

ANÁLISE DE IMAGENS DO SATÉLITE ALOS PALSAR PARA O MAPEAMENTO DE USO E COBERTURA DA TERRA DO DISTRITO FEDERAL

Edson Eyji SANO ¹, Elaine Marra dos SANTOS ²,
Paulo Roberto MENESES ²

- (1) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / EMBRAPA, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. BR-020, km 18. Caixa Postal 08223. CEP 73301-970. Planaltina, DF. Endereço eletrônico: sano@cpac.embrapa.br
(2) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, UnB / Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte. CEP 70910-900. Brasília, DF. Endereços eletrônicos: marra.elaine@gmail.com; pmeneses@unb.br

Introdução
Área de Estudo
Material e Métodos
Material
Métodos
Apresentação de Resultados
Discussão
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – No Distrito Federal (DF), mapas de uso e cobertura da terra têm sido obtidos com base em imagens ópticas, embora imagens de radar também se constituam em uma alternativa viável, pois independem das condições de iluminação solar e a radiação em microondas tem ainda a capacidade de atravessar nuvens e detectar diferenças nas estruturas da vegetação. Nesse sentido, o objetivo deste estudo é analisar o potencial das imagens de radar da plataforma ALOS PALSAR para o mapeamento de uso e cobertura da terra do DF em uma escala compatível com 1:100.000. Imagens em amplitude na banda L e polarizações HH, HV e VV do final da estação chuvosa (25 de abril de 2007) foram convertidas para coeficientes de retroespalhamento e processadas pela técnica de segmentação de imagens por crescimento de regiões, disponível no programa de processamento de imagens SPRING. Os segmentos foram exportados para o aplicativo de sistema de informações geográficas ArcGIS 9.2TM no formato *shape*. A classe correspondente de uso e cobertura da terra de cada polígono foi identificada visualmente na tela de computador (interpretação visual). As seguintes classes temáticas foram discriminadas: Áreas Urbanas consolidadas; Áreas Urbanas em consolidação; Campos; Cerrado Típico; Culturas Agrícolas; Mata de Galeria; Matas Indiscriminadas; Pastagens Cultivadas; Reflorestamentos; e Reservatórios. Cerrado Típico, com 39.990 ha, foi a classe de mapeamento mais representativa da área de estudo, seguida de Áreas Urbanas consolidadas e Campos, com 29.950 ha e 27.918 ha, respectivamente. A exatidão de mapeamento, fornecida pelo índice Tau, foi de 70%.

Palavras chaves: radar, polarização, coeficiente de retroespalhamento, sensoriamento remoto, processamento de imagens.

ABSTRACT – *E.E. Sano, E.M. dos Santos, P.R. Meneses - analysis of alos palsar satellite images for land use and land cover mapping of Distrito Federal, Brazil.* In the Distrito Federal (DF), Brazil, land use and land cover mappings have been obtained from optical images, though radar data are also a valuable alternative since they are independent of solar illumination and the microwave radiation can penetrate clouds and depict differences in canopy structures. In this aspect, the goal of this study is to analyze the potential of ALOS PALSAR data for land use and land cover mapping of DF at a scale compatible with 1:100,000. L-band, HH, HV and VV-polarized amplitude images from the end of wet season (April 25th, 2007) were converted into radar backscattering coefficients and processed through the image segmentation technique by growing region, available in the SPRING image processing software package. The segments were exported into the ArcGIS 9.2TM geographical information system software package as shapefile format. The corresponding land use and land cover class of each polygon was identified visually in the computer screen (visual interpretation). The following thematic classes were discriminated: consolidate urban areas; urban areas in consolidation; natural grasslands; Cerrado shrubland; croplands; gallery forest; indiscriminated forests; pasturelands; reforestations; and water reservoirs. Cerrado shrubland, with 39,990 ha, was the most representative mapping class of the study area, followed by consolidated urban areas and natural grassland, with 29,950 ha and 27,918 ha, respectively. The accuracy of the final map, given by the Tau index, was 70%.

Keywords: radar, polarization, backscattering coefficient, remote sensing, image processing.

INTRODUÇÃO

Atualmente existem diversos sensores orbitais que operam em diferentes faixas espectrais. A título de exemplo, têm-se os sensores ETM+, CCD e ASTER, a bordo dos satélites Landsat, CBERS-2B e Terra,

respectivamente, que geram imagens da superfície terrestre nas faixas espectrais do visível e do infravermelho próximo, médio e termal. No Distrito Federal (DF), o reconhecimento e a discriminação de classes de uso e cobertura da terra têm sido realizadas principalmente com dados obtidos pelo Landsat ETM+ (Araújo Filho et al., 2007; Ferreira et al., 2007) e pelo CBERS-2 CCD (Bezerra et al., 2007), notadamente por causa da: 1) resolução espacial decimétrica dos sensores ETM+ e CCD, que permitem mapeamentos semidetalhados, por exemplo, nas escalas de 1:50.000 e 1:100.000, de uso e cobertura da terra de áreas compatíveis com a dimensão do DF (5.814 km²); 2) cobertura sinótica do terreno (185 km x 185 km no ETM+ e 113 km x 113 km no CCD); 3) eficiência na identificação das principais feições da superfície terrestre, por meio de diferentes bandas nas regiões espectrais do visível e do infravermelho de ondas curtas e, 4) possibilidade de obtenção de cenas sem custos na rede mundial de computadores.

Embora os sensores ópticos sejam úteis para esse tipo de mapeamento, reconhecem-se algumas limitações importantes (Moran et al., 2002; Sano et al., 2005a). A aquisição de imagens ópticas é dependente de ausência de cobertura de nuvens ou de fumaça durante a passagem do satélite, e a capacidade de penetração da radiação eletromagnética (REM) incidente é restrita à porção superior do dossel ou dos solos. Além disso, a interpretação de dados ópticos precisa levar em consideração a complexa interação entre a REM e a cobertura vegetal e de solos, a condição não-lambertiana dos alvos, as variações angulares anuais de azimute e elevação solar, o sombreamento interno dos alvos e a interferência atmosférica.

Uma alternativa é o uso de sensores de radar de abertura sintética (SAR), os quais correspondem a sensores ativos (possuem fonte própria de REM) que operam na faixa espectral de microondas e que permitem discriminar alvos ou feições no terreno com base nas diferenças nas suas propriedades dielétricas (conteúdo de água nos solos e nas plantas) e geométricas (rugosidade do terreno e estrutura da vegetação) (Raney, 1998; Paradella et al., 2005). A operação em faixas espectrais centimétricas possibilita ainda a obtenção de imagens independentemente da presença de nuvens, portanto, podem adquirir imagens em qualquer época do ano.

