

# **Sensoriamento remoto na análise e caracterização de recursos florestais em ecossistemas tropicais**

## ***Remote sensing the characterization and analysis of forest resources in tropical ecosystems***

Gustavo Manzon Nunes<sup>1</sup>  
Ronaldo Drescher<sup>1</sup>  
Diego Tyszka<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais,  
da Faculdade de Engenharia Florestal/ Universidade Federal de Mato  
Grosso. Cuiabá, MT, CEP 78060-900. E-mail: [gustavomn@gmail.com](mailto:gustavomn@gmail.com);  
[ronaldodrescher@gmail.com](mailto:ronaldodrescher@gmail.com); [diegotyszka@hotmail.com](mailto:diegotyszka@hotmail.com).

## RESUMO      **ABSTRACT**

A caracterização de ecossistemas e sua biodiversidade, em especial relacionando-se à sua cobertura vegetal, tem sido alvo de amplos estudos envolvendo a investigação de seus processos ecológicos-evolutivos e o seu funcionamento como um conjunto integrado e complexo de unidades biológicas.

O desenvolvimento de tecnologias e metodologias no campo do Sensoriamento Remoto, cada vez mais vem se tornando essencial na análise, discriminação e monitoramento de vastas áreas dominadas pela Floresta Tropical. Deste modo, ao longo deste artigo, objetiva-se apresentar as particularidades envolvendo estudos com Sensoriamento Remoto aplicado aos recursos florestais, compreendendo as técnicas usuais e métodos avançados utilizados para o mapeamento e classificação da cobertura vegetal, demonstrando também resultados de projetos já desenvolvidos ao longo das últimas décadas.

*The characterization of ecosystems and their biodiversity, particularly relating to the vegetation cover, has been the subject of several studies involving the investigation of its ecological-evolutional processes and its dynamics as an integrated and complex set of biological units. The development of Remote Sensing technologies and methodologies is becoming increasingly essential in the analysis and monitoring of vast areas dominated by the Tropical Forest. Thus, throughout this article, we report the special studies involving Remote Sensing applied to forestry resources, including the usual technical and advanced methods used to mapping and classification of vegetation, also demonstrating results projects developed over the past decades.*

## **PALAVRAS-CHAVE      KEY-WORDS**

geotecnologias  
vegetação  
processamento digital de imagens

*geotechnologies  
vegetation  
digital image processing*

## INTRODUÇÃO

O grande interesse em estudos ligados ao manejo e monitoramento dos recursos florestais vem aumentando a demanda por mapeamentos da cobertura vegetal, em escalas regionais ou até mesmo globais, tendo como um dos principais meios o sensoriamento remoto orbital e sub-orbital, conjuntamente com as informações de verdade terrestre.

O conhecimento da distribuição dos tipos de cobertura vegetal e suas variações fenológicas são hoje um aspecto indispensável para o planejamento de uma política coerente e eficiente de desenvolvimento sustentável, assim como para a compreensão e avaliação objetiva de diferentes ecossistemas. A análise das variações fenológicas em nível regional e sua interligação com os diferentes componentes do meio geográfico (clima, solo, relevo e geologia) formam parte das informações necessárias para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas em escala global.

Nos últimos anos, estudos relacionados à fenologia tiveram um aumento na importância devido ao contexto de mudanças climáticas. Estas mudanças podem alterar o início das fases fenológicas, como o período de crescimento da vegetação, e a distribuição de plantas e animais. Por outro lado, mudanças fenológicas da vegetação, como as mudanças na amplitude da distribuição de espécies, podem ser utilizadas como parâmetros para se entender as mudanças climáticas (MENZEL *et al.*, 2001).

A característica multiespectral da maioria dos dados de sensoriamento remoto, considerando análises da cobertura vegetal, proporciona a vantagem de gerar novas imagens através de transformações matemáticas. Essas novas imagens geradas representam uma alternativa para apresentação das informações de diferentes maneiras. Essas transformações podem realçar informações que não são muito visíveis nas imagens originais ou podem preservar o conteúdo das informações (para uma determinada aplicação) com um número reduzido de bandas transformadas. Para o estudo da vegetação, o índice de vegetação e o modelo de mistura espectral são as transformações mais amplamente utilizadas em várias aplicações (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Por outro lado, a caracterização e a extensão da cobertura vegetal pode ser analisada por dados obtidos por Sensores SAR (*Synthetic Aperture Radar*), sendo estes não suscetíveis a condições atmosféricas adversas, resolvendo assim o problema da cobertura de nuvens em imagens adquiridas remotamente, tendo sido cada vez mais utilizados no estudo de florestas. Dados de radar contêm informações relacionadas com as propriedades biofísicas da vegetação, principalmente sobre sua estrutura e conteúdo hídrico. No entanto, existem barreiras para a difusão da tecnologia devido a dificuldade de interpretação de dados de radar, que registram as informações de alvos terrestres através da interação das microondas, diferentemente do que a vemos em dados ópticos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO E DE DOSSÉIS VEGETAIS

O comportamento espectral característico de uma folha fotossinteticamente ativa varia conforme o comprimento de onda proveniente dos raios solares que incidem sobre a mesma, como pode-se observar na Figura 1.

Segundo Knipling (1970), a resposta espectral da vegetação fotossinteticamente ativa possui uma região com uma alta absorção da radiação eletromagnética incidente - cerca de 90%. Este fato está relacionado com a presença de pigmentos de clorofilas (a e b) e carotenóides nas folhas. Quando a vegetação está verde e sadia, a clorofila é o pigmento responsável pelo comportamento espectral da planta na faixa do visível (*Visible* – VIS) ( $0.4 \mu\text{m}$  a  $0.7 \mu\text{m}$ ), que mostra absorção da radiação na região do azul ( $0,4 \mu\text{m}$  a  $0,5 \mu\text{m}$ ) e do vermelho ( $0,6 \mu\text{m}$  a  $0,7 \mu\text{m}$ ), e reflexão na região do verde ( $0,5 \mu\text{m}$  a  $0,6 \mu\text{m}$ ).

A quantidade de pigmentos de clorofila aumenta nos estágios iniciais de desenvolvimento da folha, aumentando mais lentamente nos estágios subsequentes, até a folha atingir a coloração verde, característica da espécie. Isto acarreta uma diminuição da reflectância na região do VIS com o aumento da idade de uma folha (KUMAR, 1972, apud WATZLAWICK, 2002).



a responder com uma diminuição da absorção nos comprimentos de onda citados acima, devido ao processo desidratação.

Os solos, a estrutura do dossel e aspectos de geometria de iluminação e de visada da cena têm sido alguns dos fatores citados como principais influenciadores na resposta espectral dos dosséis vegetais (JACKSON; PINTER, 1986; FORMAGGIO *et al.*, 1995).

O comportamento espectral das folhas é diferente do que em uma floresta (comunidade vegetal), devido a resposta espectral da última ser influenciada pelo solo, alterações da vegetação, fatores externos (iluminação, meteorológicos), estrutura do dossel, bem como o tipo de vegetação existente.

