

# ***Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem***

*Remote sensing applied to the study of vegetation with emphasis on index of vegetation and landscapes metrics*

Karla Maria Pedra de Abreu\*  
Luciano Melo Coutinho\*\*

O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica sobre o sensoriamento remoto, com enfoque no estudo da vegetação. Nele são abordados fundamentos, conceitos e métodos. Delimitam sua história os períodos de uso de sistemas fotográficos, a evolução e a multiplicidade dos sistemas imageadores. Descrevem-se princípios e métodos necessários para correção, tratamento, interpretação visual, avaliação de parâmetros das imagens e cruzamento de dados aplicados a estudos de índices de vegetação (NDVI) e de paisagens. A eficácia dos estudos da vegetação via sensoriamento remoto é embasada pelos resultados e pelas considerações obtidas por revisão conceitual, que priorizou a consulta a periódicos especializados.

*This work is review of the literature on remote sensing, with emphasis on the study of vegetation, and discussion of principles, concepts and methods. It delimitates its history within the periods in which photographic systems were used and the evolution and variety of imaging systems. The study describes principles and methods necessary in the correction, treatment, visual interpretation, evaluation of image parameters, and data crossing applied to studies of vegetation indexes (NDVI) and landscapes. The effectiveness of remote sensing via vegetation studies is supported by the results and considerations made by conceptual review, which prioritized research on academic journals.*

Palavras-chave: Superfície Terrestre. Cobertura Vegetal. Imageamento. Mapeamento.

*Keywords: Land Surface. Vegetation Cover. Imaging. Mapping*

## ***Introdução***

O interesse do homem em desenvolver estratégias que lhe permitem adquirir informações e monitorar os recursos da superfície terrestre à distância, sem o contato físico, é o que caracteriza o objeto de estudo do sensoriamento remoto. De acordo com o Manual of Remote Sensing (ASP, 1975 apud Novo, 2010) a história do sensoriamento remoto pode ser representada por dois momentos significativos: 1 - o período do

\* Graduada em Biologia e mestrado em Produção Vegetal. Doutoranda em Ecologia e Recursos Naturais na Universidade Estadual do Norte Fluminense e professora do Instituto Federal do Espírito Santo /ES – Brasil.

\*\* Mestre em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Espírito Santo (2010). MBA em Gestão Ambiental (2008) e Graduado em Geografia - Licenciatura Plena (2006) pelo Centro Universitário São Camilo-ES. Tem experiência em Geociências com ênfase nos seguintes temas: Geoprocessamento, Sensoriamento Remoto, Cartografia e Topografia Básica, Geografia Física e Manejo de Bacias Hidrográficas.

desenvolvimento e a evolução de recursos fotográficos (1860 a 1960) e 2 - o período entre o pós-1960 e os dias atuais, pela multiplicidade de sistemas sensores que surgiram e continuam em constante evolução, principalmente os satélites de alta resolução. Uma cronologia pode ser verificada no trabalho de Aggarwal (2004), o qual discorre sobre a evolução temporal dos sistemas de sensores.

Na atualidade o sensoriamento remoto vem sendo largamente aplicado para o monitoramento de coberturas vegetais, volta-se, principalmente, para seu comportamento espacial e/ou fisiológico. As distintas áreas do conhecimento, cujo foco ou objeto de estudo se pautam na observação e análise da vegetação (agronomia, biologia, geociências, silvicultura) vêm cotidianamente utilizando e aprimorando as formas de utilização desses recursos (EASTMAN, 1996; LUSCH, 1999; MELESSE et al., 2007; MOREIRA, 2005; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; WENG, 2010).

A crescente urbanização e o acelerado crescimento populacional levaram ao uso acentuado do solo, tanto para a agricultura como para acomodação das pessoas (uso urbano). Faz-se necessária uma atuação planejada do homem no ambiente, sendo de grande valia a construção de mapas de uso da terra por meio de imagens de satélite e ferramentas de sensoriamento remoto, que são fontes de dados espaço-temporais e permitem a avaliação da forma como se tem dado o uso do solo em determinada região (ALVES; COSTA, 2007). A quantificação das classes de uso do solo permite uma política racional de planejamento territorial, urbano e ambiental bem como a elaboração de medidas de proteção e preservação (PAPASTERGIADOU et al., 2007). O mapeamento do uso da terra e da vegetação natural pode subsidiar ações que visam ao estabelecimento de práticas de desenvolvimento sustentável e à implementação de políticas de conservação e uso sustentável da biodiversidade.

Do exposto, realizou-se um levantamento das principais aplicações de sensoriamento remoto e dos procedimentos metodológicos usuais no mapeamento do uso e cobertura da terra, com ênfase nos estudos relacionados à vegetação natural.

### ***Fundamentos do Sensoriamento Remoto***

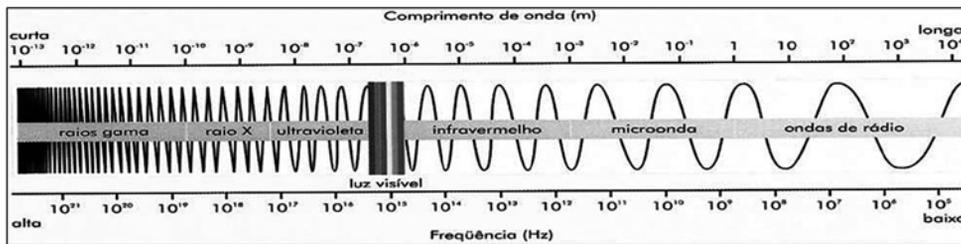
O mapeamento do uso e cobertura da terra tem sido um grande desafio no que concerne ao grau de automatização do processo e envolve certa complexidade, pela diversidade de classes e variados níveis de detalhamento que se podem alcançar. A geração de mapas de uso e cobertura da terra depende da adoção de produtos de sensoriamento remoto, de distintos níveis de aquisição, além do uso de técnicas classificatórias e de levantamentos de campo, como etapas essenciais no processo de sua elaboração (CRUZ et al., 2009).

As atividades relacionadas ao sensoriamento remoto necessitam de uma fonte de energia, nesse caso, radiação eletromagnética, sendo a mais comum a energia solar. As

fontes de energia se dividem em naturais (energia solar) e artificiais (*flash* ou sinal de radar). A radiação emitida da fonte se propaga à velocidade da luz (300.000 km/seg) e pode ser medida em frequência de hertz (Hz) e comprimento por unidade e subunidade de metro (M). Pode-se considerar que a detecção das interações entre a radiação eletromagnética e os alvos da superfície terrestre é o princípio básico de toda tecnologia do sensoriamento remoto (EASTMAN, 1996; AGGARWAL, 2004; MELESSE et al., 2007; MOREIRA, 2005; NOVO, 2010; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; WENG, 2010).

O espectro eletromagnético é uma divisão didática da distribuição da radiação eletromagnética pelas distintas regiões, organizado de acordo com o comprimento de onda e frequência de onda. Na Figura 1 verifica-se, da esquerda para a direita, que as ondas de alta frequência são de comprimento curto, ao passo que as ondas de baixa frequência são de comprimento longo. Fica claro que a frequência de onda, maior ou menor, é relativa ao número de repetições desta por unidade de tempo, ao passo que comprimento de onda é a distância entre os picos. As médias das frequências de ondas do espectro podem ser verificadas na Tabela 1 (FLORENZANO, 2002; MOREIRA, 2005; WENG, 2010).

**Figura 1 - Representação do espectro eletromagnético**



Fonte: Florenzano (2002).

**Tabela 1 - Medidas das faixas do espectro em micrômetro ( $\mu\text{m}$ ) e nanômetro (nm)**

Faixa	Frequência ( $\mu\text{m}$ )	Frequência (nm)
Violeta	0,38 a 0,45	380 a 450
Azul	0,45 a 0,49	450 a 490
Verde	0,49 a 0,58	490 a 580
Amarelo	0,58 a 0,6	580 a 600
Laranja	0,6 a 0,62	600 a 620
Vermelho	0,62 a 0,70	620 a 700
IV Próximo (IVP)	0,7 a 1,3	700 a 1300
IV Médio (IVM)	1,3 a 6,0	1300 a 6000
IV Distante (IVD)	6,0 a 1000	6000 a 10000

Considerando que toda matéria é constituída de átomos, entende-se que ao atingir o objeto a energia eletromagnética é, inicialmente, absorvida, o que causa reações nos seus elétrons, os quais ficam em condição de excitação e retornam ao estado original. Durante este processo é gerado um *quantum*, ou *fóton*, de energia que é registrado pelo sistema sensor, o que permite a geração da imagem (EASTMAN, 1996; AGGARWAL, 2004;

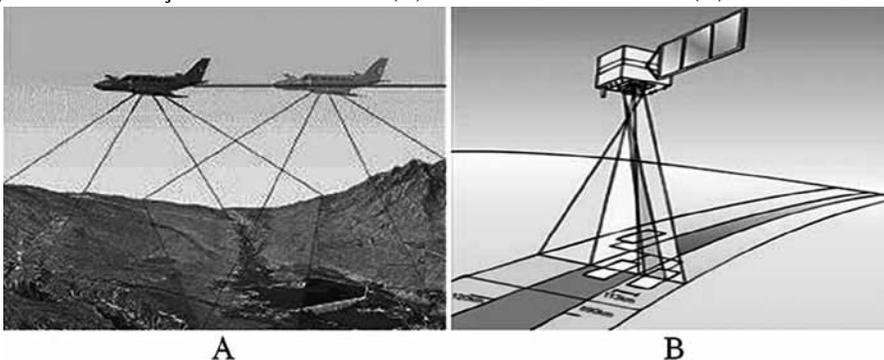
NOVO, 2010). Após a obtenção das imagens dos produtos de sensoriamento remoto (aéreos ou orbitais), Diniz (1984) elenca as etapas essenciais para a elaboração de mapas de utilização da terra: definição da escala do mapa, definição de elementos que permitam a identificação do uso da terra nas imagens e elaboração da classificação do uso da terra.