O maior problema relativo ao uso e análise de imagens de radar está na complexidade de interpretação que é inerente a esse tipo de dados (Moran et al., 2002; Chaves et al., 2003). Soma-se a essa dificuldade, a impossibilidade de um melhor entendimento sobre a interação que efetivamente ocorre entre a radiação emitida pelo sensor de radar e o alvo, por

causa da freqüente indisponibilidade de dados confiáveis sobre as condições dielétricas e geométricas dos solos e da vegetação no momento da passagem do sistema sensor. Além dos sinais de radar serem sensíveis ao conteúdo de água nas folhas das plantas, à umidade dos solos, à estrutura do dossel e à micro e macrotopografia, conforme ressaltado anteriormente, também são dependentes de parâmetros de imageamento relacionados com comprimento de onda, ângulo de incidência e polarização (Jensen, 2000).

Apesar dessas dificuldades, vários estudos já foram conduzidos para avaliar o potencial dos dados de radar para discriminar classes de uso e cobertura da terra, principalmente na década de 1990. Por exemplo, Dobson et al. (1995) avaliaram a sensibilidade de dados de radar para classificar a cobertura vegetal do norte do estado de Michigan, Estados Unidos, obtendo-se resultados promissores após separar a vegetação em diferentes categorias estruturais (formações herbáceas, arbustivas e arbóreas, subdivididas de acordo com a morfologia das folhas - laminar, acicular e larga). Por causa da notória dificuldade em obter imagens ópticas sem cobertura de nuvens, vários autores têm avaliado a possibilidade de utilizar dados de radar para discriminar classes específicas de uso e cobertura da terra na Amazônia, principalmente áreas desflorestadas e vegetação secundária (e.g., Rignot et al., 1997). A principal limitação detectada por esses e outros estudos foi a indisponibilidade de dados orbitais de radar com múltipla polarização. Tal limitação foi contornada com o lançamento, na década de 2000, de cinco novos satélites de radar com capacidade de imageamento em quatro polarizações: o ALOS PALSAR (Japão), o RADARSAT-2 (Canadá), o ENVISAT ASAR (comunidade européia), o TerraSAR-X (Alemanha) e o Cosmo-SkyMed (Itália).

No DF, ainda não foram realizadas pesquisas que sejam do conhecimento dos autores com imagens de radar multipolarimétricas que tenham avaliado a real capacidade de discriminar classes representativas de uso e cobertura da terra desta unidade federativa. Pesquisas anteriores utilizaram imagens de uma única polarização, como é exemplo o trabalho de Sano et al. (2005a), que compararam o desempenho de imagens do satélite JERS-1 SAR do DF (banda L e polarização HH) em relação a dois índices de vegetação (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Indice* e EVI – *Enhanced Vegetation Index*) para discriminar as principais fitofisionomias de Cerrado do Parque Nacional de Brasília. O objetivo principal deste presente estudo é analisar o potencial das imagens do ALOS PALSAR (banda L, polarizações HH, HV e VV) para discriminar as classes de uso e cobertura da terra mais representativas do DF.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à parte centro-sul do DF (31% da área total dessa unidade federativa), que foi coberta pela imagem PALSAR de 25 de abril de 2007 e delimitada aproximadamente entre as latitudes 15° 32' 58" S e 16° 02' 55" S e entre as longitudes 47° 36' 32" W e 48° 02' 01" W (Figura 1). Nesse perímetro ocorrem áreas relativamente extensas de cobertura vegetal natural, cobertura vegetal antrópica, áreas urbanas e reservatórios artificiais.

As formações campestres e savânicas naturais mais representativas são encontradas na sua porção nordeste (Parque Nacional de Brasília), enquanto as formações florestais naturais mais extensas aparecem em relevos acidentados dos extremos norte e sul da região de estudo. Em termos de cobertura vegetal antrópica, destacam-se as áreas agrícolas (pastagens cultivadas e culturas agrícolas irrigadas por pivô-central e de sequeiro) que aparecem nas porções leste e sudeste, em relevo de chapada. As áreas urbanas consolidadas ou em consolidação (assentamentos e condomínios) concentram-se na porção central da imagem. Nas partes central e noroeste da área de estudo, destacam-se os lagos artificiais do Paranoá (37,35 km²) e de Santa Maria (7,58 km²), que são utilizados para abastecimento, recreação, lazer e

controle da baixa umidade relativa do ar do DF na estação seca.

A acentuada dinâmica de uso e ocupação urbana e agrícola é uma característica marcante do DF. A maior parte das culturas agrícolas são de sequeiro, desenvolvidas durante o período chuvoso (plantios de novembro a dezembro). Predominam as culturas de soja, milho e feijão (IBGE, 2007) e, ultimamente, de algodão e sorgo. Durante a seca, entram em funcionamento os diversos sistemas de irrigação por pivô-central e por aspersão. Sano et al. (2005b) identificaram 104 pivôs-centrais no DF para o ano de 2002. Segundo o Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1997), existiam cerca de 60.000 hectares de pastagens cultivadas e 30.000 hectares de pastagens nativas no DF. As áreas urbanas são formadas por Brasília e outras cidades-satélites como Taguatinga, Ceilândia, Sobradinho e Brazlândia, edificados por padrão espacial bem distinto da maioria das cidades brasileiras (Araújo Filho et al., 2007). No DF, as áreas com maior densidade populacional, em vez de estarem localizadas nos centros das cidades, são encontradas em centenas de assentamentos e invasões ocupadas pela população de renda mais baixa.