A estrutura do dossel vegetal é um importante determinante do seu comportamento espectral (propriedades absorptivas, refletivas, transmissivas e emissivas) (KIMES; KIRCHNER, 1983). Kimes e Kirchner (1983) e Bernardes (1987) afirmaram que a estrutura do dossel pode ser matematicamente descrita por parâmetros biofísicos, tais como: a distribuição das plantas no terreno, o índice de área foliar, a densidade espacial foliar e a distribuição angular das folhas (azimutal e de inclinação).

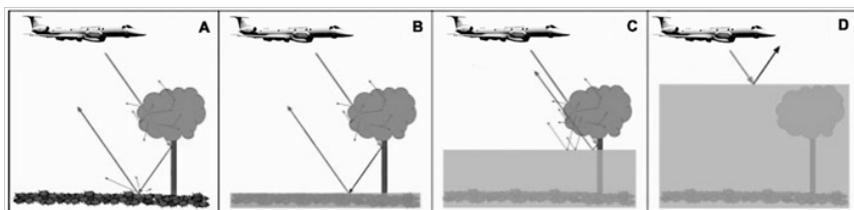
## **BASES TEÓRICAS PARA PESQUISAS COM DADOS RADAR E SUA INTERAÇÃO COM A VEGETAÇÃO**

O radar imageador é um sensor de rádio frequência que permite derivar informações sobre características físicas (geometria, forma) e elétricas dos alvos. A capacidade de prover imagens de elevada resolução espacial, de modo independente de condições atmosféricas e fonte solar, é particularmente importante para regiões como a Amazônia, onde a presença de chuvas, nuvens, bruma e fumaça impõem restrições ao uso de sensores ópticos. Além disso, o radar imageador é o único sensor remoto com penetrabilidade no dossel vegetal e oferece a capacidade adicional da polarimetria e interferometria (PARADELLA *et al.*, 2005).

Em estudos realizados em zonas tropicais com elevada cobertura vegetal, o sensoriamento remoto na faixa das microondas permite a obtenção de informações não somente das camadas superiores da vegetação (comprimentos de onda menores), mas também das camadas inferiores e do solo (comprimentos de onda maiores). Estudos sobre

a penetração das microondas em florestas tropicais foram realizados, por exemplo, por Imhoff *et al.* (1986), Aiba *et al.* (1988), Ulaby e Elachi (1990) e Wang *et al.* (1994).

O retroespalhamento total de alvos florestais pode incluir os mais variados mecanismos de espalhamento (Figura 2). De acordo com Henderson e Lewis (1998), estes mecanismos compreendem: (1) o retroespalhamento direto da copa, incluindo o espalhamento múltiplo dentro da copa (espalhamento volumétrico); (2) o retroespalhamento direto do tronco (geralmente pequeno); (3) o retroespalhamento direto do solo; (4) o retroespalhamento da interação copa-solo; e (5) o retroespalhamento da interação tronco-solo (*double bounce*). Segundo estes autores, a magnitude de cada componente de retroespalhamento irá depender do comprimento de onda do radar, da polarização, do ângulo de incidência e de uma grande diversidade de parâmetros do terreno e da vegetação. Assim, o entendimento destes fatores se torna essencial para a estimativa de parâmetros biofísicos através do emprego de dados SAR.

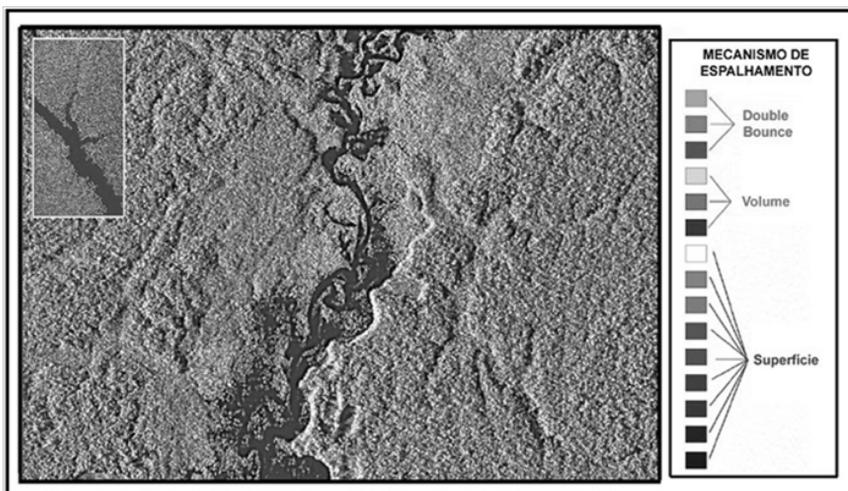


**Figura 2** - Mecanismos de espalhamento da Banda L em Floresta: A) Vegetação não alagada, interação tronco-solo e dossel (espalhamento volumétrico), B) Vegetação parcialmente alagada, interação tronco-água e dossel (Espalhamento “double-bounce”), C) Vegetação alagada, interação tronco-água e dossel (Espalhamento “double-bounce”), D) Vegetação submersa, Espalhamento superficial – reflexão especular.

Com o aumento da rugosidade na superfície, a quantidade de sinal especular é reduzida, ocorrendo um aumento na magnitude do sinal registrado pela antena, conhecido como componente retroespalhada (Figura 3). Quanto maior a quantidade de energia retroespalhada

por um alvo, mais claros são os níveis de cinza que o representam na imagem. A imagem de radar é, portanto, uma medida da componente de retroespalhamento do sinal. Visto que está relacionada à rugosidade do alvo, pode ser entendida como uma representação da rugosidade da superfície.

Recentemente, a extração de parâmetros biofísicos para estudos de ecossistemas tem sido o principal tema de investigação relacionado às aplicações florestais. O potencial do radar nestas aplicações se deve principalmente à capacidade de penetração das microondas no dossel e à sensibilidade do retroespalhamento ao conteúdo de água da vegetação (SUN; RANSON, 2002).



**Figura 3** - Composição RhdGvBhv – Área da RDS Amanã - Observa-se a reflexão especular na superfície d'água (superfícies lisas e com alta constante dielétrica). Ocorre predominância de espalhamento volumétrico em áreas com a presença da tipologia de Floresta de Terras Baixas e Terra Firme, situada em topografias mais elevadas. A componente de reflexão de canto ocorre nas áreas com predominância de Floresta de Várzea e Igarapé, sempre associada a proximidade dos igarapés. Fonte: Nunes (2009).

## ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Os índices de vegetação são combinações lineares de dados espectrais com o objetivo de realçar o sinal da vegetação, ao mesmo tempo em que minimizam as variações de irradiância solar e os efeitos do substrato no dossel vegetal (JACKSON; HUETE, 1991). A lógica por trás dos índices de vegetação (IVs) baseia-se no fato que a resposta fotossintética da vegetação, através da utilização de duas ou mais bandas espectrais, pode substancialmente minimizar “interferências” decorrentes do processo de imageamento que afetam a resposta de vegetação: (1) variações na irradiância solar, (2) efeitos atmosféricos, (3) contribuições da vegetação não fotossinteticamente ativa, (4) contribuições do substrato (ex. solo), e (5) efeitos da composição e estrutura do dossel.