### ***Sistemas sensores***

Sistema sensor é todo equipamento capaz de registrar a energia dos alvos, a qual pode ser trabalhada para geração de imagem ou gráfico. Os sensores são acoplados a recursos de deslocamentos, sendo os principais as aeronaves e os satélites. Devido à abrangência e aplicabilidade do sensoriamento remoto, os sistemas imageadores podem ser classificados pelos produtos gerados, pelas fontes de energia utilizadas e pelo nível de localização em que se encontram, ocorrendo em certos casos a inclusão de um mesmo sensor em mais de uma categoria (AGGARWAL, 2004; EASTMAN, 1996; LUSCH, 1999; MOREIRA, 2005).

O mapeamento de áreas com grandes extensões demanda considerável quantidade de esforços, principalmente quando se pretende a obtenção de resultados que se aproximam ao máximo do real, sendo o sensoriamento remoto uma das principais técnicas utilizadas nesse processo (MARQUES et al., 2009). As fotografias aéreas são consideradas como os primeiros produtos do sensoriamento remoto, não tendo sido descartadas com o advento dos satélites. Cazetta (2009) destaca que a fotografia aérea passou a adotar novas técnicas, como a incorporação da banda infravermelha e do sistema digital, muito importantes em estudos de qualquer natureza. Ressalta-se ainda que muitas vezes há necessidade de se recorrer à fotografia aérea como resposta aos detalhes exigidos pelo mapeamento, observa-se, nesse caso uma complementaridade de funções entre as fotos aéreas e as imagens de satélites. A Figura 2 demonstra uma linha de voo de aeronave para obtenção de aerofotos (A) e uma faixa de imageamento (B) realizada por satélite.

**Figura 2 - Ilustração de linha de voo (A) e cobertura de satélite (B)**



Fonte: respectivamente de AJ Cartografia e INPE

Apesar dos satélites não terem extinguido o uso das fotografias aéreas, desde seu surgimento as imagens de satélite têm cada vez mais servido de base a estudos de caracterização da ocupação da terra, vindo progressivamente a substituir as técnicas mais antigas. Segundo Castilho (1999), os satélites artificiais fundaram o sensoriamento remoto orbital, inaugurando procedimentos técnicos antes inexistentes. As imagens de sensores orbitais permitem a obtenção de informações abaixo custo acerca da cobertura do solo, com a vantagem de recobrimento de grandes áreas geográficas (WICKLAND, 1991; LILESAND; KIEFER, 1994). Segundo Florenzano (2002) “as imagens de satélite proporcionam uma visão sinóptica (de conjunto) e multitemporal (de dinâmica) de extensas áreas da superfície terrestre”.

Estudos em escala global utilizam-se de sensores de baixa resolução, porém com grande área de cobertura, que vêm sendo utilizados para analisar os padrões globais de fragmentação florestal (RIITERS et al., 2000), para correlacionar a estabilidade climática mundial com os “hotspots” de biodiversidade (FJELDSA et al., 1997). Em escalas regionais, imagens de resolução mediana, como as dos satélites LANDSAT, são largamente utilizadas para a análise da cobertura da terra por atividades agrícolas e florestais (FIDALGO; ABREU, 2005) e, ainda, nos estudos da fragmentação florestal (VOGELMANN, 1995; RIBEIRO et al., 2009), na obtenção de informações para estudos de biodiversidade (INNES; KOCH, 1998), no desenvolvimento e aplicação de índices que permitam avaliar a estrutura e a diversidade das paisagens (OLSEN et al., 1993; TISCHENDORF, 2001).

A aquisição de imagens de satélite de alta ou altíssima resolução espacial é limitada a poucos usuários; devido aos altos custos, seu uso é pouco difundido e geralmente restrito a escalas locais. Alguns exemplos de aplicações encontrados em literatura referem-se à utilização dessas imagens não só para mapeamento (FURRER et al., 1994; ADNYANA et al., 2006; SANTOS et al., 2011) como também para monitoramento de danos florestais (EKSTRAND, 1994), estimativas da estrutura da floresta e suas espécies (ST-ONGE; CAVAYAS, 1997; FRANKLIN et al., 2000), discriminação de árvores individuais (FRANKLIN, 1994; KEY et al., 2001; GOODWIN et al., 2005), comparação de índices de área foliar com parâmetros da imagem (COLOMBO et al., 2003), como ferramenta para o manejo (WULDER et al., 2004) e recuperação de ecossistemas (LUZ, 2002).

Deve-se atentar para as limitações do sensoriamento remoto na relação entre os objetivos da pesquisa e o material disponível. Nesse aspecto uma das limitações mais comuns se encontra na resolução das imagens, principalmente na resolução espacial, pois a definição dos alvos da imagem dependerá totalmente desse parâmetro (PINHEIRO, 2003). Tal observação deve ser antecipada em certos trabalhos. Um exemplo claro dessa incompatibilidade é a utilização de imagens do sensor TM-LANDSAT 5 para localizar nascentes, pois cada pixel dessa imagem tem uma resolução espacial de 30m x 30m (área de 900m<sup>2</sup>), sendo impossível localizar tal alvo com precisão. Nesse caso, as imagens

de altíssima resolução, acima de 1m x 1m, são as indicadas (IKONOS, GEOEYE ou aerofotos). A resolução temporal também é considerada um fator limitante, inicialmente, pelo surgimento dos satélites imageadores somente após a década de 1960, o que torna inviável realizar estudos anteriores a esse período com base em imagens de satélite, e pelas limitações dos períodos de cobertura de áreas (MOREIRA, 2005).

Imagens de radar podem ser consideradas como alternativas para estudos de vegetação, principalmente ao serem consideradas determinadas limitações dos sensores ópticos, destacando-se a dependência de fonte externa de energia (luz solar), a perda de qualidade da imagem por ocorrências atmosféricas, a cobertura de nuvens e o alto custo das imagens de alta resolução (HOTT et al., 2006; KUPLICH, 2003; MORENA et al., 2004; SOUZA; LOCH, 2006). Uma diferença entre imagens ópticas e imagens de radar consiste na perda de informação e de detalhes dessas últimas, o que leva à necessidade de tratamento diferenciado para estudos com dados de radar (filtros, segmentadores, classificadores) a fim de melhorar sua qualidade e, principalmente, a resolução espacial e espectral para melhor distinção e definição de alvos (FREITAS et al., 2003).

Para maiores informações sobre os tipos de sensores e suas características, resolução espacial, espectral e temporal bem como suas aplicações, vide EMBRAPA (2009).

### ***Tipos, características e qualidade das imagens***

Informações relativas aos tipos de imagens são pertinentes ao contexto do sensoriamento remoto, principalmente para a identificação de alvos, pois cada elemento da superfície terrestre apresenta comportamento diferenciado nas distintas frequências de onda, o que se confirma na observação dos produtos finais, que são as imagens geradas (EASTMAN, 1996; LUSCH, 1999; MOREIRA, 2005).

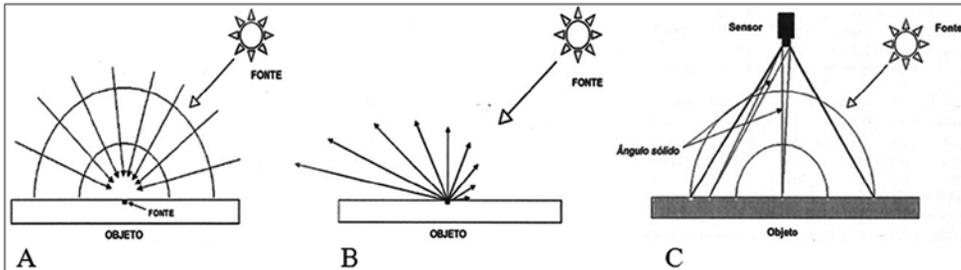
As imagens são classificadas de acordo com a frequência de onda do espectro eletromagnético registrada pelo sensor, sendo mais comuns as geradas na região do visível e dos infravermelhos (ondas curtas e médias, respectivamente), também chamadas de imagens ópticas, e as microondas e ondas de rádio (ondas longas).

Por região do visível entende-se a frequência na qual são combinadas as cores básicas (azul, verde e vermelho). Trata-se de uma frequência originada da emissão de luz branca, cuja resposta, ao contato com o cérebro humano, provoca a sensação de cor (FLORENZANO, 2002; MOREIRA, 2005). Os infravermelhos (próximo, médio e distante) são registrados a partir da radiação térmica (entre a luz vermelha e as microondas).