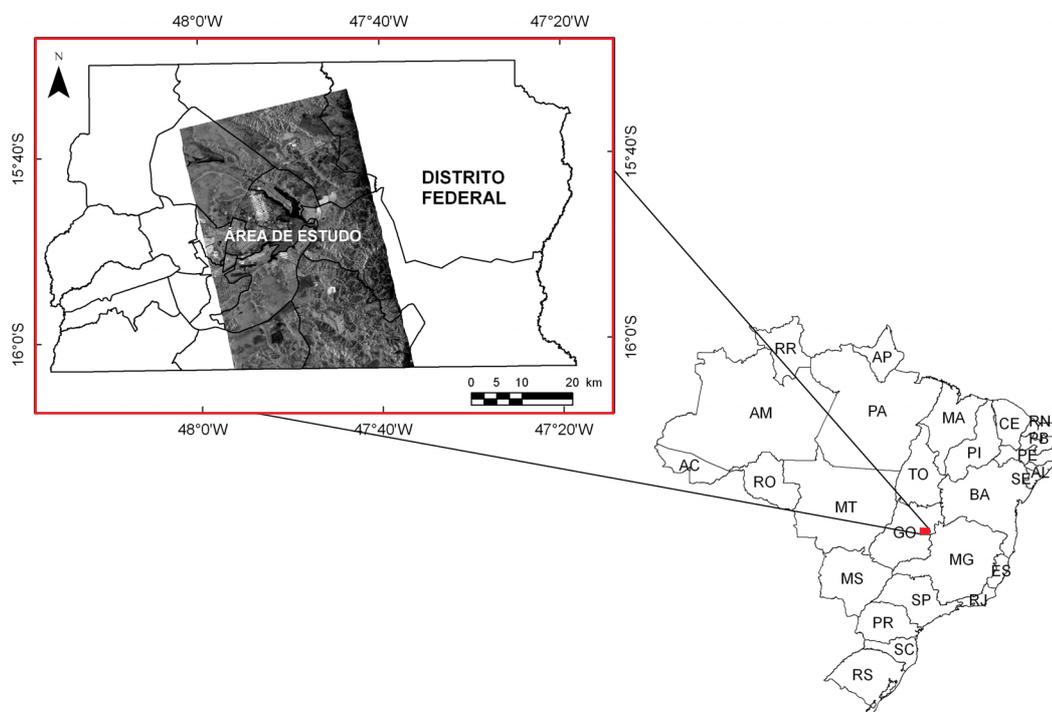


FIGURA 1. Localização da área de estudo no Distrito Federal, mostrada por meio de uma imagem do satélite ALOS PALSAR (banda L, polarização HH) de 25 de abril de 2007. Linhas contínuas representam os limites das regiões administrativas do Distrito Federal.

MATERIAL E MÉTODOS

MATERIAL

Neste estudo, foram analisadas imagens com múltipla polarização em amplitude do ALOS PALSAR, órbita ascendente 6651, ponto 6870, no seguinte modo de imageamento: banda L (comprimento de onda de 23,6 cm), quatro polarizações (HH, HV, VH e VV) e tamanho do pixel de 12,5 m. A área imageada foi de aproximadamente 35 km x 65 km. O satélite ALOS foi lançado pela Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA) em 24 de janeiro de 2006 e descreve uma órbita circular e heliossíncrona a 692 km de altitude, com um período de revisita de 46 dias (IBGE, 2008). O PALSAR corresponde a um radar imageador de abertura sintética que opera com resoluções espaciais que variam entre 10 a 100 m e possui três modos de imageamento: fino, ScanSAR e polarimétrico (Igarashi, 2001).

MÉTODOS

A imagem original, com resolução radiométrica de 16 bits, foi convertida para coeficientes de retroespalhamento – σ° , seção cruzada de radar que é refletida pelo alvo e que retorna para a antena por unidade de área; unidade em dB, decibéis (Henderson & Lewis, 1998; Jensen, 2000) – por meio do aplicativo ASF MapReady 1.0 (Alaska Satellite Facility, 2009) e georreferenciada para o sistema de projeção UTM, *datum* = WGS84 e zona 23S. No processo de conversão para σ° , foram utilizados modelos digitais de elevação do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) do DF, com resolução espacial de 90 m (Van Zyl, 2001; NASA, 2009), para o georreferenciamento e correção de efeitos topográficos.

Com base em trabalhos anteriores (CODEPLAN, 1984; Araújo Filho et al., 2007; Ferreira et al., 2007) e nos conhecimentos de campo dos autores, foram extraídas 30 amostras de valores de σ° nas polarizações HH, HV e VV em cada uma das seguintes categorias representativas de uso e cobertura de terras do DF: Áreas Urbanas consolidadas; Áreas Urbanas em consolidação; Campos; Cerrado Típico; Culturas Agrícolas; Matas Indiscriminadas; Mata de Galeria; Pastagens Cultivadas; Reflorestamentos; e Reservatórios. Na classe Campos, foram incluídas as fitofisionomias Campo Limpo, Campo Sujo e Cerrado Ralo, agrupadas por apresentarem acentuada similaridade em termos de estrutura e biomassa (Ribeiro & Walter, 2008). Cada amostra foi composta por 64 pixels.

Em seguida, foram obtidas as médias aritméticas simples e os correspondentes desvios-padrões de cada conjunto de 30 amostras e para cada polarização e analisados por meio de um pacote estatístico de

agrupamento hierárquico (*hierarchical cluster analysis*) (Dillon & Goldstein, 1984; Moita Neto & Moita, 1998). A premissa é de que as diferenças nas médias aritméticas dos alvos estejam relacionadas com diferenças na intensidade de energia retroespalhada e a diferença nos valores de desvios-padrões estejam relacionadas com diferenças na textura dos alvos. Amostras com valores de σ° superiores a dois desvios-padrões não foram incluídas nessa estatística multivariada, cujo resultado normalmente é apresentado na forma de dendrogramas. Com isso, o intérprete consegue identificar, visualmente, grupos de classes temáticas similares.

Uma composição colorida RGB/HH-HV-VV foi gerada e processada por meio da técnica de segmentação de imagens por crescimento de regiões, disponível no aplicativo SPRING 4.0 (Câmara et al., 1996), para produzir o mapa de uso e cobertura de terras da área de estudo. A segmentação consiste em agrupar pixels com características espectrais similares (Earthal et al., 1991). Por meio dessa técnica, são delimitadas áreas espectralmente uniformes com base na definição, por parte do analista, de valores de similaridade e de área. A similaridade refere-se ao valor abaixo do qual duas classes são consideradas similares. O valor de área corresponde ao número de pixels necessários para que uma área ou polígono seja individualizada. Não existem valores ideais de similaridade e área, pois dependem basicamente das características da área e dos objetivos de estudo. Nesta pesquisa foram utilizados os valores de limiar e similaridade iguais a 25.

Os polígonos gerados pela segmentação de imagens foram convertidos para o formato *shape* e exportados para o aplicativo ArcView GIS 3.2™. A rotulação de classes de cobertura de terras de cada polígono foi feita diretamente no monitor da tela de computador, sobrepondo-se a composição colorida da imagem PALSAR com o mapa vetorial de segmentação em uma escala de visualização de aproximadamente 1:50.000. Polígonos com dimensões inferiores a 40 hectares foram englobados na classe adjacente maior. Para subsidiar a interpretação de imagens, foi definida uma chave de interpretação em que foram considerados os elementos espectrais (cores), texturais e padrões geométricos.