No início, Jordan (1969) propôs a razão entre as medidas espectrais dos comprimentos de onda de 800 e 675 nm para a determinação do IAF em florestas. Essa relação entre comprimentos de onda do infravermelho próximo (*Near Infrared* – NIR) e do visível (*Visible* – VIS) ficou conhecida mais tarde como índice de vegetação da razão simples (RVI). Em seguida, Pearson e Miller (1972), utilizando um radiômetro portátil, concluíram que combinações algébricas das medidas espectrais de radiações do VIS e do NIR, em um dossel de gramínea, aumentaram a correlação entre a reflectância e a biomassa, ou seja, realçaram a resposta da vegetação em si.

Em seguida, surgiu o NDVI, com o trabalho de Rouse *et al.* (1973), que encontraram uma relação entre medidas espectrais de duas bandas que melhor resolvia o problema das interferências do solo na resposta da vegetação e, também, diminuía as influências da atmosfera e das variações sazonais do ângulo do Sol.

O NDVI é um índice que permite monitorar, em grande escala, o “vigor” da vegetação. Quanto mais exuberante a vegetação menor é a porcentagem de radiação vermelha refletida e maior a porcentagem de radiação infravermelha refletida pela mesma. Entretanto, este índice é bastante sensível às características do substrato da vegetação e, para contornar esse problema, uma série de novos índices foram propostos na última década (HUETE *et al.* 2002).

Vários trabalhos associam as variações de precipitação aos valores de NDVI como indicador do vigor da vegetação. Os valores de NDVI tendem a aumentar em anos chuvosos, com o aumento da densidade e vigor da vegetação, diminuindo consideravelmente em anos secos. Gurgel (2000) estudou as conexões entre o NDVI e as variabilidades climáticas anual e interanual no Brasil e conseguiu identificar sete grandes tipos de cobertura vegetal, revelando sua variabilidade anual e interanual e o lapso de reação dos diferentes biomas à precipitação. A aplicação de técnicas de Análise por Componentes Principais (ACP) aos valores de NDVI demonstrou a importância da disponibilidade de dados orbitais com resolução espacial moderada e alta frequência temporal para a diferenciação de grandes feições da vegetação do território brasileiro.

Em função do impacto do solo sobre os valores do NDVI, Huete (1996) propôs o EVI (*Enhanced Vegetation Index* – Índice de Vegetação Realçado) com o objetivo de reduzir o efeito do substrato.

O EVI é um índice otimizado em relação aos outros IVs e oferece uma redução dos fatores principais que interferem na discriminação da cobertura vegetal. Este índice, tem por objetivo a remoção operacional de ruídos externos através de uma calibração aperfeiçoada, correção atmosférica e padronização da geometria Sol-Superfície-Sensor a partir de modelos baseados na função de distribuição de reflectâncias bidirecionais (BRDF).

No Brasil, os índices de vegetação, em geral, e, mais recentemente os índices de vegetação MODIS, têm sido largamente empregados no monitoramento da dinâmica sazonal e fenologia da cobertura vegetal na floresta Amazônica (HUETE *et al.*, 2006) e bioma Cerrado (FERREIRA; HUETE, 2004; FERREIRA *et al.*, 2005). Os perfis temporais do índice EVI derivados de dados MODIS revelaram padrões sazonais bem definidos nas áreas de cerrado, mas demonstraram que os valores desse índice tendem a diminuir na medida que se avança da região de transição para a floresta. Os perfis temporais de EVI também revelaram diferenças sazonais importantes para tipos diferentes de cobertura, como floresta, cerrado e pastagem.

Huete *et al.* (2002) argumentaram que o EVI foi desenvolvido para realçar o sinal da vegetação com melhorias na sensibilidade em

regiões de biomassas elevadas e onde existem influências da resposta do sinal dos elementos do fundo de cena. O seu ponto de saturação é retardado, pois a sua sensibilidade é maior com o aumento da biomassa. É importante ressaltar que a essência do EVI está relacionada ao conceito de resistência à atmosfera, utilizando o comprimento de onda da faixa do azul.

O NDVI e o EVI são representados a partir das fórmulas abaixo:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho\text{NIR} - \rho\text{RED}}{\rho\text{NIR} + \rho\text{RED}}$$

$$\text{EVI} = G \times \frac{\rho\text{NIR} - \rho\text{RED}}{L + \rho\text{NIR} + C1 \times \rho\text{RED} - C2 \times \rho\text{BLUE}}$$

onde:

$\rho\text{NIR}$  = Reflectância da radiação na região do infra-vermelho próximo;

$\rho\text{RED}$  = Reflectância da radiação na região do vermelho;

$\rho\text{BLUE}$  = Reflectância da radiação na região do azul;

$C1$  = Correção vermelha devido à resistência atmosférica;

$C2$  = Correção azul devido à resistência atmosférica;

$L$  = Correção do fator de brilho do dossel;

$G$  = Fator “ganho”

O coeficiente adotado no algoritmo EVI é:  $L=1$ ,  $C1=6$ ,  $C2=7.5$ , e  $G=2.5$  (Huete *et al.*, 1994, 1997).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### MÉTODOS DE MISTURA ESPECTRAL

A identificação/classificação e a estimativa de área de diferentes tipos fisionômicos de cobertura vegetal mediante o uso de imagens de resolução média (Landsat MSS, TM, ETM+) têm sido realizadas com algum grau de sucesso em locais onde a cobertura vegetal é uniforme e homogênea. A classificação precisa de florestas decíduas

e de coníferas tem sido reportada na literatura. Por outro lado, em áreas onde a cobertura vegetal não é homogênea, especialmente nos limites entre diferentes fisionomias, a precisão da classificação pode ser grandemente reduzida. Isso indica que os limites da resolução espacial dos dados multiespectrais podem colocar restrições na utilidade desses tipos de dados para aplicações específicas. O uso de técnicas de amostragem por multi-estágio, com probabilidade de seleção proporcional a área, é um exemplo de como essa problemática acarreta limitações em aplicações de recursos florestais. Esta técnica, que tem sido usada por diversos autores, é sensível a erros na estimativa inicial das áreas cobertas por cada tipo de vegetação classificada. Por exemplo, o resultado da avaliação do volume de madeira depende diretamente da área calculada da floresta que está sendo estudada. Portanto, a utilidade limitada dos dados multiespectrais aumenta parcialmente com o problema de mistura espectral (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Conclui-se, portanto, que o problema principal associado à mistura espectral está relacionado matematicamente ao problema da identificação de um pixel dito puro, do qual possa ser extraída a curva espectral (de reflectância ou mais especificamente FRB) de um determinado componente da cena imageada (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Uma técnica bastante utilizada é o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) ou *Linear Spectral Unmixing*. Tal modelo, na verdade de “desmistura”, visa isolar a contribuição espectral de cada alvo presente no pixel, permitindo que uma imagem de satélite seja analisada numa escala de subpixel (SCHOWENGERDT, 1997; SCHWEIK; GREEN, 1999). A técnica garante que os pixels sejam realçados de acordo com a maior ou menor proporção de um determinado alvo abordado pelo modelo, e não necessariamente identificados como pertencentes a uma determinada classe temática