A intensidade do fluxo de energia emitida pelo sol, a qual sofre atenuação pela interferência dos componentes atmosféricos, é denominada irradiância. O processo oposto à irradiância, que considera a direção preferencial da reflexão de acordo com as características dos alvos de superfície e do ângulo de incidência da radiação, é a excitância (LUSCH, 1999; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

O sensor sobre a superfície coleta a energia refletida, a qual pode ser registrada de forma diferenciada em função das propriedades dos alvos e das frequências de ondas. A radiação de cada ponto é aquela contida em um cone imaginário (ângulo sólido) formado pela lente do sensor (base do cone) e o objeto imageado (vértice do cone). A partir da Figura 3 podem-se verificar os processos de emissão de energia (A), a excitação de energia (B) e a visualização do alvo pelo sensor (C) com a interação de energia refletida e formação de ângulos de visada (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

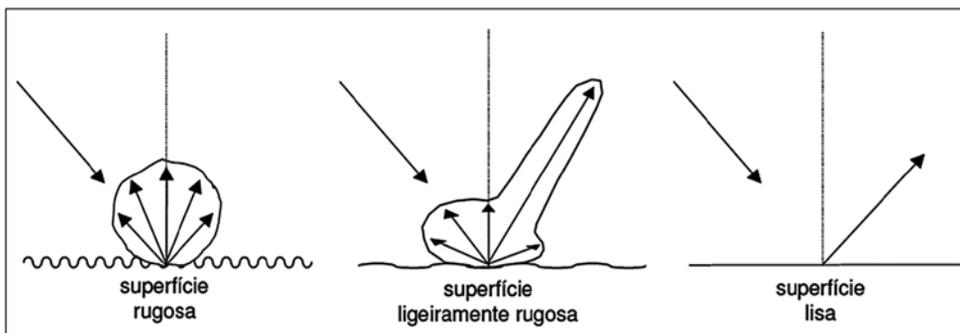
**Figura 3 - Comportamento da radiação**



Fonte: Ponzoni; Shimabukuro (2007)

As imagens de RADAR (*Radio Detecting And Ranging*) são originais de sistemas ativos que operam na faixa de rádio ou de microondas, cujo princípio de funcionamento se pauta na emissão de pulsos de ondas e registro do sinal de retorno. Os sinais de retorno são registrados em formato de nível de cinza, proporcional à intensidade do sinal recebido que, por sua vez, pode variar em razão do tamanho e formato dos alvos e ainda, pela orientação em relação ao sistema e ao comprimento de onda (LIMA, 1995; ZYL, 2001; FREITAS et al., 2003; KUPLICH, 2003; MORENA et al., 2004; HOTT et al., 2006; SOUZA; LOCH, 2006).

Imagens originadas de dados de radar podem apresentar sérias limitações em função do processo de obtenção e das condições de superfície. Isto se verifica principalmente em regiões montanhosas, por a feição oposta à direção da emissão do sinal não ser imageada, ou por o local favorecer o espalhamento do sinal. A distorção de alvos pode ocorrer em função do resultado da interação entre a radiação de microondas com os alvos da superfície, o que causa uma atenuação de ruído, chamado de *Speckle*. Em tais ocorrências o sensor pode não registrar retorno de sinal de pixels adjacentes devido à anulação do sinal por fenômenos de reflexão, absorção ou retroespalhamento, o que pode ocasionar exageros visuais em um mesmo alvo, com níveis de cinza zero (preto) ou muito altos (branco). Os distintos comportamentos dos sinais de radar em função da rugosidade da superfície podem ser verificados na Figura 4 (FREITAS et al., 2003; KUPLICH, 2003; MORENA et al., 2004; HOTT et al., 2006; SOUZA; LOCH, 2006; ZYL, 2001).

**Figura 4 - Espalhamento de microondas em distintas superfícies**

Fonte: Freitas et al. (2003)

Deve-se atentar ainda que o contexto metodológico de trabalhos de sensoriamento remoto deve ter como ponto de partida a definição clara dos objetivos, seguido da escolha de imagem compatível com a proposta de trabalho, o que permite chegar a resultados consistentes e confiáveis. Os conceitos de “estrutura” e “resolução” são os parâmetros das imagens, os quais devem ser adotados no corpo técnico dos trabalhos e nos procedimentos do sensoriamento remoto, uma vez que se relacionam diretamente com a definição e o comportamento dos alvos nas imagens (EASTMAN, 1996; PONZONI; REZENDE, 2002; PINHEIRO, 2003; AGGARWAL, 2004; HIREMATH; KODGE, 2010; NOVO, 2010).

A estrutura de imagens consiste do arranjo cartesiano dos elementos na forma de malha ou *gridd*, na qual cada elemento recebe a denominação de *pixel* ou cela. Todo *pixel* é individualmente localizado por coordenadas X (linha) e Y (coluna) (EASTMAN, 1996; NOVO, 2010). Toda imagem a partir das distintas bandas se apresenta, originalmente, em tons de cinza, principal forma de representar a intensidade do sinal elétrico registrado. Cada cela possui um valor numérico (Z) de acordo com seu nível de cinza (*digital number* - DN) em função das variações de cores do preto (absorção de energia) ao branco (reflexão de energia) proporcional às distintas formas de interação energia-alvo de cada faixa do espectro eletromagnético. O conceito de resolução é adotado para identificar as características dos sistemas imageadores em geral (AGGARWAL, 2004; EASTMAN, 1996; NOVO, 2010), sendo esta definida como:

a) Resolução Espectral: indica a região de origem da imagem no espectro eletromagnético, ou seja, o tipo de onda registrada. Esta resolução é adotada para a identificação de distintos alvos, pautando-se no princípio de que certos alvos podem ser mais bem definidos que outros em bandas de imagens.

b) Resolução Espacial ou Geométrica: trata diretamente do tamanho do *pixel* em unidade de metro. Toda área imageada no limite interno de um *pixel* terá uma única cor, ou seja, se a resolução espacial é de 30m x 30m, este *pixel* será representado de acordo com o alvo predominante em uma área de 900m<sup>2</sup>. Quanto menor a área

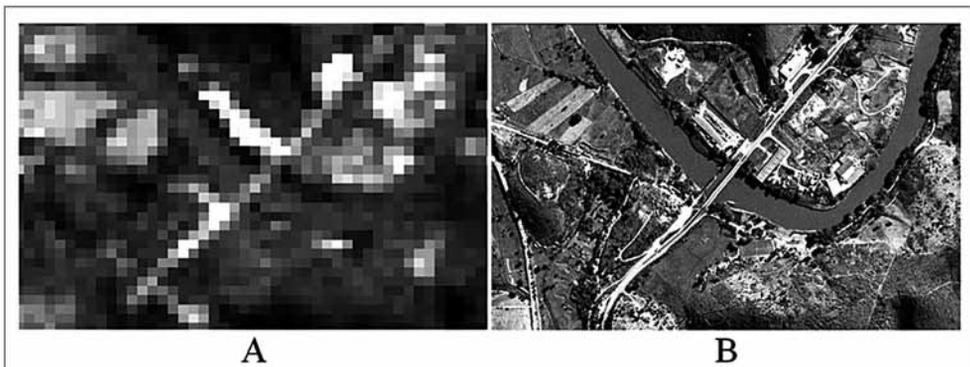
quadrada do *pixel*, maior é a resolução espacial da imagem, consequentemente, melhor será a definição dos alvos.

c) Resolução Temporal: trata do tempo de cobertura, em dias, que o sensor leva para passar sobre uma mesma área e, ainda, da largura da faixa de imageamento. É uma informação de grande importância, principalmente para análises multitemporais, para levantamentos ou previsão das datas das imagens.

d) Resolução Radiométrica: cada banda é gerada a partir de determinado intervalo, frequência de onda, cuja redução de amplitude ou centralização do intervalo resultará em melhor resolução espectral das imagens.

A Figura 5 permite uma comparação entre imagem LANDSAT (A) de resolução espacial de 30m x 30m, com uma aerofoto (B) de resolução espacial de 1m x 1m, ambas na região do visível. Devido ao menor tamanho do pixel é possível definir nitidamente nas aerofotos diversas ocorrências, a exemplo de edificações (casas, estrada e ponte), fatores naturais como o rio e formas de uso do solo.

**Figura 5** - comparativo de resolução espacial de imagem TM-LANDSAT (A) com aerofoto (B)



O princípio de geração de imagens se pauta na coleta e registro da energia solar refletida pelo alvo. Tais fatores, individualmente ou considerados de forma conjunta, podem se tornar empecilhos significativos em trabalhos de sensoriamento remoto de acordo com seus objetivos. Segundo Pinheiro (2003), a qualidade da imagem gerada pode variar em função da junção de um conjunto de fatores e variáveis, pode-se citar, principalmente, a frequência de onda adotada; as propriedades físicas, químicas e biológicas dos alvos; as condições de iluminação; a cobertura de nuvens e a inclinação do sensor.

### ***Tratamento de imagens***

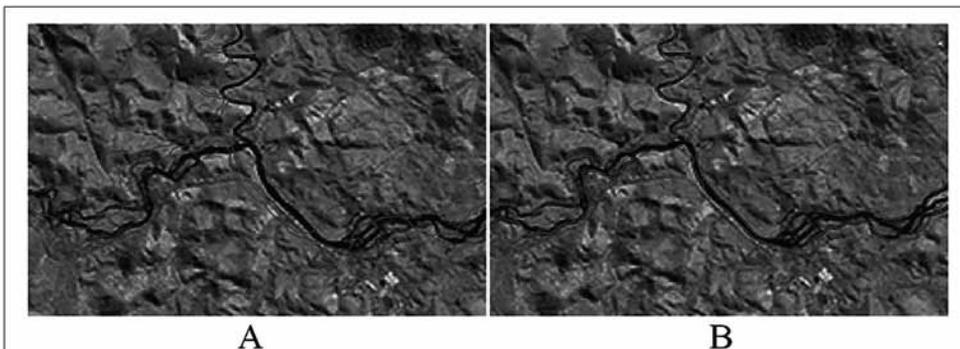
Trabalhos com imagens devem ser precedidos de uma série de procedimentos chamados de tratamento, que consistem prioritariamente da correção geométrica e

da identificação de padrões para melhor visualização humana. Tais procedimentos são adotados para imagens digitais e são comumente realizados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), categoria de softwares que permitem manipular dados vetoriais (linhas, pontos e polígonos) e matriciais (imagens), e são originalmente associados a uma projeção cartográfica (EASTMAN, 1996; ESRI, 2006; WENG, 2010). Dentre os programas utilizados para tratamento de imagens podem-se citar SPRING, IDRISI, ENVI, ERDAS, ArcGIS.