A última etapa desse estudo foi a análise da exatidão de mapeamento, conduzida com base na verificação em campo de 86 pontos de amostragem. A campanha de campo foi realizada nos dias 11 e 12 de fevereiro de 2009. A exatidão de mapeamento fornece a confiabilidade do mapa temático confeccionado. A sua análise é normalmente realizada por meio de

matrizes de confusão, expressos em termos de índices de exatidão global (EG), Kappa (K) ou Tau (τ). Brites et al. (1996) e Figueiredo & Vieira (2007), ao avaliarem a eficácia desses três índices, indicaram que a EG tende a apresentar índices mais altos em relação aos outros dois e que a diferença entre os índices K e τ é pequena. Além disso, K e τ são mais consistentes que a EG por envolverem, no índice final, todas as células da matriz de confusão. Em relação aos índices K e τ , o último é mais fácil de se calcular e interpretar (Ma

& Redmond, 1995), sendo, portanto, o índice utilizado nesse estudo. Ele é obtido por meio da seguinte relação:

$$\tau = \frac{\text{observado} - 1/m}{1 - 1/m} \quad (1)$$

em que, *observado* = valor global da percentagem correta, ou seja, o somatório dos elementos presentes na diagonal da matriz de confusão, dividido pelo total de elementos; e *m* = número de categorias.

APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Na Figura 2, são mostrados os valores do retroespalhamento amostrados para as dez classes de uso e cobertura da terra mais representativas da área de estudo. Os coeficientes de retroespalhamento foram bastante similares para as polarizações HH e VV, com uma ligeira tendência da polarização HH em apresentar valores de σ° maiores. Entretanto, os valores para a polarização HV foram significativamente menores em relação às polarizações paralelas. De uma forma geral, os coeficientes mais baixos foram encontrados sobre os Reservatórios (-17 dB para as polarizações paralelas HH e VV e -28 dB para a polarização HV), enquanto os coeficientes mais altos estiveram associados com Áreas Urbanas consolidadas (-2,45 dB, polarização HH; -5,28 dB, polarização VV; -11,36 dB, polarização HV). Os baixos valores sobre os Reservatórios são explicados pelo predomínio da reflexão especular da radiação incidente, e os altos valores sobre as Áreas Urbanas são decorrentes do predomínio das reflexões

de canto associadas com a presença de edificações (prédios e residências).

Os resultados da análise de agrupamento hierárquico são apresentados na Figura 3. Nessa figura, é mostrado o dendrograma relativo à similaridade de classes de cobertura de terras representativas da área de estudo. Percebe-se uma clara possibilidade de separar massas d'água de outras classes terrestres. De fato, os reservatórios são identificados em imagens de radar pelos seus baixos valores de amplitude e pela textura lisa (Lewis, 1998). Em relação aos alvos terrestres da área de estudo, os seguintes grupos espectrais foram formados, em ordem decrescente de similaridade: Pastagens Cultivadas e Campos; Reflorestamentos e Mata de Galeria; e Cerrado Típico e Matas Indiscriminadas. Culturas Agrícolas, Áreas Urbanas consolidadas e Áreas Urbanas em consolidação não apresentaram confusão espectral com outras categorias.

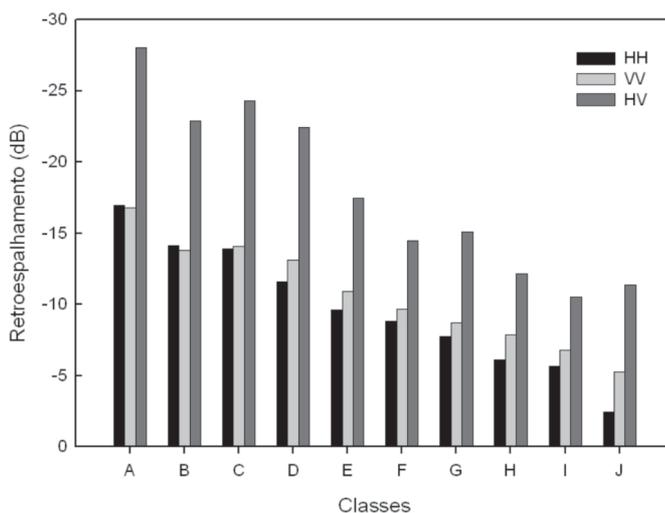


FIGURA 2. Valores médios de coeficientes de retroespalhamento (dB) de 10 classes de cobertura de terras representativas do Distrito Federal nas polarizações HH, HV e VV da imagem ALOS PALSAR, modo polarimétrico, de 25 de abril de 2007. A = Reservatórios; B = Pastagens Cultivadas; C = Campos; D = Culturas Agrícolas; E = Áreas Urbanas em consolidação; F = Matas Indiscriminadas; G = Cerrado Típico; H = Reflorestamentos; I = Mata de Galeria; e J = Áreas Urbanas consolidadas.

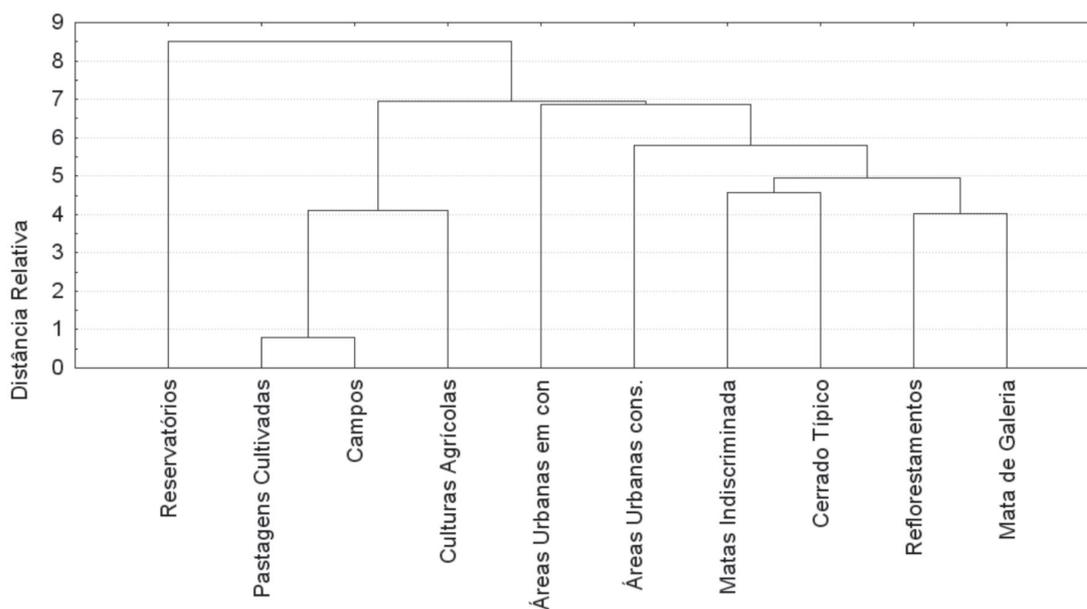


FIGURA 3. Dendrograma obtido da análise de agrupamento hierárquico utilizando como variáveis as polarizações HH, HV e VV do satélite ALOS PALSAR do Distrito Federal.