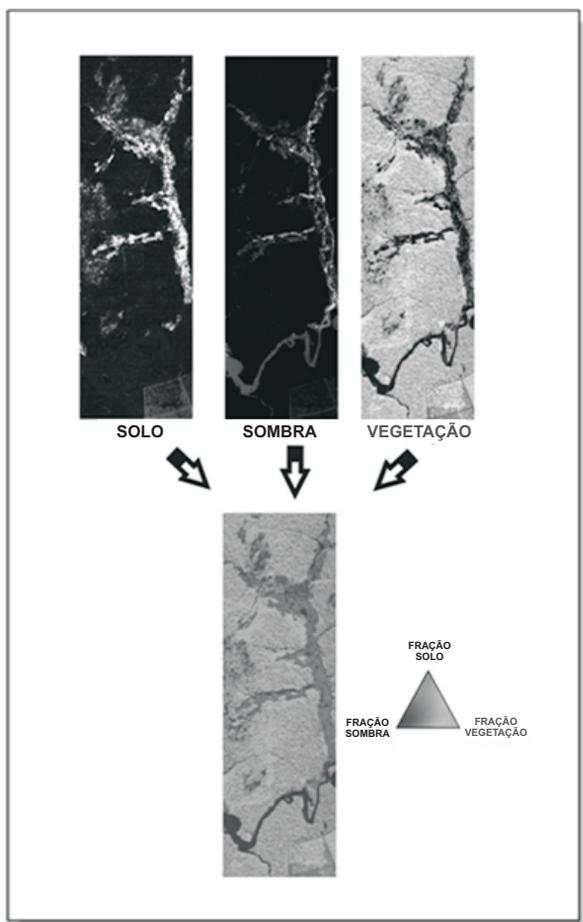
O MLME baseia-se no pressuposto que um espectro misturado pode ser modelado através de uma combinação linear de espectros “puros”, conhecidos por *endmembers* (Roberts *et al.*, 1998). Dessa forma, para qualquer imagem, e sendo as respostas espectrais dos componentes “puros” conhecidas, as proporções destes podem ser estimadas (de forma individual) por meio da geração das chamadas

“Imagens Fração” (SHIMABUKURO; SMITH, 1991; SCHOWENGERDT, 1997; SHIMABUKURO *et al.*, 1998; NUNES, 2008b) (Figura 4)

Como exemplos de modelos lineares de mistura espectral mais voltados para o mapeamento e monitoramento da vegetação, dois grupos se destacam: os gerais e os específicos. No modelo geral, normalmente mais simples, busca-se a identificação de alvos básicos na natureza, comuns a qualquer imagem de satélite, como a vegetação fotossinteticamente ativa (verde), o solo exposto e os corpos hídricos (FERREIRA *et al.*, 2007b).

No modelo específico, mais complexo, busca-se a identificação de alvos na paisagem pouco perceptíveis ou diferenciáveis nos métodos automáticos de classificação, em função da própria mistura espectral presente nos pixels e pela grande semelhança espectral de alguns alvos. Exemplos neste sentido incluem o modelo proposto por Ferreira *et al.* (2005), o qual assume que as fitofisionomias do bioma Cerrado podem ser modeladas a partir das classes Campo Limpo, Campo Sujo e Cerrado *sensu stricto*, e o modelo aplicado por Miura *et al.* (2003) a uma imagem Hyperion, tendo por base a hipótese de que todas as classes de cobertura do solo em ecossistemas savânicos resultam da combinação, em diferentes proporções, dos *endmembers* vegetação não-fotossinteticamente ativa (seca), vegetação fotossinteticamente ativa (verde) e solo.

Para Weng *et al.* (2004), o mais importante na obtenção de imagens-fração de alta qualidade é a correta seleção dos componentes. Na imagem, a seleção de componentes pode ser feita através da técnica *Pixel Purity Index* (PPI) proposta por Boardman *et al.* (1995). Segundo esta técnica, os componentes devem representar respostas espectrais puras do elemento considerado. Antes da aplicação do modelo é necessário efetuar a transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) para decorrelacionar os dados e separar o sinal dos ruídos interbandas. Para esta finalidade, à semelhança do que ocorre quando se aplica uma transformação por Componentes Principais, a(s) última(s) componentes podem ser descartadas, pois são elas que concentram o ruído. A transformação MNF se aplica a dados multiespectrais e hiperespectrais.



Fonte: Nunes (2008b).

**Figura 4** - Exemplos de imagens fração para os alvos “vegetação”, “solo” e “sombra” (ou água), obtidas por meio da aplicação do MLME a uma cena do Sensor HSS do CENSIPAM em área da FLONA Jamari em Rondônia.

O Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Membros Finais (MESMA) é uma variante que permite a variação do número e do tipo de componentes puros para cada pixel (ROBERTS *et al.*, 1998; RASHED *et al.*, 2003). Deste modo, é escolhido o melhor modelo baseado em critérios como RMS e valores de frações esperados.

## ANÁLISES HIPERESPECTRAIS

O processo de aquisição de imagens em centenas de bandas registradas e contíguas de forma a possibilitar que para pixel das mesmas seja possível derivar uma curva de reflectância espectral completa, recebe as denominações de “espectroscopia de imageamento” (*imaging spectrometry*) e “sensoriamento remoto hiperespectral” (*hyperspectral remote sensing*) (VAN DER MEER, 2000). O objetivo da espectroscopia de imageamento é medir quantitativamente a assinatura espectral dos componentes do sistema Terra a partir de espectros calibrados, adquiridos na forma de imagens, para uso na investigação científica e em aplicações de sensoriamento remoto.

Atualmente, a espectroscopia de imageamento é uma das tecnologias mais avançadas em sensoriamento remoto. A utilização destes sensores possibilita a obtenção de imagens em centenas de canais espectrais e com resolução espacial inferior a 5 m, como é o caso do sensor aerotransportado *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS), ou de 30 m, como no caso do HYPERION, a bordo da plataforma espacial EO-1.

As imagens orbitais hiperespectrais são relativamente recentes e restritas às aplicações científicas ou militares. O primeiro sensor orbital, o Hyperion, com 220 bandas no intervalo de 400 a 2500 nm, foi lançado a bordo do satélite *Earth Observer 1*, em novembro de 2000. Entre os vários resultados obtidos com este sensor, destacam-se os estudos sobre os efeitos de secas prolongadas na capacidade da floresta Amazônica em reter CO<sub>2</sub> (ASNER *et al.*, 2004) e o monitoramento de variedades de cana de açúcar (GALVÃO *et al.*, 2005). Outra experiência hiperespectral, lançada em outubro de 2001 pela Agência Espacial Européia, foi o sensor *CHRIS* (*Compact High Resolution Imaging Spectrometer*), com 19 bandas na região do visível e infravermelho próximo (400 a 1050nm), utilizado com sucesso em estimativas de produtividade agrícola e medidas de eficiência fotossintética (SABRINA *et al.*, 2005; SMITH *et al.*, 2005).