Durante o percurso de um equipamento (órbita, no caso dos satélites, ou linha de voo, no caso dos aviões), pode haver deslocamentos e, conseqüentemente, deslocar-se o sensor no momento do registro, o que gera distorções nas imagens. Para fim de suprimir ou reduzir tais distorções, as imagens são associadas a bases cartográficas digitais, procedimento conhecido por *georeferenciamento*, de forma a enquadrar alvos nas ocorrências mapeadas (MOREIRA, 2005; ESRI, 2006; NOVO, 2010). A Figura 6 representa o procedimento de correção de imagem. Nela se verifica que na imagem original (A) a hidrografia (azul) não se encaixa na hidrografia vetorizada (vermelho), mas após o procedimento de georeferenciamento (B) a imagem passa a se encaixar no vetor.

De acordo com os objetivos de um trabalho, as imagens podem ser adotadas em sua condição original, ou seja, em tons de cinza, nas quais são observadas as respostas dos alvos especificamente em cada faixa. Podem ainda ser geradas imagens a partir da combinação de distintas bandas, associadas aos *filtros* coloridos. Os filtros são originalmente nas cores básicas (azul, verde e vermelho), os quais, quando associados às imagens, permitem a geração de diferentes imagens (CÂMARA et al., 1996; EASTMAN, 1996; ESRI, 2006).

**Figura 6 - Imagem TM-LANDSAT original (A) e georeferenciada (B)**

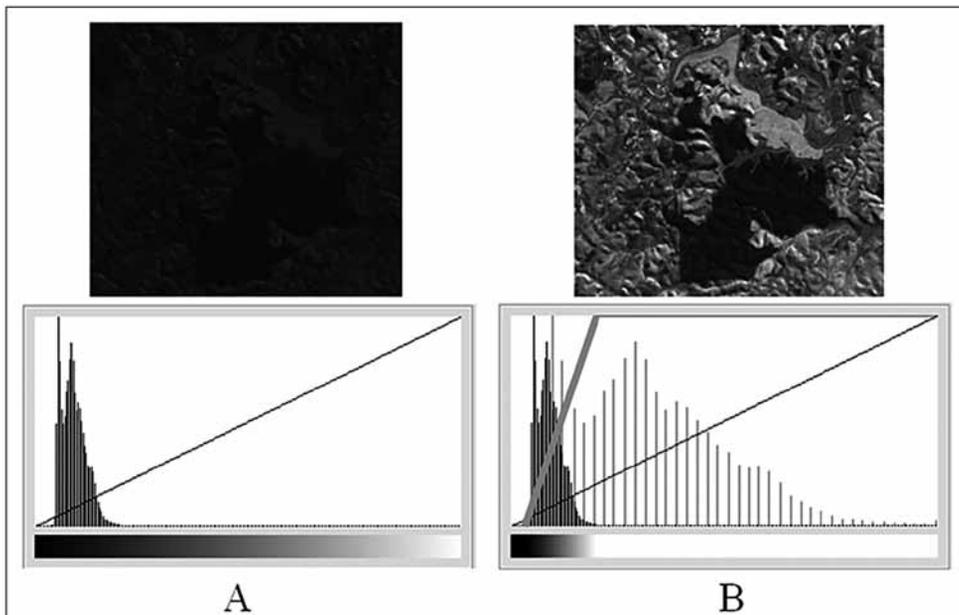


Os valores dos pixels de uma imagem se distribuem entre 0 (preto) e 255 (branco), e representam o máximo de absorção e o máximo de reflexão de energia, respectivamente. Esta distribuição pode ser verificada no *histograma* das imagens, onde são representados os principais parâmetros estatísticos das imagens. Toda imagem é originalmente distribuída em sua amplitude máxima, o que dificulta a distinção dos

alvos pela visão humana. O recurso de contraste favorece a distinção dos alvos nas imagens, pois as cores são adequadas ao limite dos valores de máximo e mínimo das ocorrências espaciais (CÂMARA et al., 1996; CROSTA, 1992; EASTMAN, 1996; ESRI, 2006).

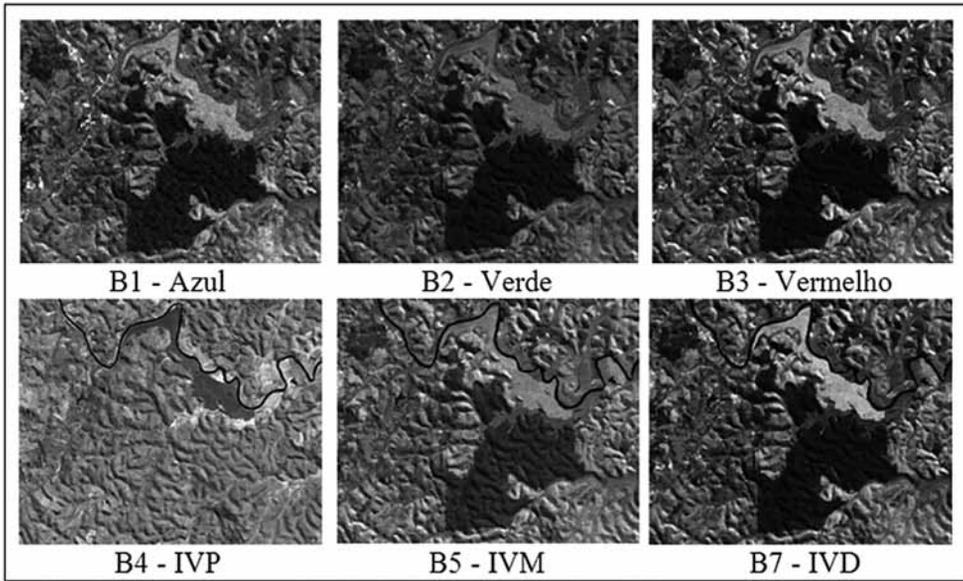
Na Figura 7, a imagem referente à banda 3 (vermelho) do sensor TM-LANDSAT 5, de 15/07/2009, mostra-se sem contraste em A e contrastada em B. Na cena A o histograma encontra-se em sua distribuição total, entre 0 e 255, o que não permite definir visualmente a imagem. Na cena B os DN estão distribuídos de acordo com suas ocorrências, fato assinalado pela linha verde que permite identificar os alvos. Os procedimentos de tratamento das imagens foram feitos em ambiente de SPRING 5.1.7.

**Figura 7 - Comparação de imagens sem contraste (A) contrastada (B)**



Na Figura 8, encontram-se exemplos de diferentes combinações das imagens do sensor TM-LANDSAT 6 (15/07/2009). Na sequência estão as bandas 1 (azul), 2 (verde), 3 (vermelho), 4 (IVP), 5 (IVM) e 7 (IVD), às quais foram aplicados filtro monocromático e contraste.

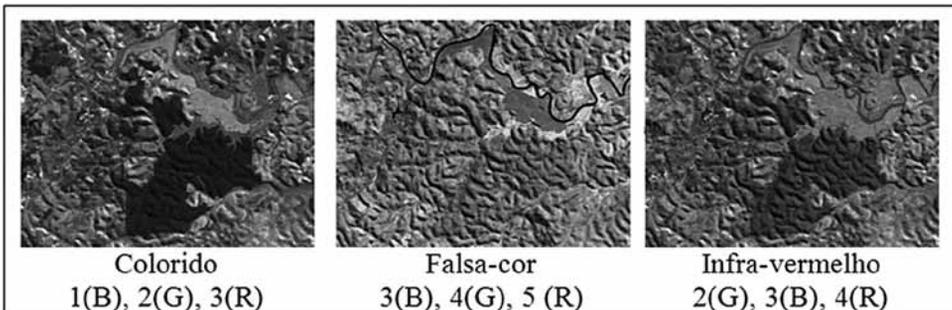
**Figura 8 - Imagens TM-LANDSAT 5 (15/07/2009) com filtro monocromático**



A imagem é de um trecho do município de Itapemirim, sul do estado de Espírito Santo, região marcada por supressão de florestas nativas para introdução de atividades agropecuárias, com destaque para a cana-de-açúcar. Com exceção da banda 4, pode-se verificar a ocorrência de um fragmento florestal, de cor mais escura, o que justifica a característica de absorção de radiação de acordo com cada tipo de frequência do espectro eletromagnético. Entretanto, a banda 4 é a que permite a melhor identificação do curso de água na sua porção norte, devido à sua cor mais escura nesta faixa e ao comportamento meandrante do rio.

Na Figura 9 são apresentados exemplos de combinações de bandas acopladas a diferentes filtros que representam as cores básicas: o Azul ou *Blue* (B), Verde ou *Green* (G) e Vermelho ou *Red* (R).

**Figura 9 - combinações de imagens espectrais e filtros de ambiente de SIG**



## *Interação entre a vegetação e a radiação eletromagnética*

O fluxo de radiação eletromagnética (REM) que atinge os objetos (energia incidente) sofre diversos tipos de alteração ao contato com esses objetos. Essas alterações variam de acordo com a relação verificada entre o tipo de REM e a capacidade dos alvos para absorver, transmitir ou refletir a energia. Esses processos funcionam em diferentes proporções (MOREIRA, 2005), e podem ser explicados como:

- Absortância: característica de alvos com maior capacidade de absorver a REM, que apresentam menores valores de energia transmitida e refletida.
- Transmitância: propriedade do alvo que deixa a energia atravessar e atingir outras camadas.
- Reflectância: comportamento característico de reflexão e espalhamento da energia incidente.