Na Figura 4 é apresentado o mapa final de uso e cobertura da terra da área de estudo. Foi identificado um ligeiro predomínio de áreas ocupadas por classes de cobertura vegetal natural (57%) em relação às de uso da terra (41%). Conforme mostra a Tabela 1, as classes de uso e cobertura da terra mais representativas foram o Cerrado Típico, que cobre 22% da área teste e ocorre ao longo de toda a área de estudo; as Áreas Urbanas consolidadas, que ocupam 16%; e os Campos, que abrangem 15% e também ocorrem ao longo de toda a região analisada. As Pastagens Cultivadas e a Mata de Galeria também aparecem com destaque, ambas com 13%. Matas Indiscriminadas, Áreas Urbanas em consolidação, Culturas Agrícolas, Reservatórios e Reflorestamentos aparecem com porcentagens relativamente baixas: 7%, 5%, 4%, 3% e 2%, respectivamente.

As confusões espectrais foram mais acentuadas para Culturas Agrícolas e para o Cerrado Típico (erros de comissão de 100% e 111%, respectivamente). Algumas áreas interpretadas como Culturas Agrícolas na imagem de 2007 eram, na realidade, áreas de Pastagens Cultivadas, Campos e Cerrado Típico. Da

mesma forma, algumas áreas tidas como Cerrado Típico eram Áreas Urbanas em consolidação, Pastagens Cultivadas, Campos e Matas Indiscriminadas. Reflorestamentos e Reservatórios não apresentaram confusão espectral com nenhum outro alvo.

Na Tabela 2 é apresentada a análise da precisão do mapeamento temático, representada pelo índice τ . De um conjunto de 86 pontos verificados em campo, 63 foram mapeamentos corretamente, resultando em um índice τ de 70%. Esse índice relativamente baixo deve ser considerado com certa ressalva principalmente por causa da complexidade da paisagem do Cerrado, da defasagem entre a data de passagem do satélite e a campanha de campo e da acentuada dinâmica espacial e temporal de uso e ocupação da área de estudo. Conforme ressaltado por Prado (2009), um outro aspecto que deve ser levado em consideração é a finalidade do mapeamento. Por exemplo, caso a finalidade seja o mapeamento de remanescentes de cobertura vegetal natural da área de estudo, em que as classes são agrupadas em áreas antrópicas, áreas naturais e reservatórios, o índice τ aumenta significativamente, passando para 84%.

DISCUSSÃO

Os resultados obtidos por esse estudo de mapeamento de uso e cobertura da terra com imagens de radar na banda L e múltipla polarização indicam boas possibilidades de discriminar fitofisionomias do Cerrado e suas classes de uso da terra associadas. A

imediate discriminação entre massas d'água e demais classes temáticas confirmam o potencial dessas imagens para aplicações envolvendo mapeamento de cursos d'água e reservatórios e monitoramento de níveis de água e áreas inundáveis.

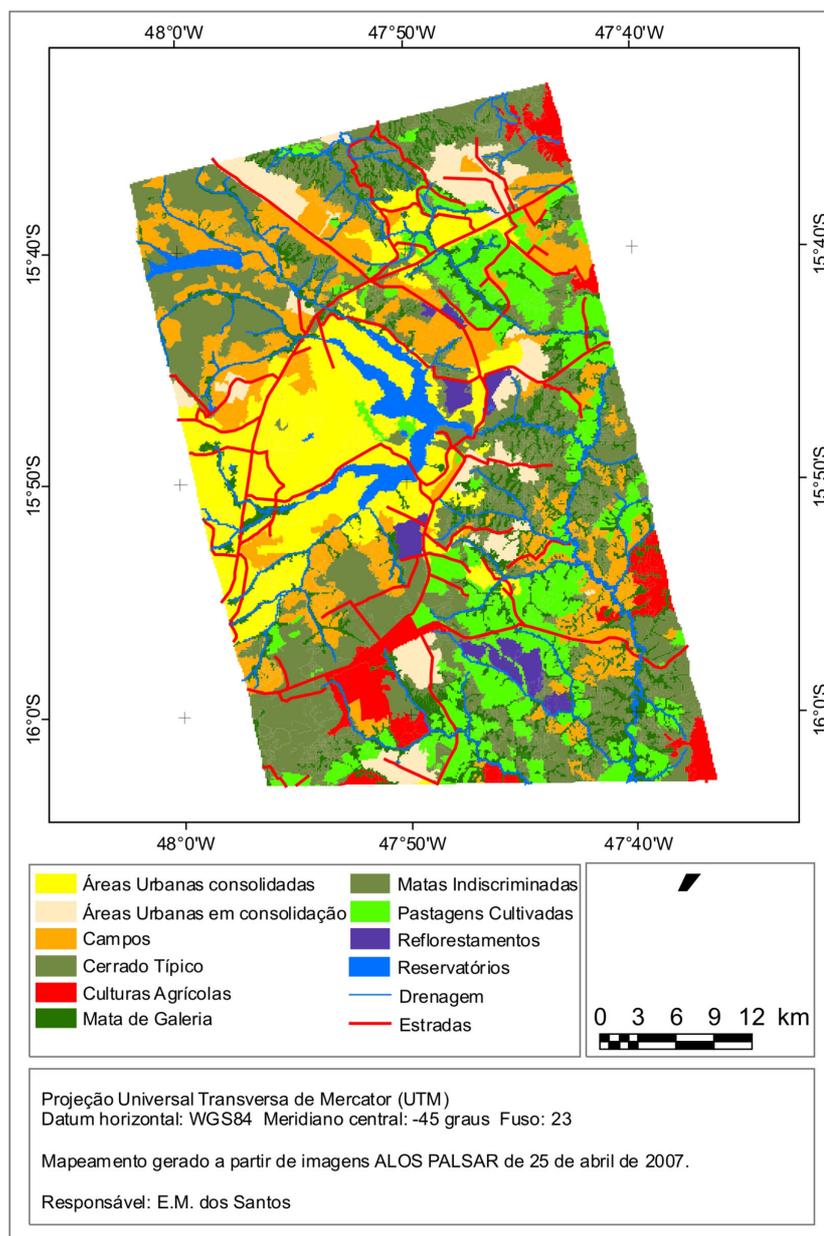


FIGURA 4. Mapa de uso e cobertura da terra da área de estudo, obtida a partir da interpretação de imagens do ALOS PALSAR de 25 de abril de 2007.