O imageamento orbital hiperespectral vem demonstrando um futuro promissor, sendo que, atualmente, a NASA está avaliando a possibilidade de lançar o sensor FLORA, cujo objetivo é disponibilizar informações de alta resolução espacial (45m) da vegetação global quanto à

composição, processos e produtividade de ecossistemas e a resposta destes às variações climáticas e mudanças na cobertura da terra (ASNER *et al.*, 2005). Da mesma forma, a Agência Espacial Canadense planeja o lançamento do sensor hiperespectral HERO (*Hyperspectral Earth Resources Observer*) para 2008, visando aplicações em inventário florestal (identificação de espécies, por exemplo), determinação de bioindicadores (clorofila, nitrogênio e água) e monitoramento marinho, costeiro e de águas continentais (aporte de sedimentos, nutrientes, etc.) (GOODENOUGH, 2004).

Tratando-se do imageamento aerotransportado hiperespectral destaca-se o sensor AVIRIS, que foi desenvolvido pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) a partir do sensor *Airborne Imaging Spectrometer* (AIS). O AVIRIS encontra-se em operação desde 1989, utilizando como plataforma de emprego uma aeronave do tipo ER-2, da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

No Brasil, na década passada, a partir do Projeto SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia), foi adquirido o sensor HSS (*Hyperspectral Scanner System*), fabricado pela SensyTech Inc. (EUA). Esse sensor foi construído a partir do projeto comercial da série AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner System*), desenvolvido pela empresa com a proposta de possibilitar estudos ambientais diversos (SENSYTECH, 2003). O modelo entregue ao SIVAM, batizado pelo fabricante de AA5201-AHS, difere de versões anteriores do AHS por apresentar uma maior disponibilidade de bandas (50 - abrangendo regiões do espectro que vão da faixa do visível ao infravermelho termal), implementações na eletrônica, e pela capacidade de adquirir imagens a uma maior velocidade de varredura do espelho.

As técnicas de análise por mistura espectral (SMA) podem ser divididas em detecção por pixel total e em escala de sub-pixel. A detecção por pixel total restringe-se ao mapeamento da distribuição do material em sua predominância percentual no pixel; caso contrário, não será detectado. Têm-se como exemplos desse tipo de classificação as técnicas: *Binary Encoding* (GOETZ *et al.*, 1985); *Tricorder/Tetracorder* e sua variação *Spectral Feature Fitting - SFF* (CLARK; SWAYZE, 1995) e o *Spectral Angle Mapper - SAM* (KRUSE *et al.*, 1993).

No que se refere ao mapeamento em escala de sub-pixel, a feição é mapeada não por sua predominância no pixel, mas, sim, por sua ocorrência, mesmo que mínima, neste recorte espacial. Estabelece-se, portanto, uma estimativa relativa de abundância, ocorrência e distribuição do material componente do alvo, delineando uma mistura de materiais dentro de cada pixel, expressa em seu comportamento espectral. Como exemplos de técnicas associadas a esse conceito, têm-se: a *Linear Spectral Unmixing* – LSU (SMITH; ADAMS, 1985; MUSTARD, 1993); *Matched Filtering* e seu refinamento através do *Mixture Tuned Matched Filtering* - MTMF (CHEN; REED, 1987; BOARDMAN *et al.*, 1995; HARSANY; CHANG, 1994).

Nunes (2008a), obteve ótimos resultados a partir de da técnica SAM e MTMF aplicada em dados ASTER, sendo possível caracterizar a cobertura vegetal das Reservas de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá e Amanã no Estado do Amazonas, permitindo a distinção de tipologias florestais representadas pela Florestas de Várzea, Floresta de Igapó, Floresta de Terra Firme, Floresta Aberta com Palmeiras, Campinarana e Floresta Secundária.

## CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS GEOGRÁFICOS

Outros métodos para o monitoramento florestal têm sido testados, como a segmentação multi-resolução e a classificação orientada a objeto. Esta técnica foi desenvolvida para suprir as limitações das técnicas tradicionais de classificação de imagens, baseadas em métodos de classificação por pixel. A classificação orientada a objeto não considera apenas a informação espectral, mas também informação espacial e contextual dos objetos, determinados através de padrões locais na imagem por um grupo de pixels vizinhos. O método utilizado é a segmentação por crescimento de região e baseada em conhecimento espectral e espacial dos objetos. O algoritmo é baseado na idéia conceitual que a informação semântica requerida para interpretar uma imagem não é representada por pixels simples, mas em significantes imagens objeto e suas relações mútuas. A técnica por crescimento de regiões inicia com um pixel objeto e, a partir deste, outros pixels são agrupados em objetos maiores. O crescimento é baseado nos critérios de homogeneidade descrito pela similaridade das imagens objeto em

termos de tamanho, distância, textura, similaridade espectral e/ou forma (VAN DER SANDE *et al.*, 2003).

A classificação orientada a objeto vem sendo utilizada com sucesso na geração de mapas para auxiliar no monitoramento dos recursos naturais, como: mapas de vegetação para a identificação de ambiente ciliar e direcionar estratégias de manejo para preservação das florestas ao longo dos rios (ANTUNES, 2003) e mapas de bacias hidrográficas para auxiliar no monitoramento ambiental (ROLIM, 2003). A técnica de segmentação e classificação orientada a objetos pode ajudar na identificação automática de feições em imagens de média resolução (LANDSAT e ASTER) e de alta resolução (IKONOS), possibilitando quantificar os impactos causados pela atividade madeireira.

## PROJETOS E ESTUDOS VISANDO O MAPEAMENTO DA COBERTURA VEGETAL

O primeiro grande levantamento sistemático da cobertura vegetal no Brasil remonta à década de 1970, quando, com o intuito de se conhecer principalmente a cartografia, vegetação, geologia e natureza dos solos da Amazônia e Nordeste brasileiros, teve início o Projeto RADAM (junho de 1971), baseado em um método pouco convencional à época: o imageamento por radar de visada lateral (Side-Looking Airborne Radar – SLAR). Em julho de 1975, a responsabilidade pelo mapeamento integrado dos recursos naturais passou a ser do Projeto RADAMBRASIL (1978), que expandiu o levantamento de radar para o restante do território nacional (ALLEVATO, 1979).

Visando melhorar a capacidade de análise de ecossistemas florestais com a utilização de dados PolSAR, Pope *et al.* (1994) desenvolveram uma série de índices biofísicos que se relacionam com a biomassa e a estrutura do dossel. Por serem baseados em razões e diferenças normalizadas, estes índices são independentes dos efeitos inerentes aos terrenos, o que facilita suas interpretações. Além disso, são lineares, possibilitando a utilização de diversas ferramentas de análises estatísticas. Pope *et al.* (1994), ao empregarem os índices em dados AIRSAR de uma região de floresta tropical na América Central, verificaram que as diferenças entre tipologias florestais, baseadas na homogeneidade do dossel, puderam ser facilmente identificadas com

o emprego da diferença de fase HH-VV. A discriminação entre florestas primárias e florestas em estado de regeneração não foi totalmente satisfatória com base apenas no índice de biomassa (BMI). Neste caso, o emprego do índice de espalhamento volumétrico (VSI) se mostrou como uma boa opção.

