

GEOTECNOLOGIA APLICADA AOS ESTUDOS FLORESTAIS

*Fábio Guimarães Gonçalves^{1 3}
João Roberto dos Santos^{2 3}*

RESUMO

Este trabalho procura contextualizar e atualizar aos usuários que lidam com questões florestais acerca de conhecimentos da tecnologia espacial como ferramenta de trabalho, como suporte a tomada de decisões com vistas aos processos de conservação ambiental ou de exploração sustentável em determinadas regiões.

I. Introdução

É de conhecimento geral que as florestas desempenham significativo papel no contexto dos benefícios ambientais, sociais e econômicos e que o agressivo percentual de conversão das terras florestais têm justificado um esforço global de inventário e monitoramento, visando uma melhor conservação dos remanescentes ou exploração mais racional dos recursos desses ambientes. Nesse contexto, o desenvolvimento contínuo da tecnologia espacial, com a disponibilização de imagens de distintas características intrínsecas dos sensores remotos que as geram, além do desenvolvimento de metodologias de extração de informações sensoriadas (SR), apoiadas por técnicas que empregam sistemas de informações geográficas (SIG), têm agilizado e permitido contínuo acompanhamento das

¹ Engenheiro Florestal, pós-graduando do Curso de Sensoriamento Remoto/
fablogg@ltd.inpe.br

² Pesquisador Titular, Dr. em Ciências Florestais/ jroberto@ltd.inpe.br

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/MCT; Av. dos Astronautas,
1758 CEP: 12.227-010 São José dos Campos - SP.

condições antropogênicas que hoje atuam nos variados ecossistemas do nosso território nacional. Nesse contexto, discorre-se nesse artigo científico, primeiramente, os conceitos básicos que regem o SR&SIG, os atuais sistemas geradores desses produtos orbitais e num outro plano, as variadas aplicações nos estudos e diagnósticos das condições da tipologia florestal.

II. Conceituação básica no contexto do binômio tecnológico de "Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas": aplicações no campo florestal.

A primeira etapa desse artigo tem como objetivo apresentar, de maneira sucinta, os conceitos necessários para o entendimento da utilidade dos dados de sensoriamento remoto na investigação das condições da tipologia florestal. Para tanto, é feita uma breve apresentação dos elementos básicos nos quais a técnica se fundamenta, apresentando os processos de interação da radiação eletromagnética (REM) com a vegetação, os quais definem o comportamento espectral dos dosséis vegetais em imagens obtidas por sensores remotos; e por fim, é feita uma análise descritiva das características de alguns sensores (em nível orbital) e de seus produtos hoje disponível aos usuários, além de comentários sobre alguns métodos empregados na extração e integração de informações necessárias ao entendimento de como responde a cobertura vegetal em produtos sensoriados.

II.1. Elementos básicos de sensoriamento remoto.

Entre as várias definições existentes na literatura para o sensoriamento remoto de recursos naturais, é possível identificar um conceito comum: obtenção de informações sobre a superfície terrestre à distância. Esse conceito implica que pelo menos cinco

elementos devem ser considerados na aquisição e interpretação de dados de sensoriamento remoto, quer sejam: fonte de energia, radiação eletromagnética (REM), atmosfera, alvos e sensores. Para ilustrar como esses elementos interagem ao se adquirir uma imagem de sensoriamento remoto, será considerado a seguir um exemplo adaptado de Campbell (2002).

A energia solar que atinge a Terra é composta por vários tipos de radiação, que variam em frequência e comprimento de onda (por exemplo, o visível e o infravermelho). O fluxo solar deve atravessar a atmosfera terrestre para atingir o dossel de uma floresta hipotética, sendo que parte dessa energia é absorvida e espalhada antes de atingir as copas das árvores. A atenuação da REM pela atmosfera é seletiva, ou seja, os gases e partículas presentes na atmosfera absorvem e espalham a radiação de forma diferenciada em função do comprimento de onda. Do total de energia remanescente, parte atingirá as folhas do dossel, podendo ser transmitida, absorvida ou refletida. A radiação na região do infravermelho próximo (0,7-1,3 μm) será refletida; na região do visível, a radiação na faixa do verde (0,5-0,6 μm) também será refletida (em menor proporção), enquanto que a radiação nas faixas do azul (0,4-0,5 μm) e do vermelho (0,6-0,7 μm) será absorvida para uso na fotossíntese. A energia refletida em direção ao sensor deverá passar pela atmosfera, estando novamente sujeita à atenuação. Cabe ainda ressaltar que as informações serão registradas de forma diferenciada de acordo com as características inerentes de cada sensor (resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal). Por esse exemplo, fica fácil compreender que a energia resultante no final do processo é diferente daquela que percorreu a atmosfera. Portanto, a resultante final dessa combinação energia/alvo na conjuntura de uso do sensoriamento remoto é função de diferentes interações dos elementos básicos que compõem o sistema.