O estudo da vegetação por SR está atrelado a uma série de variáveis conforme atestam Bohrer (2000, 2009); Lillesand (2004) e Novo (2010):

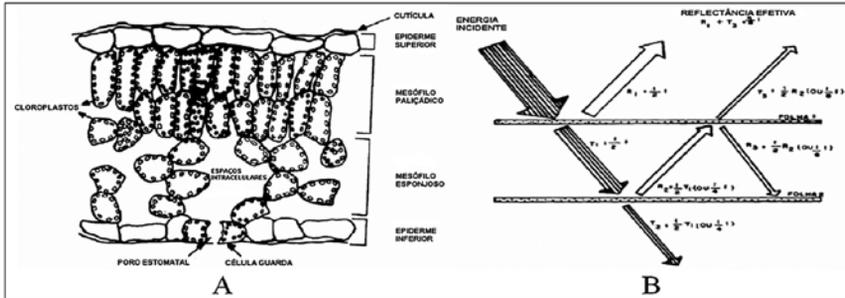
- a escala de trabalho, ou seja, partes da planta, toda a planta, um conjunto de plantas e vários conjuntos de plantas espacialmente distribuídos;
- o ambiente em que se encontram as plantas;
- a época do ano, devido às condições de iluminação e disponibilidade hídrica; e
- os tipos e parâmetros das imagens utilizadas.

A relação entre a REM e a vegetação varia conforme as condições da vegetação (tipo, densidade e condições fisiológicas) e a frequência de onda, fenômeno que irá se refletir na imagem. Para melhor entendimento desse processo serão apresentados os principais componentes de uma folha, considerando que essa parte da planta interage diretamente com a energia, considerando também o comportamento da radiação no interior da planta e a interação desta com o dossel de vegetação, de acordo com Moreira (2005) e Ponzoni e Shimabukuro (2007). A Figura 10 apresenta os principais componentes de uma folha (A) e o comportamento da radiação do IVP em dossel de vegetação (B),:

- 1) cutícula: formada por pelos e camada de cera, que interagem diretamente com a radiação solar.
- 2) Epiderme superior: formada por células alongadas, posicionadas verticalmente, que desempenham funções específicas.
- 3) Mesófilo ou parênquima paliádico: composto por células ricas em cloroplasto, onde se encontram os pigmentos fotossintetizantes (clorofilas).
- 4) Mesófilo lacunoso ou esponjoso: formado por células mais curtas e maior espaçamento intracelular, preenchido por gases dos processos fisiológicos ( $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ ).
- 5) Epiderme inferior: formada por células semelhantes às encontradas na

- epiderme superior, mas com presença de estômatos.  
 6) Cutícula inferior: também formada de pelos e cera.

Figura 10 - Estrutura interna de uma folha (A) e comportamento da REM do IVP (B) em camadas de folhas



Fonte: Ponzoni; Shimabukuro (2007)

Em uma consideração generalista sobre o comportamento da REM em uma única folha, entende-se que parte dessa radiação é refletida ao entrar em contato com a cutícula, parte é absorvida pelas células fotossintetizantes do parênquima paliçádico, parte sofre espalhamento nos espaços intracelulares do parênquima esponjoso, por fim, a porção que não for retida pela folha é transmitida para as camadas inferiores. Entretanto, esse comportamento é variável, pois cada tipo de radiação tem comportamento diferenciado em cada parte da folha (MOREIRA, 2005; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). O comportamento da REM deve ser considerado de forma conjunta pelos processos interativos (absorção, transmissão e reflexão), que constituem o chamado Comportamento Espectral da Vegetação. Esse comportamento pode ser explicado a partir das variáveis verificadas entre frequência de onda e condições físico-químicas da planta. São elas:

- REM do visível: o aumento da clorofila tende a aumentar a absorção desta energia, para transformação e armazenamento de elementos vitais para a planta e pode resultar na diminuição de energia que atravessa a planta e atinge suas porções mais baixas, o que justifica a coloração escura da vegetação nas imagens desta faixa. Esse fator pode ser confirmado ao se contrapor uma folha com o sol e verificar que ela não retém todo o brilho da fonte.
- REM do IVP: nesta frequência a energia apresenta os maiores índices de refletância pelas folhas, devido à baixa absorção e médio espalhamento resultante da interação da REM com o mesófilo. Entretanto, fatores externos podem alterar os índices de água e ar no mesófilo, modificando assim os padrões de refletância, a qual pode aumentar proporcionalmente com o aumento dos espaços intracelulares.
- REM do IVM: este tipo de radiação é absorvido pela água, o que torna a refletância das folhas e da vegetação, em geral, relativamente pequena em imagens destas bandas.

O dossel vegetal pode ser entendido como o produto da sobreposição de folhas, o qual pode variar quanto ao tipo e fisionomia da vegetação, incluindo-se florestas naturais ou plantadas, culturas agrícolas e áreas de diferentes níveis herbáceos. Desta forma, o comportamento espectral de folhas isoladas e dosséis pode ser semelhante, o que permite que sejam identificados padrões em imagens multiespectrais (MOREIRA, 2005).

A figura 8 demonstra que a energia incidente atinge o dossel (seta com ranhuras), ocorrendo uma constante redução da transmitância para as camadas inferiores. Essa redução ocorre devido à reflexão (seta vazia) de parte da REM ao contato com a folha. A porção reduzida de energia que atinge as camadas inferiores também é refletida, mas atua em sentido contrário, ou seja, da região dorsal para a superfície, podendo atravessar a folha ou ser novamente refletida, e assim sucessivamente. Esse comportamento varia conforme o Índice de Área Foliar (IAF), que é a relação entre a densidade de folhas por área do terreno, assim, quanto maior o IAF menor a reflectância no visível e maior no infravermelho próximo (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

## ***Métodos de estudos da vegetação***

### *Classificação de imagens*

Ainda hoje a maioria das técnicas classificatórias demanda grande esforço de edição manual. Essa realidade divide a comunidade científica quanto às vantagens da adoção de técnicas automatizadas, a ponto de muitos estudos estarem atrelados somente a interpretações visuais (CRUZ et al., 2009).

Os procedimentos de classificação são realizados em ambiente de SIG e consistem na identificação automática, realizada pelo *software*, de alvos a partir de amostras de *pixels* ou delimitação de parâmetros das imagens. Tais procedimentos tornam o processo de mapeamento ou reconhecimento de características da superfície terrestre menos subjetivo e com maior potencial de repetição em situações subsequentes (NOVO, 2010). As técnicas de classificação de imagens se dividem em *classificação supervisionada* (ação direta do pesquisador para identificação dos alvos via amostras) e *classificação não-supervisionada* (distinção dos alvos por agrupamentos de *pixels*), as quais adotam parâmetros estatísticos distintos (EASTMAN, 1996; MOREIRA, 2005; WELL et al., 2006).

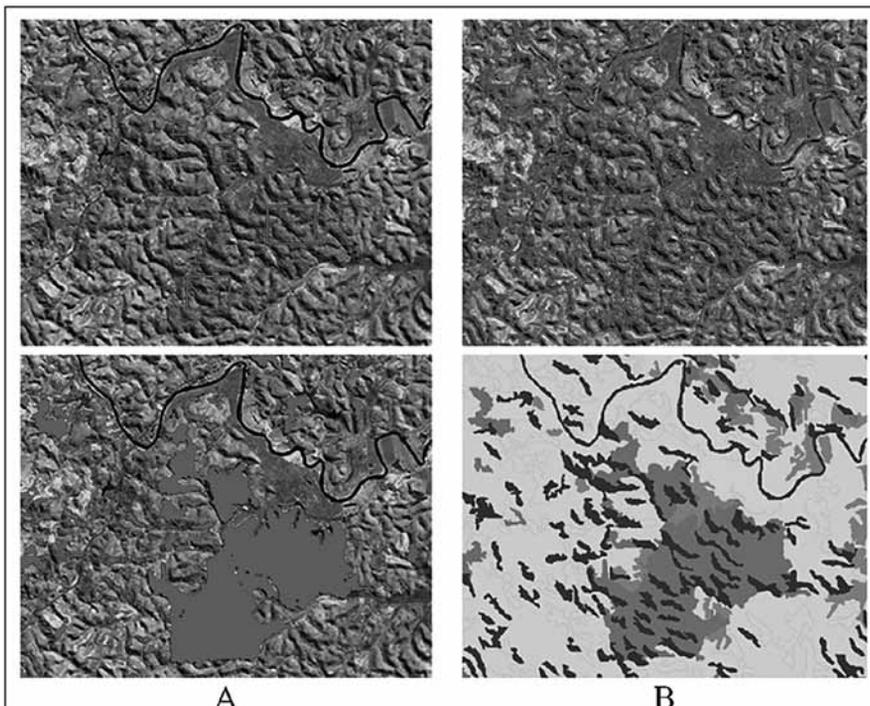
Nos procedimentos de classificação supervisionada, a parte da imagem que compõe o alvo é chamada de “área de treinamento” e os *pixels* selecionados formam o “conjunto de treinamento”. A partir desses elementos, são adotados modelos estatísticos (de probabilidade) ou determinísticos para identificação de *pixels* similares. Nesse tipo de classificação, é necessário que o usuário conheça alguma feição da área a ser classificada, antes de iniciar o processo. Segundo Crosta (1992), esse tipo de observação é conhecido como verdade terrestre (*ground truth*), áreas selecionadas para comparação, com a qual todos os

pixels desconhecidos da imagem serão comparados para definir a qual classe pertence. Os procedimentos mais comuns são o SUPERVISION-MAXVER, MAXVER-ICM, Redes Neurais Artificiais e Distância Euclidiana (CAMARA et al., 1996; NOVO, 2010).