Iniciado em 1995, o projeto GRFM (Mapeamento Global de Florestas Alagáveis) foi coordenado pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) para produzir espacial e temporariamente dados contínuos de cenas SAR do satélite JERS-1 sobre regiões tropicais da Terra (ROSENQVIST *et al.*, 2000). Com o objetivo principal de determinar parâmetros sazonais de inundação da bacia Amazônica, duas séries foram adquiridas, uma para o período de vazante (agosto – setembro/1995) e outra para o período de cheia (maio – agosto/1996) do Rio Amazonas (FREEMAN *et al.*, 2002).

Um grande número de estudos têm sido realizados para explorar as relações existentes entre as propriedades biofísicas e químicas da vegetação e as propriedades da reflectância espectral, como os realizados por Dawson *et al.* (1999). A prática mais comum tem sido o uso de NDVI, e também de outros índices de bandas largas, que relacionam a característica de absorção de clorofila na banda do vermelho com a estrutura interna da folha relacionada no infravermelho próximo. Este índice tem sido amplamente utilizado para estimar a porcentagem de cobertura e o índice de área foliar (BLACKBURN, 1998) e tem sido aprimorado para ser utilizado com dados hiperespectrais, como feito por Hall *et al.* (1990), Miller *et al.* (1990) e Baret *et al.* (1992).

A cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso foi mapeada utilizando as imagens fração derivadas dos sensores com diferentes resoluções espaciais e espectrais, como o AVHRR/NOAA (1,1 km) (RODRIGUES YI, 1998), o VEGETATION/SPOT (1 km) (CARREIRAS *et al.*, 2002), e MODIS / Terra (250 m) (ANDERSON *et al.*, 2005). Em nível local, as imagens fração derivadas do sensor TM/Landsat 5 têm sido largamente utilizadas em diferentes ecossistemas como a Mata Atlântica, Cerrado e Amazônia.

Bolfe *et al.* (2003), analisou e caracterizou povoamentos florestais, a partir de técnicas de classificação digital supervisionada, pelo método de máxima verossimilhança, no qual o algoritmo de classificação

consiste num princípio estatístico paramétrico, considerando as classes envolvidas numa função densidade de probabilidade gaussiana. Tais classes temáticas foram estabelecidas em função dos temas de interesse: florestas implantadas de *Pinus sp.*, *Eucalyptus sp.* e florestas nativas (florestas primárias, florestas secundárias, matas de galeria e capoeiras).

Vicentini (2004), com o objetivo de caracterizar a vegetação ao longo de um gradiente edáfico no Parque Nacional do Jaú, analisou padrões espectrais em imagens Landsat, verificando a existência de quatro tipos de vegetação: campina herbácea arbustiva, campinarana baixa, campinarana alta e terra firme. Com estudos florísticos em campo foi possível verificar diferenças estruturais e florísticas marcantes entre a campina, a campinarana e a mata de terra firme. A mata de terra firme apresentou maior diversidade florística, seguida da campinarana alta, campinarana baixa e campina. A similaridade florística entre a mata de terra firme, a campina e as campinaranas foi baixa no nível de espécies e gêneros, enquanto as campinaranas alta e baixa mostraram-se floristicamente muito semelhantes. A diferença entre elas deve-se principalmente à estrutura física da vegetação.

Em estudo realizado por Espírito-Santo e Shimabukuro (2005) na Floresta Nacional de Tapajós, com base em imagens multitemporais Landsat (1988, 1999, 1997 e 2001), foi possível obter um mapa de cobertura vegetal com um *índice de exatidão global* de 84,5% e um *kappa* de 80,9%, retratando bem o estágio atual de conservação da região estudada. Neste trabalho, a integração das imagens de videografias aéreas e de pontos de levantamento de campo permitiu a realização de uma análise da exatidão do mapeamento da cobertura vegetal produzido por imagens orbitais.

Em 2006, o Ministério do Meio Ambiente, no âmbito do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO), concluiu o mapeamento (na escala de 1:250.000) dos remanescentes da cobertura vegetal nos biomas brasileiros (Floresta Amazônica, Mata Atlântica, Cerrado, Pantanal, Caatinga e Campos Sulinos), tendo por base imagens Landsat ETM+, obtidas em 2001 e 2002, e analisadas através de métodos de classificação automática e interpretação visual (FERREIRA *et al.*, 2007a). A atualização do mapeamento vegetacional do Bioma Amazônico e a implantação de uma base

de dados digital correspondente do PROBIO, permitiu inter-relacionar os dados obtidos nos estudos realizados nesta tese.

Em estudos realizados por Gonçalves (2007), com dados de banda L do sensor SAR R99-B, além de abordar a estimativa volumétrica, foi possível analisar a sensibilidade dos dados PolSAR-L às variações florístico-estruturais de áreas submetidas ao regime de exploração madeireira de impacto reduzido. As análises exploratórias baseadas na técnica de classificação por decomposição de alvos e nas respostas de polarização paralela, aliadas aos resultados da caracterização florístico-estrutural das parcelas amostrais, possibilitaram concluir que:

- (i) em povoamentos florestais sob regime de exploração madeireira predominam os processos de espalhamento de média entropia, com independência da composição florística e da estrutura florestal. Os três principais mecanismos de espalhamento observados na área experimental, em ordem decrescente de frequência, foram: o espalhamento do tipo dipolo, *double bounce* e superficial;
- (ii) o método de classificação por decomposição de alvos, baseado nos valores de entropia e ângulo alfa médio, não foi robusto o suficiente para detectar a variabilidade florístico-estrutural existente entre as parcelas amostrais. As diferenças florístico-estruturais observadas entre parcelas foram sutis;
- (iii) as respostas de polarização paralela, obtidas para a maior parte das parcelas, apresentaram diferenças, indicando que o retroespalhamento de determinadas áreas foi dominado por mecanismos físicos distintos. Contudo, a diversidade florística, a altura das árvores e a distribuição diamétrica parecem não governar, isoladamente, estas respostas de polarização.

Nunes (2008a), em sua tese de doutorado, utilizou dados do sensor aerotransportado SAR R99, adquiridos na banda L (1,28 GHz), em amplitude e com quatro polarizações (HH, VV, HV e VH), onde avaliou a distinção de fitofisionomias de floresta de várzea existentes em ambientes da RDSA e RDSM, com a aplicação do algoritmo Iterated Conditional Modes (ICM), de classificação polarimétrica pontual/contextual. Os resultados mostraram que o uso das distribuições multivariadas em amplitude, conjuntamente com uma banda de textura, produziu

classificações de qualidade superior às aquelas obtidas com dados polarimétricos uni/bivariados. Essa abordagem permitiu a discriminação correta de três classes vegetacionais de interesse, comprovando o potencial dos dados do SAR-SIPAM e do algoritmo ICM no mapeamento da cobertura vegetal da Amazônia.

