no Instituto de Estudos Sócio-Ambientais (UFG/2006). Desde 1978, exerce a função de técnico de nível superior na Embrapa Cerrados. Possui sólidas experiências nas técnicas de processamento digital de imagens e em sistemas de informações geográficas. Seus interesses de pesquisa envolvem análise ambiental de imagens orbitais de sensoriamento remoto, com ênfase no satélite sino-brasileiro da série CBERS.

Edson Eyji Sano é Geólogo (USP/1983), Mestre em Sensoriamento Remoto (INPE/1987) e Doutor em Ciência do Solo (University of Arizona/1997). Atualmente é pesquisador da Embrapa Cerrados/Brasília, DF e professor credenciado do Instituto de Geociências/UnB. É co-editor do livro *Sistema de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura* e responsável por projetos de pesquisa financiados pelo CNPq, Embrapa e MMA/Banco Mundial. Seus interesses de pesquisa envolvem estimativa de umidade de solos com sensores de microondas e mapeamento/monitoramento de cobertura da terra do Cerrado com sensores ópticos e de radar.

Laerte Guimarães Ferreira é Geólogo (UnB/1990), Mestre em Geologia Econômica (UnB/1993) e Doutor em Ciência do Solo (University of Arizona/2001). Atualmente é professor do Instituto de Estudos Sócio-Ambientais (IESA) e do Programa de Doutorado em Ciências Ambientais (CIAMB) da Universidade Federal de Goiás, além de coordenador do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG/UFG). Desenvolve projetos financiados pelo CNPq, Banco Mundial, SIPAM e Governo do Estado de Goiás, além de colaborar em dois projetos financiados pela NASA no âmbito do projeto LBA. Seus interesses de pesquisa envolvem o mapeamento/monitoramento da paisagem (cobertura da terra e parâmetros biofísicos) com sensores ópticos de múltiplas resoluções.