A classificação não-supervisionada baseia-se no princípio de que o computador é capaz de identificar automaticamente as classes dentro de um conjunto de dados (CROSTA, 1992), ou seja, os pixels de uma imagem são alocados em classes sem que o usuário tenha conhecimento prévio de sua existência. Esse procedimento permite ao usuário conhecer a distribuição de pixels por classes espectrais (FERREIRA JÚNIOR, 2005). Nesse caso, são consideradas as informações de cada pixel e de seus vizinhos, de forma a delimitar áreas de propriedades espectrais homogêneas (nuvens). Os procedimentos mais comuns são ISOSEG, BATTACHARYA e ClaTex (CAMARA et al., 1996; NOVO, 2010).

A Figura 11 exemplifica procedimentos de classificação nas imagens TM. A cena 10-A demonstra o procedimento de amostragem de pixels para classificação supervisionada (MAXVER 99%) para identificação de vegetação com características de florestas, que recebe a cor vermelha. A cena 10-B demonstra o procedimento de segmentação de imagens, no qual os pixels são separados por grupos (*clusters*), seguido de classificação não-supervisionada (ISOSEG 75%), onde se identificou floresta (verde), sombra (verde oliva), vegetação intermediária (verde claro), água (azul), agropecuária (amarelo) e áreas inundáveis (ciano).

**Figura 11 – Uso de recursos de classificação supervisionada (A) e não-supervisionada (B)**



A resolução espacial das imagens influi diretamente nos processos de classificação. Apesar de a alta resolução ser uma característica extremamente desejável na identificação e delineamento mais preciso de alvos da superfície terrestre, esse maior detalhamento pode trazer certas dificuldades à classificação automática desse tipo de imagem. A ocorrência de pixels com valores de cinza muito próximos ou mesmo iguais, por exemplo, dificulta a classificação por métodos estatísticos que requerem determinados tipos de distribuição dos dados, para diferenciar as classes ou tipos de cobertura do solo (LUZ, 2002). Algumas vezes, após os procedimentos de classificação, pode-se realizar uma retificação do produto gerado através de edição manual (refinamento/reinterpretação da imagem) por um fotointérprete, visando à correção dos erros de classificação observados em campo (FIDALGO; ABREU, 2005; BOHRER et al., 2009; CRUZ et al., 2009).

### ***Índices de vegetação***

A análise da absorção, transmissão e reflexão de radiação pela vegetação que compõem o *Comportamento Espectral da Vegetação* dependerá dos fatores químicos (pigmentos, fotossíntese e água) e estrutura (tecidos) e envolve o estudo de folhas isoladas e dosséis vegetais (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Entender as formas de resposta espectral com base no dossel da vegetação pode ser uma boa alternativa para inferir ocorrências de supressão, aumento da cobertura de vegetação, ou ainda redução de sua intensidade.

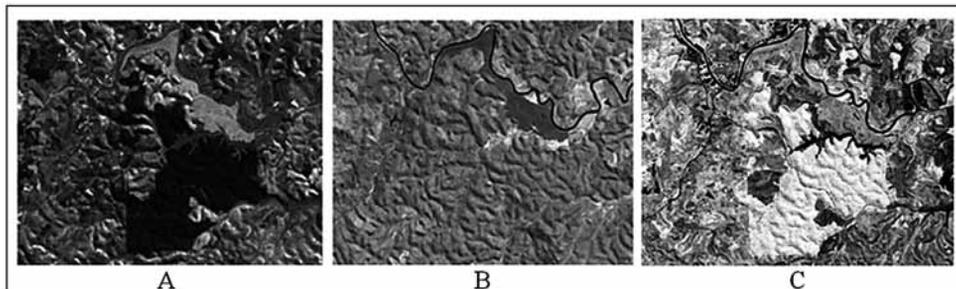
Para o desenvolvimento de estudos de cobertura vegetal as principais faixas adotadas são a região do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IVP), devido às diferentes respostas espectrais da vegetação nessas faixas. O comportamento da vegetação na região do vermelho (V) é característico de absorção de energia. Esse tipo de ocorrência gera imagens escuras de forma proporcional à densidade da vegetação, a mais densa apresenta cor mais escura, com tons de cinza próximos ao preto, e a menos densa, cor mais clara, devido à maior interação com o solo. Na região do infravermelho (IVP) a vegetação apresenta comportamento oposto, ou seja, a cobertura vegetal tende a refletir esse tipo de energia, gerando imagens mais claras (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

O contraste entre essas imagens pode ser explorado de forma a gerar novas imagens que indiquem comportamentos distintos entre solo exposto (absorção) e vegetação (reflectância). São chamadas de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI). Nas imagens NDVI as respostas de vegetação apresentam um máximo de reflectância em vegetação densa (florestas principalmente), máximo de absorção em locais desprovidos de vegetação (solo exposto, edificações) e comportamento intermediário em áreas relativamente vegetadas (ACCIOLY et al., 2002; MOREIRA, 2005; WELCH et al., 2005; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; KARIYEVA; VAN LEEUWEN, 2011).

A Figura 12 apresenta procedimento em que foram utilizadas imagens da região

do vermelho (A) e infra-vermelho próximo (B) para geração de NDVI (C). Nota-se no produto final maior brilho na ocorrência de florestas, o qual diminui na vegetação intermediária, e maior absorção da REM nos corpos hídricos e áreas inundáveis.

**Figura 12** - Uso de imagem do Vermelho (A) e IV Próximo (B) para geração de NDVI (C)



## *Aplicações do Sensoriamento Remoto*

### *Estudos aplicados à exploração de índices de vegetação*

Imagens NDVI podem ser utilizadas para análises multitemporais de vegetação a partir da subtração de imagens de distintos períodos. Esse procedimento permite, seguido da classificação temática, que sejam apontadas distintas ocorrências espaciais em uma nova imagem gerada, devido à possibilidade de se explorar o comportamento diferenciado entre áreas vegetadas e áreas de solo exposto (LOUZADA et al., 2009).

Accioly et al. (2002) avaliaram os fragmentos de vegetação da Chapada do Araripe (Estado do Ceará) a partir de análises de informações espectrais do sensor TM-LANDSAT (bandas individuais e transformadas – NDVI gerada). Como principal resultado, foi observada uma correlação positiva com as estimativas dos parâmetros estruturais da vegetação (altura média da parcela, da área basal à altura do peito e da área basal na base) e melhor desempenho das imagens transformadas em relação às bandas isoladas.

Kariyeva e Van Leeuwen (2011) analisaram fatores ambientais que contribuem para resposta espectral da vegetação em diferentes regiões da Ásia. Para tanto utilizaram imagens NDVI geradas a partir do sistema AVHRR e testaram as hipóteses por comparação de parâmetros estatísticos (regressão linear) e correlação aos fatores ambientais (solo, topografia e clima). Verificou-se que as respostas fisiológicas das estepes eram influenciadas pelas variações anuais de temperatura, que a vegetação da região montanhosa era influenciada pelo gradiente de elevação e que a região desértica era afetada anualmente pelas variações de temperatura e precipitação.

A fim de realizar uma análise do comportamento espacial da cobertura vegetal da Floresta Nacional de Pacotuba (Cachoeiro de Itapemirim-ES) entre os

anos de 1985 e 2008 a partir de imagens TM-LADSAT 5, Louzada *et al.* (2009) utilizaram-se imagens NDVI. Foram gerados NDVI dos respectivos anos e realizados procedimentos de subtração entre eles de forma a gerar uma imagem de subtração que, pela adequação de parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e variância), foi reclassificada e tematizada, tornando possível identificar as áreas de desmatamento (4,14%), não-mudança (78,69%) e regeneração (17,17%) no período analisado. Imagens NDVI geradas a partir do sistema AVHRR foram úteis para identificar áreas desmatadas no corredor ecológico da América Central entre os anos de 1982 e 2000. Os procedimentos adotados permitiram classificar e identificar três principais classes de cobertura do solo: áreas arborizadas, uso atual do solo e áreas desmatadas (WELCH *et al.*, 2005).

O NDVI pode ainda ser usado como suporte na prevenção e combate de incêndios florestais. Em estudo realizado por Carrão *et al.* (2002), a vegetação foi avaliada por ser fundamental para as condições de inflamabilidade e constituir uma informação de base em mapas de risco. Nesse caso, foi gerado um mapeamento do uso do solo com informações sobre a biomassa vegetal, aferida a partir do cálculo do NDVI utilizando imagens TM-LANDSAT. Tendo em conta os estudos supracitados, verifica-se a utilização do NDVI para diversos fins e objetivos. Carrão *et al.* (2002) destacam o NDVI como um dos mais antigos e testados índices de vegetação.

### *Estudos relacionados à classificação da vegetação e métricas da paisagem*

A vegetação é considerada como um importante indicador das condições ambientais de uma região, pois protege o solo, reduz o transporte de sedimentos e o assoreamento dos recursos hídricos, além de servir de habitat para animais silvestres, contribuindo para manutenção da diversidade biológica (CEMIN *et al.*, 2005). Nesse contexto, destaca-se a importância dos mapas de vegetação, que demonstram a localização, extensão e distribuição dos tipos de vegetação de uma dada região, apresentando um inventário das comunidades vegetais existentes (BOHRER *et al.*, 2009), gera-se uma ferramenta para a análise das relações entre a vegetação e o meio físico e traçam-se padrões de referência no monitoramento das mudanças temporais na vegetação, fornecendo embasamento científico ao planejamento do uso da terra (BOHRER, 2000).