## CONCLUSÕES

O uso de técnicas de processamento digital de imagens aplicadas à dados provenientes de distintos sensores remotos (dados de sensores ativos e ópticos de alta resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal) são ferramentas ideais para organizar informações, planejar ações futuras e criar cenários distintos para análise dos diferentes aspectos considerando os recursos florestais de ecossistemas tropicais.

Atualmente, o avanço das geotecnologias considerando o lançamento de novos sensores orbitais e sub-orbitais, bem como a criação de algoritmos visando explorar as potencialidades de destes sensores, têm sido o grande desafio do Sensoriamento Remoto.

As possibilidades na implementação de técnicas e métodos avançados de processamento digital em projetos e estudos considerando-se a análise de recursos naturais, tendem a busca de resultados mais refinados e em melhores escalas de mapeamento.

## REFERÊNCIAS

- AIBA, H.; MURATA, K.; IWASHITA, H. Experimental results of L-band microwave penetration properties of tropical and subtropical trees. In: JAPAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, 8TH. *Proceedings...* 1988. p. 51-54.
- ALLEVATO, S. R. Memória central do projeto Radambrasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, n. 25, p. 31-36, 1979.
- ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; CRUZ DE ARAGÃO, L. E. O.; VALERIANO, D. M. Monitoramento da resposta fenológica através da utilização de imagens fração derivadas do sensor MODIS. In: SIMP. BRAS. DE SENS., 12., Goiânia, Brasil, 16-21 abril. *Anais...* Goiânia: INPE, 2005. p. 2811-8.
- ANTUNES, A. F. B. *Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto em imagens de alta resolução espacial*. 2003. 147p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

ASNER, G. P.; NEPSTAD, D.; CARDINOT, G.; RAY, D. Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. *National Academy of Sciences*, v. 101, n. 16, p. 6039-44, 2004.

ASNER, G. P.; KNOX, R. G.; GREEN, R. O.; UNGAR, S. G. The Flora Mission for Ecosystem Composition, Disturbance and Productivity. *Mission Concept for the National Academy of Sciences Decadal Study*, 2005.

ASSUNÇÃO, G. V.; FORMAGGIO, A. R. *O Sensoriamento remoto na agricultura: conceitos básicos, metodologia e aplicações*. São José dos Campos: INPE, 1989. 217p.

BARET, F.; JACQUIEMOUD, S.; GUYOT, G.; LEPRIEUR, C. Modelled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands. *Remote Sensing of Environment*, v. 41, n. 2/3, p. 133-142, 1992.

BERNARDES, M. S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: Potafos, 1987. 249 p.

BLACKBURN, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 4, p. 657-75, 1998.

BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A.; GREEN, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of aviris data. fifth jpl airborne earth science workshop. *JPL Publications 95-1*, n. 1, p. 23-6. 1995.

BOLFE, E. L.; FONSECA, E. L.; PEREIRA, R. S.; MADRUGA, P. R. A. Verificação da exatidão em classificação digital de povoamentos florestais em imagem orbital mediante três índices. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 4., Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2671-7.

CARREIRAS, J. M. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; PEREIRA, J. M. C. Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, n. 23, 2002. p. 4979-83.

CHEN, J. Y., & REED, I. S. A detection algorithm for optical targets in clutter. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, v. AES-23, n. 1. 1987.

CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A. Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials:

The USGS Tricorder Algorithm. In: SUMMARIES OF THE FIFTH ANNUAL JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP. JPL Publication 95-1, 1995. p. 39-40.

DAWSON, T. P.; CURRAN, P. J.; NORTH, P. R. J.; PLUMMER, S. E. The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: a theoretical analysis. *Remote Sensing of Environment*, v. 67, n. 2, p. 147-59, 1999.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B. E SHIMABUKURO, Y. E. Validação do mapeamento de uma área de floresta tropical com o uso de imagens de videografia aérea e dados de levantamento de campo. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 29, n. 2, p. 227-39, 2005.

FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spatial vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 10, p. 1837-60, 2004.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G., HUETE, A. R.; PECCININI, A. A. Análise da sazonalidade de paisagens antrópicas e nativas do bioma Cerrado através dos produtos MODIS índices de vegetação, área foliar e atividade fotossintética. In: SIMP. BRAS. DE SENS. REM. *Anais...* Goiânia: INPE, 2005. p. 505-12.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. *Acta Scientiarum*. Biological Sciences, v. 1, 2007a. p. 1-23.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA JR., 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*, UK, v. 28, Issue 2, p. 413-429, 2007b.

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N.; VALERIANO, M. M. *Comportamento espectral (450-2500nm) e mineralogia de argila de alguns solos tropicais brasileiro*. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 7, (INPE 6284-PRE/2372), 1995.

FREEMAN, A.; CHAPMAN, B.; SIQUEIRA, P. The JERS-1 Amazon Multi-Season Mapping Study: science objectives and implications for future missions. *International Journal Remote Sensing*, n. 23, p. 1447-60, 2002.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, v. 94, n. 4, p. 523-34, 2005.

GOETZ, A. F. H.; VANE, G.; SOLOMON, J. E.; ROCK, B. N. Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, 228, p. 1147-53, 1985.

GONÇALVES, F. G. *Avaliação de Dados SAR Polarimétricos para Estimativa Volumétrica de Florestas Tropicais*. 109 p. Dissertação (Mestrado) - São José dos Campos: INPE, 2007.

GOODENOUGH, D. G.; PEARLMAN, J.; CHEN, H.; DYK, A.; HAN, T.; L, J.; JOHN MILLER, J.; NIEMANN, K. O. *Forest Information from Hyperspectral Sensing*. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM - IGARSS 2004, Anchorage, Alaska, 2004.

GÜRCEL, H.C. *Variabilidade espacial e temporal do NDVI sobre o Brasil e suas conexões com o clima*. 2000. 114p. Dissertação (Mestrado) - São José dos Campos: INPE, 2000.

HALL, F. G.; HUERMIRICH, K. F.; GOWARD, S. N. Use of narrow-band spectra to estimate the fraction of absorbed photosynthetically active radiation. *Remote Sensing of Environment*, v. 32, n. 1, p. 47-54, 1990.

HARSANYI, J. C., CHANG, C. Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, p. 779-85, 1994.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. *Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars*. 3.ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998. 866p.

HUETE, A. R. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, v. 49, p. 224-34, 1994.

HUETE, A. R. Extension of soil spectra to the satellite: atmosphere, geometric and sensor considerations. *Photo Interprétation*, v. 34, n. 2, p. 101-14, 1996.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set on TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v. 59, n. 3, p. 440-51, 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.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y. E.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; YANG, W.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. L06405, p.1-4, 2006.

IMHOFF, M. L.; STORY, M.; VERMILLION, C.; KAHN, F.; POLCYN, F. Forest canopy characterization and vegetation penetration assessment with spaceborne radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. v. 24, n. 4, p. 535-42, 1986.

JACKSON, R. D., PINTER JR., P. J. Spectral response of architecturally different wheat canopies. *Remote Sensing of Environment*, v. 20, n. 1, p. 43-56, 1986.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, v. 11, n. 3-4, p. 185-200, 1991.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, v. 50, n. 4, p. 663-6, 1969.