TABELA 1. Cálculo de áreas do Distrito Federal por classes de uso e cobertura da terra da área ocupada pela imagem ALOS PALSAR de 25 de abril de 2007

Classe	Área (hectares)	Porcentagem (%)
Áreas Urbanas consolidadas	29.950	16
Áreas Urbanas em consolidação	9.884	5
Campos	27.918	15
Cerrado Típico	39.990	22
Culturas Agrícolas	7.653	4
Mata de Galeria	23.423	13
Matas Indiscriminadas	12.131	7
Pastagens Cultivadas	23.548	13
Reflorestamentos	3.339	2
Reservatórios	4.668	3
TOTAL	182.503	100

TABELA 2. Matriz de erros de mapeamento de cobertura de terras da área de estudo.

Interpretação de Imagem													
	AUC	AUE	CUL	PAS	REF	CAM	CTI	MIN	MGA	RES	TOT	% EO	% EC
AUC	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	6	17	0
AUE	0	5	0	1	0	0	1	0	0	0	7	29	0
CUL	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	4	0	100
PAS	0	0	2	18	0	2	5	1	0	0	28	36	4
REF	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	5	0	0
CAM	0	0	1	0	0	8	2	0	0	0	11	27	55
CTI	0	0	1	0	0	3	5	0	0	0	9	44	111
MIN	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	5	40	40
MGA	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	6	17	0
RES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0
TOT	5	5	8	19	5	14	15	5	5	5	86		

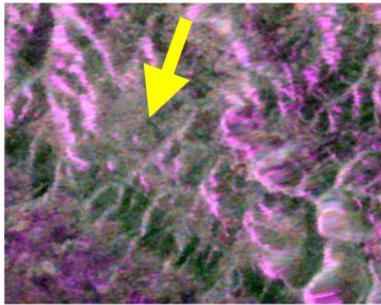
AUC = Áreas Urbanas consolidadas; AUE = Áreas Urbanas em consolidação; CUL = Culturas Agrícolas; PAS = Pastagens Cultivadas; REF = Reflorestamentos; CAM = Campos; CTI = Cerrado Típico; MIN = Matas Indiscriminadas; MGA = Mata de Galeria; RES = Reservatórios; TOT = Total; EO = Erros de omissão; EC = Erros de comissão.

O agrupamento espectral e textural de Pastagens Cultivadas com Campos, Reflorestamentos com Mata de Galeria e Cerrado Típico com Matas Indiscriminadas sugerem que dados de amplitude (quantidade de energia que é retroespalhada por diferentes alvos) e de textura, *per si so*, não são suficientes para discriminar todos os alvos presentes na área de estudo. Portanto, dados adicionais devem ser incorporados para refinar o mapeamento proposto. Nesse estudo, a incorporação do componente geométrico (forma) das imagens foi de grande auxílio na discriminação de classes de uso e cobertura da terra.

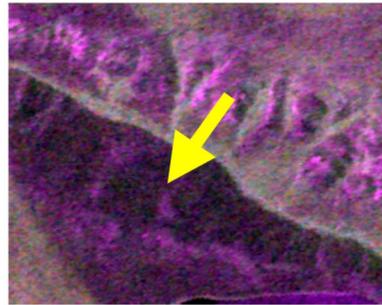
Conforme ilustra a Prancha 1, Pastagens Cultivadas e Campos apresentaram coloração magenta escura e textura lisa, decorrentes da baixa densidade de cobertura vegetal, isto é, predomínio de espécies graminosas, com ou sem presença de arbustos e ausência de espécies arbóreas, mas puderam ser separadas com base na geometria: regular para a primeira e irregular para a segunda. Reflorestamentos e Mata de Galeria também apresentaram colorações semelhantes (cinza esbranquiçada), mas foram separadas novamente pelo critério de forma: regular para a cobertura vegetal antrópica e alongada, acompanhando as redes de drenagem, para a cobertura natural. De fato, reflorestamentos são facilmente reconhecidos nas imagens do PALSAR não só pela coloração esbranquiçada, resultado do elevado retroespalhamento nas três polarizações, e pela textura lisa e homogênea, típicas de monoculturas, mas também pela sua forma geométrica bem definida. A maior parte da biomassa total em reflorestamentos de *Pinus* e *Eucalyptus* é proveniente de troncos e galhos verticais e retilíneos, o que provoca uma forte reflexão nos sinais de radar (Leckie & Ranson, 1998).

Cerrado Típico também foi separado de Matas Indiscriminadas pelo critério da forma geométrica. No DF, o Cerrado Típico ocorre predominantemente ao longo de chapadas (platôs), em áreas com densidade de drenagem relativamente baixa, enquanto as Matas Indiscriminadas ocorrem predominantemente em relevos acidentados, com densidade de drenagem relativamente elevada. Cerrado Típico é caracterizado por apresentar árvores de pequeno porte, irregulares e retorcidas em meio ao substrato herbáceo e arbustivo (Ribeiro & Walter, 2008), enquanto, nas Matas Indiscriminadas, predominam as formações florestais do Cerradão e da Mata Seca. Embora as densidades de cobertura vegetal entre essas duas fitofisionomias aparentemente sejam distintas, a presença mais acentuada de sombreamento nas imagens de radar com visada lateral sobre as áreas de Matas Indiscriminadas pode ter sido o responsável pela confusão espectral demonstrada no dendrograma.