A utilização de índices de estrutura de paisagens abre uma nova perspectiva para a aplicação prospectiva de sensoriamento remoto em estudos de paisagem, com a finalidade de acompanhar e compreender os processos em níveis regionais, continentais e globais (SOARES-FILHO, 1998). Os índices de estrutura da paisagem, obtidos por imagens de sensoriamento remoto, podem ser usados não só para monitorar as grandes mudanças nas paisagens, mas também para estimar a evolução do padrão da paisagem

por mapeamento de suas unidades, visto que as alterações detectadas nas imagens de satélites, podem auxiliar no entendimento de mudanças nas condições ambientais (LUZ, 2002). Uma vantagem da aplicação dos índices de estrutura em estudos de paisagem é a redução da necessidade de aquisição de informações em campo e, conseqüentemente, dos custos envolvidos, já que é possível monitorar por sensoriamento remoto as mudanças ecológicas em nível de paisagem (INNES; KOCH, 1998). Metzger (1997), Hargis et al. (1998), Tabanez et al. (1997), Metzger (2000), Ripple et al. (2000), Fritzsos et al. (2004), Herrmann et al. (2005), Cemin et al. (2009), Ribeiro et al. (2009) utilizaram as métricas em estudos relacionados à fragmentação, composição e configuração da paisagem.

Uma análise do uso do solo foi realizada por Barbosa e Campos (2011) no estado de Roraima com o intuito de distinguir tipos de vegetação de formas de ação antrópica. Para tanto, foi realizada a vetorização manual em imagens de alta (LANDSAT TruEarth®) e altíssima (Ikonos e QuickBird) resolução espacial e, verificado o rápido crescimento de atividades agrícolas com supressão de cobertura vegetal natural, foi indicada a adoção urgente de programas de monitoramento ambiental.

Arroio-Mora et al. (2005) utilizaram aerofotos e imagens de satélite para avaliar o comportamento da cobertura vegetal na região de Chorotega (Costa Rica) entre 1960 e 2000. A partir de procedimentos de classificação, identificou-se supressão de cobertura vegetal (-2,76%) no primeiro período de análise, devido ao crescimento de práticas pecuárias. No segundo período registrou-se crescimento, devido às iniciativas de arborização (1,63%), e no terceiro período, aumento de 4,91%, como resposta aos processos de arborização.

Nascimento et al. (2006) mapearam fragmentos de floresta nativa na bacia do Rio Alegre, município de Alegre-ES, a partir da classificação de imagens IKONOS. Para a realização do diagnóstico de fragmentação de vegetação nativa (floresta) em nível de paisagem foram analisadas as variáveis área, perímetro, forma, vizinhança das classes e histórico de uso e ocupação do solo (perturbação). Os autores verificaram que as atividades agrícolas (café, pastagem e reflorestamento) representam 80,21% da área, seguido de fragmentos florestais (14,31%) e ocorrências de menor contribuição (5,48%).

Com o objetivo de analisar e descrever os tipos de vegetação da região e sua relação com o ambiente físico, por mapeamento da cobertura vegetal e uso do solo, Bohrer *et al.* (2009) utilizaram dados temáticos espaciais em combinação com a interpretação de imagens orbitais, e possibilitaram o mapeamento e classificação da vegetação e uso do solo no Centro de Diversidade Vegetal de Cabo Frio. Os autores destacaram que mapas gerados (vegetação e uso do solo) poderão ser utilizados como base para novos estudos florísticos, ecológicos e de dinâmica da paisagem, além de subsidiar o planejamento ambiental e a conservação da biodiversidade da região.

Atualmente no Brasil, o Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) tem sido

considerado como um dos mais importantes instrumentos de gestão ambiental voltado para o planejamento do desenvolvimento territorial em bases sustentáveis (MMA, 2006). Nesse sentido, Cruz *et al.* (2009) elaboraram o mapa de uso da terra do estado do Rio de Janeiro utilizando imagens do sensor LANDSAT TM obtidas em 2007, com o objetivo de embasar o ZEE desse estado. Verificaram que as classes pastagem e floresta perfazem quase 80% do território, que a distribuição diferenciada dessas classes para as regiões de estado, com concentração de florestas em relevo mais acidentado, forma o corredor da Serra do Mar e que um mosaico de pequenos fragmentos se inserem numa matriz de pastagem. Esses resultados possibilitaram a configuração de um painel atualizado, de extrema relevância para o planejamento e a gestão do território de caráter inédito para o estado do Rio de Janeiro.

De um modo geral, verifica-se que o mapeamento do uso e cobertura da terra, a partir de imagens de sensoriamento remoto, constitui um ramo do conhecimento de valor inestimável por sua diversidade de técnicas e métodos, já que dispõe de diferentes produtos de visualização espacial e de procedimentos de manipulação, que possibilitam direcionar distintas pesquisas. Dentre elas, as pesquisas direcionadas à ecologia e biodiversidade de paisagens são de fundamental importância, pois podem determinar áreas prioritárias para conservação. Destaca-se a relevância da vegetação nesses estudos, visto ser ela parte integrante da paisagem e servir como um indicador de outros atributos do ambiente e de suas variações no espaço (BOHRER *et al.*, 2009).

### ***Considerações Finais***

A partir dos conceitos, procedimentos e resultados apresentados, pode-se verificar que o desenvolvimento de um sistema para classificar dados sobre uso da terra, obtidos a partir da utilização de técnicas de sensoriamento remoto, tem sido muito discutido. No entanto, não há dúvidas quanto à relevância e eficácia das geotecnologias, que agilizam os estudos ambientais na geração de mapeamentos de uso da terra. O sensoriamento remoto mostra-se em constante evolução e cada vez mais presente nas distintas áreas do conhecimento científico, seja como procedimento direto ou como suporte, realizando análises da superfície terrestre e de seus recursos.

Vale ressaltar que o tipo e a quantidade de informações sobre uso da terra dependem da resolução espacial, radiométrica, espectral e temporal dos diferentes sistemas sensores, bem como da escala e resolução dos dados originais, além da escala de compilação e da escala final de apresentação. Sendo assim, a escolha da imagem e da metodologia de classificação do uso do solo deve ocorrer de acordo com os objetivos que se pretende alcançar e com as características da região estudada.

## **Referências**

- ACCIOLY, L.J. et al. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/LANDSAT. *Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6. n.3, p. 492-498, 2002.
- ADNYANA, I.W.S. et al. Monitoring of land use changes using aerial photograph and Ikonos image in Bedugul, Bali. *Remote Sensing and Earth Sciences*, v.3, p. 51-57, 2006.
- AGGARWAL, S. Principles of Remote Sensing. In: SIVAKUMAR, M.V.K. et al. *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*. Dehra Dun, India, World Meteorological Organization. 2004. p. 23-38.
- ALVES, A.K.; COSTA, M.V.C.V. Mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal da bacia do Ribeirão Santa Juliana no Triângulo Mineiro - MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. *Anais...* p. 2267-2274.
- BARBOSA, R. I.; CAMPOS, C. Detection and geographical distribution of clearing areas in the savannas (*lavrado*) of Roraima using Google Earth web tool. *Journal of Geography and Regional Planning*, v.4, n.3, p. 122-136, 2011.
- BOHRER, C. B. A. Vegetação, paisagem e o planejamento do uso da terra. *Geographia*, v.4, p. 103-120, 2000.
- BOHRER, C.B.A. et al. Mapeamento da vegetação e do uso do solo no centro de diversidade vegetal de Cabo Frio, Rio de Janeiro, Brasil. *Rodriguésia*, v.60, n.1, p. 1-23, 2009.
- CÂMARA, G. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers Graphics*, v.20, n.3, p. 395-403, 1996.
- CARRÃO, H. et al. Carta de Ocupação do Solo e Avaliação do Estado da Vegetação com Imagens de Satélite para Prevenção de Fogos Florestais. In: ENCONTRO DE UTILIZADORES DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, 7., 2002. Oeiras, Portugal. *Anais...*
- CASTILHO, R. *Sistemas orbitais e uso do território: integração eletrônica e conhecimento digital do território brasileiro*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 317p, 1999.
- CAZETTA, V. O status de realidade das fotografias aéreas verticais no contexto dos estudos geográficos. *Pro-Posições*, v.20, n.3, p. 71-86, 2009.
- CEMIN, G. et al. Uso de Sistemas de Informações Geográficas para análise de estrutura da paisagem no Município de Arvorezinha, RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* p. 2113-2120.
- CEMIN, G. et al. Composição e configuração da paisagem da sub-bacia do Arroio Jacaré, Vale do Taquari, RS, com ênfase nas áreas de florestas. *Revista Árvore*, v.33, n.4, p. 705-711, 2009.
- COLOMBO, R. et al. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, v.86, p. 120-131, 2003.
- Crosta, A. P. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas: IG/

UNICAMP. 1992. 170 p.

CRUZ, C.B.M. et al. Classificação Orientada a Objetos na Geração do Mapa de Uso e Cobertura da Terra do estado do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. *Anais...* p. 7789-7796.

DINIZ, F.J.A. *Geografia da Agricultura*. 2ª ed. São Paulo: Difel. 1984. 278 p.