II.2. Comportamento espectral da vegetação.

A resposta espectral de uma floresta é determinada pela estruturação do povoamento, sendo influenciada por diversas características que modelam essa estrutura, tais como: biomassa, idade, densidade, altura média das árvores e área basal (Ingram et al., 2005). Uma quantidade considerável de pesquisas tem investigado a utilização de imagens de sensoriamento remoto na avaliação e monitoramento de florestas, de forma que um passo fundamental na consolidação dessa ferramenta é a determinação da relação entre a informação espectral contida na imagem e as propriedades estruturais da floresta que são indicadoras da sua condição.

De todos os elementos que constituem a vegetação, a folha é o principal quando se considera a interação com a REM. Segundo Jensen (2000), na região do visível os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. As clorofilas *a* e *b* absorvem a energia de forma muito eficiente nas regiões do azul e vermelho, onde a luz incidente é requerida para o processo fotossintético. Existem outros pigmentos como carotenos e xantofilas absorvendo radiação na região do visível, porém, geralmente esses pigmentos são mascarados pela abundância de clorofila. A relativa falta de absorção na região do verde é responsável pela aparência verde das folhas ao olho humano.

Na região do infravermelho próximo a absorção da energia incidente pela folha reduz consideravelmente. A redução da absorção se dá em uma região onde a luz incidente nas plantas tem o pico de sua energia. Caso as plantas absorvessem, nessa citada região do infravermelho próximo, com a mesma eficiência como fazem na região do visível, seria provocado um aquecimento excessivo e conseqüentemente, resultaria em uma desnaturação das proteínas. Nessa porção do espectro eletromagnético a reflectância espectral da folha é resultante da interação da REM com a estrutura do mesófilo. Em geral, a reflectância nesse comprimento de onda é maior em

estruturas internas mais lacunosas (Meneses e Madeira Netto, 2001).

No infravermelho médio (1,3-3,0 μm) é o conteúdo de água que domina a reflectância espectral. Pelo fato da água ser um bom absorvedor nessa região do espectro, à medida que se aumenta o conteúdo hídrico na folha, menor se torna a reflectância. Essa propriedade é especialmente importante, conforme relata Jensen (2000), pelo potencial que tem o sensoriamento remoto em avaliações do conteúdo de umidade nos dosséis vegetais.

As discussões apresentadas até o momento se referem às propriedades espectrais de folhas isoladas. No entanto, ao considerarmos as propriedades espectrais de dosséis, que de fato serão analisadas em imagens de sensoriamento remoto, muito da discussão apresentada pode ser aproveitada. Para isso, é necessário considerar não apenas as propriedades de espalhamento e de absorção dos elementos da vegetação, mas também suas densidades e orientações (Goel, 1988).

II.3. Fontes de dados de sensoriamento remoto.

Convencionalmente, dados de inventários florestais vêm sendo coletados por meio de trabalhos de campo e, em menor escala, com auxílio de fotografias aéreas. As coletas em campo são, em geral, de elevado custo e de execução demorada. Por outro lado, embora fotografias aéreas sejam utilizadas no planejamento florestal, a baixa funcionalidade para inventários florestais se dá pelo alto nível de informações espectrais requerido. Os produtos de sensoriamento remoto orbital têm sido importantes na aquisição primária de informações, com extensões de uso no inventário e, sobretudo, como ferramenta de gerenciamento da paisagem florestal, permitindo aplicações bem sucedidas no estudo de grandes áreas, com níveis de precisão razoáveis (Hyypä et al., 2000).

A escolha dos produtos orbitais para subsidiar estudos florestais varia com a aplicação pretendida. Segundo Assad e Sano (1998), utilizando-se sensores com resolução espacial relativamente baixa, como o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (1,1 km de resolução espacial) do satélite *National Oceanographic and Atmosphere Agency- AVHRR/NOAA*, consegue-se discriminar áreas cobertas com florestas, áreas desflorestadas e queimadas. Imagens multitemporais desse sensor (até duas por dia da mesma área) vêm sendo empregadas no monitoramento da fenologia da vegetação. A utilização de sensores de média resolução, como o *Thematic Mapper* (30 m) do satélite Landsat (TM/Landsat), a Câmara Imageadora de Alta Resolução (20 m) do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CCD/CBERS-2) e o *High Resolution Visible* (10 m) do Satélite Francês para Observação da Terra (HRV/SPOT), têm fornecido bons resultados na caracterização da paisagem e na análise da dinâmica de ocupação da terra. Por outro lado, sensores recentes com alta resolução espacial, como o IKONOS II (1 m) e o QUICKBIRD (0,61 m), têm ampliado o leque das aplicações florestais, permitindo a identificação de espécies, além de estudos da distribuição espacial de indivíduos em um dossel florestal.