KIMES, D.S.; KIRCHNER, J.A. Diurnal variations of vegetation canopy structure. *International Journal of Remote Sensing*, v. 4, n. 2, p. 257-71, 1983.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance visible and near infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 1, n.3. p. 155-9, 1970.

KRUSE, F. A.; LEFKOF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIEDBRECHET, K. B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P. J., GOETZ; A. F. H. The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing Environment*, v. 44, p. 145-63, 1993.

MENZEL, A.; ESTRELLA, N.; PETER, F. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology*, v. 7, p. 657-66, 2001.

MILLER, J. R.; HARE, E. W.; WU, J. Quantitative characterization of vegetation red edge reflectance – 1. An inverted-Gaussian reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, v. 11, n. 2, p. 1755-73, 1990.

MIURA, T.; HUETE, A. R.; FERREIRA, L. G.; SANO, E. E. Discrimination and biophysical characterization of Cerrado physiognomies with EO-1 hyperspectral Hyperion. In: SIMP. BRAS. DE SENS. REM., 8. Belo Horizonte: INPE, 2003.

MORAES, E. C. *Radiometria óptica espectral* – comportamento espectral. In: SIMP. BRAS. DE SENS. REM, 8., 1996, São José dos Campos: INPE, 1996. (CD ROM - Tutorial)

MUSTARD, J. F. Relationships of soil, grass, and bedrock over the Kaweah Serpentine Melange through spectral mixture analysis of AVIRIS data. *Remote Sensing Environment*, 44, p. 293-308, 1993.

- NUNES, G. M. *Sensoriamento remoto aplicado na análise da cobertura vegetal das reservas de desenvolvimento sustentável Amanã e Mamirauá*. 2008a. 176p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, 2008.
- NUNES, G. M. *Uso do Sensor HSS no Mapeamento da Cobertura Vegetal, Análise Ambiental e Caracterização de Impactos Ambientais na Flona Jamari, RO. Relatório Técnico*. Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção a Amazônia, Centro Técnico e Operacional de Porto Velho, Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR), 2008b. 30p.
- 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*, 57/01, 2005.
- PEARSON, R. L.; MILLER, L. D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., 1972, Ann Arbor. *Proceedings...* Ann Arbor: ERIM, v. 2, 1972, p. 1355-1379.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação* - INPE, São José dos Campos, SP, 2007. 136 p.
- POPE, K.; REY-BENAYAS, J.; PARIS, J. Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics. *Remote Sensing of Environment*, v. 48, n. 2, p. 205-19, 1994.
- RADAMBRASIL. Projeto Radambrasil. Levantamento de recursos naturais. Pico da Neblina. *Folha NA. 19*, v. 11, Brasil: IBGE, 1978.
- RASHED, T.; WEEKS, J. R.; ROBERTS, D. A.; ROGAN, J.; POWELL, R. L. Measuring the physical composition of urban morphology using multiple end-member spectral mixture models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 69, n. 9, p. 1011-20, 2003.
- ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R. O. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 65, p. 267-79, 1998.
- RODRIGUEZ-YI, J. L. *Mapeamento e Monitoramento da vegetação do estado do Mato Grosso através de imagens AVHRR-NOAA*. 1998. 135p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 1998. (INPE-6816-TDI/638)

ROLIM, F. A. *Análise de classificação orientada ao objeto em imagens de alta resolução para o auxílio ao monitoramento ambiental em uma microbacia hidrográfica*. 2003. 107p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

ROSENQVIST, A. SHIMADA, M.; CHAPMAN, B.; FREEMAN, A. The Global Rain Forest Mapping project - a review. *International Journal of Remote Sensing*, n. 23, p. 1201- 34, 2000.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., Washington, D. C., *Proceedings...* Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, v. 1, 1973. p. 309- 17.

SABRINA, R.; SOLANGE, C.; IVAN, P.; FEDERICO, M. Estimation of vegetation photochemical processes from CHRIS-PROBA data. In: 3RD ESA CHRIS PROBA WORKSHOP, Frascati, Italy, 2005.

SCHOWENGERDT, R. A. *Remote sensing*: models and methods for image processing. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 522 p.

SCHWEIK, C. M.; GREEN, G. M. The use of spectral mixture analysis to study human incentives, actions, and environmental outcomes. *Social Science Computer Review*, Thousand Oaks, v. 17, n. 1, p. 40-63, 1999.

SENSYTECH. *AHS – Airborne Hyperspectral Scanner*. Disponível em: <<http://www.sensytech.com/Imaging/ahs.html>>. Acesso em: 22 abr. 2003.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. L. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 33, p. 1729-37, 1998.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, New York, v. 29, n. 1, 1991.

SMITH, A. M.; NADEAU, C.; FREEMANTLE, J.; WHEN, H.; TEILLET, P. M.; KEHLER, I.; DAUB, N.; BOURGEOIS, G.; DE JONG, R. *Leaf area index from CHRIS satellite data and applications in plant yield estimation*. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 26<sup>TH</sup>. Wolfville, Nova Scotia, 2005.

SMITH, M. O., ADAMS, J. B. Interpretation of AIS images of Cuprite, Nevada, using constrains of spectral mixtures. In: AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER DATA ANALYSIS WORKSHOP. Pasadena, CA. *Proceedings...* JPL Publ., 1985. 85-41, p. 62-8.

SUN, G.; RANSON, K. J. Modeling lidar and radar returns of forest canopies for data fusion. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Toronto, Canada. *Proceedings...* Toronto: IEEE, 2002. p. 1387-9.

ULABY, F. T.; ELACHI, C. *Radar polarimetry for geoscience applications*. Norwood: Artech House, 1990. 364p.

VAN DER MEER, F. Imaging spectrometry geological applications. In: MEYERS, R.A. (Ed.). *The Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Sussex, U.K.: John Wiley & Sons Ltd., 2000. p. 8601-38.

VAN DER SANDE, C. J., DE JONG, S. M., DE ROO, A. P. J. A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 4, n. 3, p. 217-29, 2003.

VICENTINI, A. A vegetação ao longo de um gradiente edáfico no Parque Nacional do Jaú. In: S. H. Borges; S. Iwanaga; C.C. Durigan; M.R., Pinheiro (Eds.) *Janelas para a biodiversidade no Parque Nacional do Jaú: uma estratégia para o estudo da biodiversidade na Amazônia*. Fundação Vitória Amazônica (FVA). Manaus: WWF, IBAMA, 2004. p. 117-43.

WANG, Y.; HESS, L. L.; FILOSO, S.; MELACK, J. M. Canopy penetration studies: modeled radar backscatter from Amazon floodplain forests at C-, L-, and Pband. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM. Surface and atmospheric remote sensing: technologies, data analysis and interpretation. IGARSS'94, August, 8-12, 1994, Pasadena. *Proceedings...* Pasadena, 1994. p. 1060-2.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHUMACHER, M. V. *As florestas e o carbono*. Curitiba, 2002. 264p.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, v. 89, n. 4, p. 467-83, 2004.