EASTMAN, J.R. *IDRISI for Windows*. Editores da versão em português: HASENACK, H.; WEBER, E. Porto Alegre, UFRGS Centro de Recursos IDRISI, 1996. Disponível em: <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/arquivos/downloads>>. Acesso em: 2012.

EKSTRAND, S. Use of CASI for forest damage monitoring. In: INTERNATIONAL AIRBORNE REMOTE SENSING CONFERENCE EXHIBITION, 1., 1994, Strasbourg, France. *Anais...*

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Sistemas Orbitais de Monitoramento e Gestão Territorial*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009. Disponível em: <<http://www.sat.cnpem.embrapa.br>>. Acesso em: 2012.

ENVIRONMENTAL Systems Research Institute (ESRI). *Inc. ArcGIS Professional GIS for the desktop, version 9.2*. Software. 2006. Disponível em: <[www.esri.com](http://www.esri.com)>. Acesso em: 2012.

FERREIRA JÚNIOR, F.B. *Mapeamento da cobertura do solo utilizando imagem Áster - Usina Hidroelétrica de Emborcação*. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) - Universidade Federal de Minas Gerais. 2005. 31p.

FIDALGO, E.C.C.; ABREU, M.B. Uso de imagens ASTER para o mapeamento do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio São Domingos, RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* p. 3747-3753.

FJELDSA, J. et al. Are Biodiversity 'hotspots' correlated with current ecoclimatic stability? A pilot study using the NOAA-AVHRR remote sensing data. *Biodiversity and Conservation*, v.6, p. 401-422, 1997.

FLORENZANO, T.G. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97p.

FRANKLIN, S.E. Discrimination of subalpine forest species and canopy density using digital CASI, SPOT PLA, and LANDSAT TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.60, n.10, p. 1233-1241, 1994.

FRANKLIN, S.E. et al. Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, v.21, p. 61-79, 2000.

FREITAS, C.C. et al. Utilização de imagens de radar de abertura sintética na classificação de uso e ocupação do solo. In: EMBRAPA (Org.). *Geomática: Técnicas e Aplicações Avançadas*, 2003. 54p.

FRITZSONS, E. et al. Aplicação de índices de paisagem às florestas ciliares na Bacia do Alto Capivari - Região Cárstica Curitiba. *Revista Floresta*, v.34, n.1, p. 3-11, 2004.

- FURRER, R. et al. Multispectral imaging of land surface. *Geojournal*, v.32, n.1, p. 7-16, 1994.
- GOODWIN, N. et al. Classifying Eucalyptus forests with high spatial and spectral resolution imagery: an investigation of individual species and vegetation communities. *Australian Journal of Botany*, v.53, n.4, p.337-345, 2005.
- HARGIS, C.D. et al. The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. *Landscape Ecology*, v.13, p. 167-186, 1998.
- HERRMANN, B. C. et al. A paisagem como condicionadora de bordas de fragmentos florestais. *Revista Floresta*, v.35, p. 13-22, 2005.
- HIREMATH, P.S.; KODGE, B.G. Automatic Extraction of Open Space Area from High Resolution Urban Satellite Imagery. *International Journal of Image Processing*, v.4, n.2, p. 164-174, 2010.
- HOTT, M.C. et al. Brasil em Relevo: processamento de modelos digitais de elevação oriundos da missão SRTM. *Comunicado Técnico da EMBRAPA*, v.21, p. 1-5, 2006.
- INNES, J. L.; KOCH, B. Forest Biodiversity and its assessment by remote sensing. *Global Ecology and Biogeography Letters*, v.7, p. 397-419, 1998.
- KARIYEVA, J.; VAN LEEUWEN, W.J.D. Environmental Drivers of NDVI - Based Vegetation Phenology in Central Asia. *Remote Sensing*, v.3, n.2, p.203-246, 2011.
- KEY, T. et al. A comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate hardwood forest. *Remote Sensing of Environment*, v.75, p. 100-112, 2001.
- KUPLICH, T.M. Estudos florestais com imagens de RADAR. *Espaço & Geografia*, v.6, n.1, p. 65-90, 2003.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote Sensing and image Interpretation*. New York: John Wiley and Sons, 1994. 750 p.
- LIMA, M.I.C. *Introdução a interpretação radargeológica*. Rio de Janeiro: IBGE/ Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 124p., 1995.
- LOUZADA, F.L.R.O. ET AL. Análise da Cobertura Florestal por meio da subtração de Imagem NDVI na Floresta Nacional de Pacotuba, Cachoeiro de Itapemirim-ES. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. *Anais...* p. 3995-4001.
- LUSCH, D.P. *Introduction Environmental Remote Sensing*. Center of Remote Sensing and GIS Michigan State University, 1999.
- LUZ, N.B. *Análise espacial como subsídio à recuperação de ecossistemas apoiada na Ecologia de Paisagens e imagens Ikonos*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, 2002. 114p.
- MARQUES, L.S. et al. Mapeamento de uso e cobertura do solo no município de Jeremoabo (BA) por meio de Sensoriamento Remoto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa. *Anais...*

- MELESSE, A.M. et al. Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling. *Sensor*, v.7, p. 3209-3241, 2007.
- METZGER, J.P. Relationships between landscape structure and tree species diversity in tropical forests of South-East Brazil. *Landscape and Urban Planning*, v.37, p. 29-35, 1997.
- METZGER, J.P. Tree functional group richness and spatial structure in a tropical fragmented landscape (SE Brazil). *Ecological Applications*, v.10, p.1147-1161, 2000.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Zoneamento Ecológico-Econômico e Proteção da Biodiversidade*. Brasília: MMA, 2006. 36p.
- MOREIRA, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320p.
- MORENA, L. C. et al. An introduction to the RADARSAT-2 mission. *Can. J. Remote Sensing*, v.30, n.3, p. 221-234, 2004.
- NASCIMENTO, M.C. et al. Mapeamento dos fragmentos de vegetação florestal nativa da bacia hidrográfica do Rio Alegre, Espírito Santo, a partir de imagens do satélite IKONOS II. *Revista Árvore*, v.30, n.3, p. 389-398, 2006.
- NOVO, E. M. L. M. *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 388p.
- OLSEN, E. R. et al. A modified fractal dimension as a measure of landscape diversity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.59, p. 1517-1520, 1993.
- PAPASTERGIADOU, E. S. et al. Land use changes and associated environmental impacts on the Mediterranean shallow lake Stymfalia, Greece. *Hydrobiologia*, v.584, p. 361-372, 2007.
- PINHEIRO, E. S. Imagens com alta resolução espacial: novas perspectivas para o sensoriamento remoto. *Espaço & Geografia*, v.6, n.1, p. 43-64, 2003.
- PONZONI, F.J.; REZENDE, A.C.P. Influência da resolução espacial de imagens orbitais na identificação de elementos da paisagem em Altamira-PA. *Revista Árvore*, v.26, n.4, p. 403-410, 2002.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. *Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação*. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 144p.
- RIBEIRO, M.C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, v.142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.
- RIITERS, K. et al. Global-scale patterns of forest fragmentation. *Conservation Ecology*, v.4, n.2, p. 3 [on-line], 2000.
- RIPPLE, W. J. et al. Historical forest patterns of Oregon's central Coast range. *Biological Conservation*, v.93, p. 127-133, 2000.
- SANTOS, C. S. et al. Aplicações de imagens de satélite de alta resolução no planejamento urbano: o caso do cadastro técnico multifinalitário de Mata de São João, Bahia. In:

- SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. *Anais...* p.3843-3850.
- SOARES-FILHO, B.S. *Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica*. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 1998. 299 p.
- SOUZA, J. M.; LOCH, R. E. N. Refinamento do Modelo Digital de Elevação da Shuttle Radar Topography Mission - SRTM e sua qualidade cartográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC), 2006, Florianópolis. *Anais...* p. 1369-1376.
- ST-ONGE, B. A.; CAVAYAS, F. Automated forest structure mapping from high resolution imagery based on directional semivariogram estimates. *Remote Sensing of Environment*, v.61, p.82-95, 1997.
- TABANEZ, A. A. J. et al. Conseqüências da fragmentação e do efeito de borda sobre estrutura, diversidade e sustentabilidade de um fragmento de floresta de planalto de Piracicaba, SP. *Revista Brasileira de Biologia*, v.57, n.1, p. 47-60, 1997.
- TISCHENDORE, L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology*, v.16, p. 235-254, 2001.
- VOGELMANN, J.E. Assessment of Forest Fragmentation in Southern New England using Remote Sensing and Geographic Information Systemns Technology. *Conservation Biology*, v.9, n.2, p. 439-449, 1995.
- WELCH, R. M. et al. Impact of deforestation on the proposed Mesoamerican biological corridor in Central America. In: CONF ON HYDROLOGY, 19., AMS ANNUAL MEETING, 85, 2005, San Diego, USA. *Anais...*
- WELL, S. Avaliação de técnicas de classificação de imagens LANDSAT na detecção de alterações do uso e cobertura das terras do município de Campinas-SP. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite, 28p., 2006.
- WENG, Q. *Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications*. New York: McGraw-Hill, 2010. 397p.
- WICKLAND, D. E. Mission to the planet earth: the ecological perspective. *Ecology*, v.72, p. 1923-1933, 1991.
- WULDER, M. A. et al. High Spatial Resolution Remotely Sensed Data for Ecosystem Characterization. *BioScience*, v.54, n.6, p. 511-521, 2004.
- ZYL, J. J. V. The Shuttle Radar Topography Mission: a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronáutica*, v.48, p. 559-565, 2001.

*Artigo recebido em: 15 out. 2012*

*Aceito para publicação em: 14 jan. 2014*