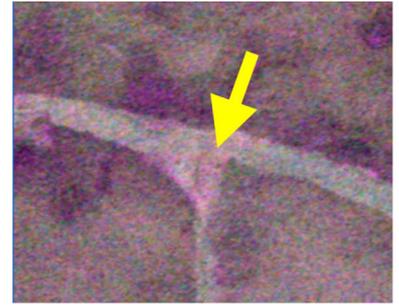
As Áreas Urbanas consolidadas e os dois reservatórios artificiais da área de estudo – lago Paranoá e represa de Santa Maria – apresentaram dois padrões espectrais notavelmente contrastantes. As variações dos coeficientes de retroespalhamento atingiram magnitude da ordem de -9 dB na polarização HH e de -12 dB na polarização VV. Para a primeira classe, a diferença está relacionada com a orientação das construções (casas e edifícios) em relação à direção de iluminação. Quando a orientação é preferencialmente perpendicular à direção de iluminação dos pulsos de radar, a coloração é magenta, pois o retroespalhamento é maior nas polarizações paralelas (HH – canal vermelho; e VV – canal azul). Quando a orientação é aproximadamente paralela aos pulsos de



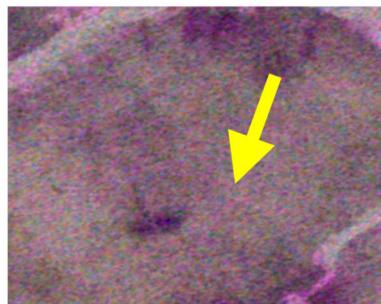
(a) Cor: cinza esbranquiçada;
Textura: média; Forma: irregular
associada com topografia acidentada



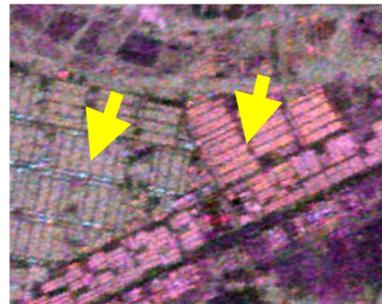
(b) Cor: magenta; Textura: lisa;
Forma: regular



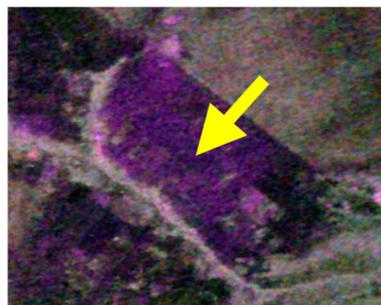
(c) Cor: cinza esbranquiçada;
Textura: lisa; Forma: alongada



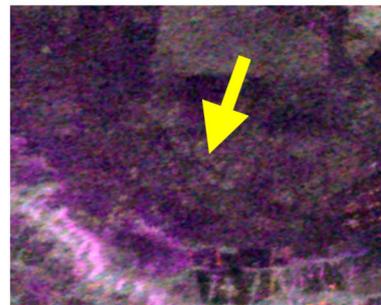
(d) Cor: cinza esbranquiçada;
Textura: média; Forma: irregular



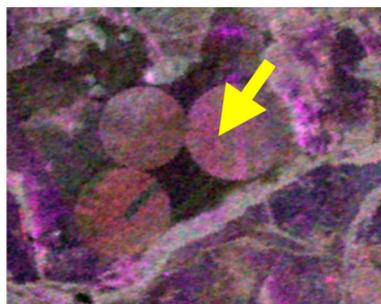
(e) Cor: cinza esverdeada e rósea;
Textura: rugosa; Forma: regular



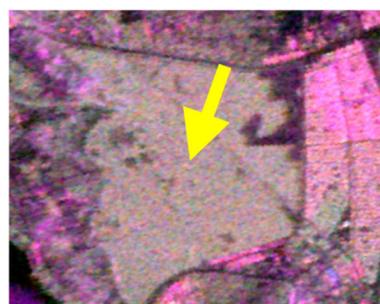
(f) Cor: magenta; Textura: lisa;
Forma: regular



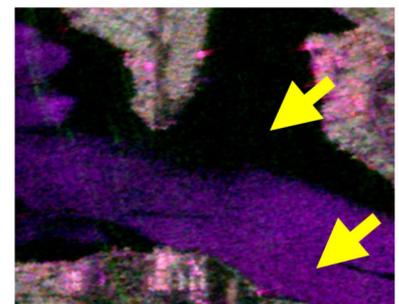
(g) Cor: magenta; Textura: média;
Padrão: irregular



(h) Cor: rósea; Textura: lisa;
Padrão: regular



(i) Cor: cinza esbranquiçada;
Textura: lisa; Padrão: regular



(j) Cor: preta e roxa; Textura: lisa;
Padrão: irregular

PRANCHA 1. Chave de interpretação construída com base na análise visual de composição colorida RGB/HH-HV-VV da imagem ALOS PALSAR da área de estudo e envolvendo as seguintes categorias de cobertura de terras: (a) Matas Indiscriminadas, (b) Campos, (c) Mata de Galeria, (d) Cerrado Típico, (e) Áreas Urbanas consolidadas, (f) Pastagens Cultivadas, (g) Áreas Urbanas em consolidação, (h) Culturas Agrícolas, (i) Reflorestamentos e (j) e Reservatórios. As Áreas Urbanas consolidadas e os Reservatórios mostram dois padrões espectrais distintos.

radiação, as intensidades de retroespalhamento nas três polarizações são próximas, conferindo então uma coloração cinza esverdeada.

As Áreas Urbanas em consolidação também foram identificadas pelo padrão tonal magenta e pelo padrão reticular típico de áreas urbanas, mesmo que ainda em fase relativamente incipiente. Nas Áreas Urbanas em consolidação, as formas geométricas mais irregulares, a definição do sistema viário, a delimitação de quadras e a própria definição dos limites dos condomínios já são mais imprecisas em relação às Áreas

Urbanas consolidadas. As Culturas Agrícolas, na época, formadas por restos de palhada seca e com elevada porcentagem de solo exposto, apresentaram padrão tonal róseo. Na área de estudo, foram identificadas cinco áreas com sistema de irrigação por pivô-central, cujas áreas variaram de 60 a 120 hectares. A textura e a cor dessas áreas irrigadas por pivô-central mantêm o mesmo padrão das áreas com culturas agrícolas de sequeiro, mas o que é determinante para a identificação dessas áreas é a geometria circular característica desse tipo de equipamento.

CONCLUSÕES

As imagens do ALOS PALSAR, obtidas na banda L e com múltipla polarização, mostraram-se eficientes para a identificação de classes de uso e cobertura da terra representativas do Distrito Federal.

O uso de técnicas como classificação supervisionada ou não-supervisionada de imagens ou de uma outra técnica qualquer que consideram apenas informa-

ções espectrais (dados de amplitude para o caso das imagens do ALOS PALSAR) não foram suficientes para discriminar todas as referidas classes.

A incorporação de dados texturais e de formas geométricas típicas de cada alvo melhorou substancialmente a discriminação de classes de uso e cobertura da terra da área de estudo.

AGRADECIMENTOS

Esse estudo teve apoio financeiro do projeto 471435/2006-6 (CNPq/Edital Universal). Os autores são gratos a Heleno S. Bezerra, pelo auxílio nas pesquisas de campo e aos revisores anônimos que contribuíram significativamente para a melhoria do artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALASKA SATELLITE FACILITY. **MapReady 1.0**. Disponível em: <http://www.asf.alaska.edu/sardatacenter/softwaretools>. Acessado em: 15jan2009.
2. ARAÚJO FILHO, M. DA C.; MENESES, P.R.; SANO, E.E. Sistema de classificação de uso e cobertura da terra com base em imagens de satélite. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 2, p. 171-179, 2007.
3. BEZERRA, H. DA S.; SANO, E.E.; FERREIRA, L.G. Desempenho do satélite sino-brasileiro de recursos terrestres CBERS-2 no mapeamento da cobertura da terra no Distrito Federal, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 2, p. 171-185, 2007.
4. BRITES, R.S.; SOARES, V.P.; RIBEIRO, C.A.A.S. Verificação da exatidão em classificações de uma imagem orbital mediante a utilização de três índices. **Revista Árvore**, v. 20, p. 415-424, 1996.
5. CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computer & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.
6. CHAVES, J.M.; SANO, E.E.; GUIMARÃES, E.M.; SILVA, A.B.; MENESES, P.R. Sinergismo entre dados ópticos e de radar para o estudo geológico na região de Bezerra-Cabeceiras, Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2 - Suplemento, p. 137-146, 2003.
7. CODEPLAN – COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. **Atlas do Distrito Federal**. Brasília: CODEPLAN, v. 1, 1984.
8. DILLON, W.R. & GOLDSTEIN, M. **Multivariate analysis. Methods and Applications**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 587 p., 1984.
9. DOBSON, M.C.; ULABY, F.T.; PIERCE, L.E. Land-cover classification and estimation of terrain attributes using synthetic aperture radar. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 199-214, 1995.
10. EARTHAL, J.G.; FONSECA, L.M.; BINS, L.S.; VELASCO, F.R.; MONTEIRO, A.M. **Um sistema de segmentação e classificação de imagens de satélite**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 4, 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Computação, 1991, p. 14-17.
11. FERREIRA, M.E.; FERREIRA, L.G.; SANO, E.E.; SHIMABUKURO, Y.E. Spectral linear mixture modelling approaches for land cover mapping of tropical savanna areas in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 413-429, 2007.
12. FIGUEIREDO, G.C. & VIEIRA, C.A.O. Estudo do comportamento dos índices de exatidão global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p. 5755-5762.
13. HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. **Principles and Applications of Imaging Radar**. Manual of Remote Sensing. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 3ª ed., v. 2, 866 p., 1998.

14. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 1995-1996**. Rio de Janeiro: IBGE, n. 25 (Goiás), 264 p., 1997.
15. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **SIDRA**. Banco de Dados Agregados. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/>. Acessado em: 21dez2007.
16. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Imagens ALOS/PALSAR**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/alos/>. Acessado em: 20dez2008.
17. IGARASHI, T. ALOS mission requirements and specifications. **Advances in Space Research**, v. 28, n. 1, p. 127-131, 2001.
18. JENSEN, J.R. **Remote Sensing of the Environment**. An Earth Resources Perspective. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc., 544 p., 2000.
19. LECKIE, D.G. & RANSON, K.J. Forest applications using imaging radar. In: HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. (Eds). **Principles and Applications of Imaging Radar**. Manual of Remote Sensing, Nova Iorque: John Wiley & Sons, 3ª ed., v. 2, Cap. 9, p. 435-509, 1998.
20. LEWIS, A.J. Geomorphic and hydrologic applications of active microwave remote sensing. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. (Eds.), **Principles and Applications of Imaging Radar**. Manual of Remote Sensing, Nova Iorque: John Wiley & Sons, 3ª ed., v. 2, Cap. 11, p. 567-629, 1998.
21. MA, Z. & REDMOND, R.L. Tau coefficients for accuracy assessment of classifications of remote sensing data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 61, n. 4, p. 435-439, 1995.
22. MOITA NETO, J.M. & MOITA, G.C. Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados. **Química Nova**, v. 21, n. 4, p. 467-469, 1998.
23. MORAN, M.S.; HYMER, D.C.; QI, J.; KERR, Y. Comparison of ERS-2 SAR and Landsat TM imagery for monitoring agricultural crop and soil conditions. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, p. 243-252, 2002.
24. NASA. Jet Propulsion Laboratory. **Shuttle Radar Topography Mission**. The mission to map the world. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Acessado em: 15jan2009.
25. PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E.S.P. Radares imageadores nas Geociências: estado da arte e perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 56-62, 2005.
26. PRADO, F.M. **Sistema hierárquico de classificação para mapeamento da cobertura da terra nas escalas regional e urbana**. Presidente Prudente, 2009. 164 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartografias) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.
27. RANEY, R.K. Radar fundamentals: technical perspective. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. (Eds), **Principles and Applications of Imaging Radar**. Manual of Remote Sensing. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 3ª ed., v. 2, Cap. 2, p. 9-130, 1998.
28. RIBEIRO, J.F. & WALTER, B.M.T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P.; RIBEIRO, J.F. (Eds), **Cerrado. Ecologia e Flora**. Brasília: Embrapa Cerrados e Embrapa Informação Tecnológica, Cap. 6, p. 153-212, 2008.
29. RIGNOT, E.; SALAS, W.A.; SKOLE, D.L. Mapping deforestation and secondary growth in Rondônia, Brazil, using imaging radar and Thematic Mapper data. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 167-179, 1997.
30. SANO, E.E.; FERREIRA, L.G.; HUETE, A.R. Synthetic aperture radar (L-band) and optical vegetation indices por discriminating the Brazilian savanna physiognomies: a comparative analysis. **Earth Interactions**, v. 9, Paper no. 15, p. 1-15, 2005 (a).
31. SANO, E.E.; LIMA, J.E.F.W.; SILVA, E.M.; OLIVEIRA, E.C. Estimativa da variação na demanda de água para irrigação por pivô-central no Distrito Federal entre 1992 e 2002. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 508-515, 2005 (b).
32. Van ZYL, J.J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, v. 48, n. 5-12, p. 559-565, 2001.

*Manuscrito Recebido em: 30 de agosto de 2009
Revisado e Aceito em: 6 de janeiro de 2010*