Progressos recentes na tecnologia de imagens de radar (sobretudo SAR – *Synthetic Aperture Radar*), conjugadas com técnicas de extração e de processamento de sinais, têm indicado o potencial desses dados para aplicação no campo florestal. Programas envolvendo sensores ativos, como o RADARSAT (canadense), o JERS (japonês), o ERS e mais recentemente o ENVISAT (ambos europeus), vêm sendo cada vez mais utilizados como ferramentas de suporte na caracterização, inventário e monitorização florestal, cujos desempenhos de resultantes temática e cartográfica têm variado conforme as características intrínsecas do sistema-sensor, quer seja da frequência, polarização, resolução espacial, ângulo de visada, dentre outros fatores, inclusive variantes do alvo investigado. O maior interesse na utilização de dados radar se deve, principalmente, pelos sensores permitirem a aquisição de imagens mesmo sob condições

atmosféricas adversas, como na presença de nuvens.

II.4. Métodos de extração e manipulação de dados sensoriados.

Vários são os métodos para formular e analisar a informação espectral na avaliação da cobertura vegetal, cujos procedimentos são dependentes dos objetivos do trabalho e inclusive do tipo de produto-sensor utilizado. Em dados ópticos, estudos da resposta espectral da vegetação vêm sendo, frequentemente iniciados através de “índices de vegetação”, através da definição de qual modelo é mais expressivo utilizar, face ao tipo de cobertura vegetal em estudo. A combinação de bandas espectrais, formulada por modelagem de função linear ou não, é então expressa num valor composto que é registrado como esse denominado “índice de vegetação”. Segundo Moreira (2003), esses índices foram desenvolvidos com o intuito de se concentrar as informações espectrais da vegetação em uma única imagem, ressaltando o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre. A razão direta da banda espectral do vermelho(V) e do infravermelho próximo (IVP) gera, por exemplo, o “índice de razão simples”. Por sua vez, a razão entre a diferença do infravermelho e vermelho pela soma dessas duas bandas espectrais permite gerar o “índice de vegetação da diferença normalizada” (NDVI), muito comumente utilizada em estudos para caracterizar e relacionar parâmetros biofísicos da vegetação (índice de área foliar, biomassa, produtividade e atividade fotossintética) com os dados sensoriados. Entretanto, alguns fatores limitam as aplicações do NDVI em estudos de florestas tropicais, como por exemplo, o problema de saturação para um determinado limiar, acima do qual torna-se insensível à representação da resposta com o aumento da quantidade de vegetação. O manuseio na modelagem de bandas espectrais têm gerado diversos índices de vegetação, de larga aplicabilidade, como SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), dentre outros,

esse último, com melhor sensibilidade em regiões de maior densidade de biomassa (Huete et al., 1994); inclusive, muitos podem mostrar certas equivalências entre si, caso essas transformações algébricas sejam analisadas através de técnicas matemáticas.

No cuidadoso trabalho com índices de vegetação para uma escolha apropriada em função da tipologia vegetal a ser estudada, deve-se atentar também para alguns fatores que influenciam no uso, como a influência do solo, a geometria de aquisição de dados, o posicionamento e largura das bandas espectrais. Mesmo apresentando algumas desvantagens, como citadas acima, incluindo ainda a limitada quantidade de informação espectral perante a totalidade disponível em uma imagem, tais índices minimizam efeitos residuais de nuvens e aerossóis atmosféricos, além de facilitar a padronização de algumas variáveis do sensor utilizado, referentes ao ângulo de elevação solar e de visada. É importante salientar que a formulação de índices com dados de radar também ocorre, numa conjugação de frequências e polarizações, comentadas no item III.4 mais adiante.

Métodos que permitem extrair e integrar informações numa escala mais ampla de dados espectrais podem fornecer conhecimentos mais detalhados para caracterizar, mapear e monitorar a tipologia vegetal, muitas vezes em uma melhor condição daquela obtida com o uso de apenas um único índice de vegetação (Ingram et al., 2005). Técnicas diversas como aquelas que empregam Análise por Principais Componentes, Modelo Linear de Mistura Espectral, Análise por Vetor de Mudanças, Rotação Radiométrica Controlada no tratamento de imagens, com fases posteriores de classificação pixel a pixel ou por regiões, ou mesmo a utilização de algoritmos classificatórios especializados baseados em redes neurais artificiais, têm facilitado os estudos ligados à área de engenharia florestal.

Não se pode esquecer no desenrolar da atual temática constante, a importância dos sistemas de informações geográficas

(SIGs) como ferramenta de manipulação de dados sensorizados, numa integração devidamente georeferenciada com dados/informações provenientes de fontes diversas, aludindo-se assim, a conceituação de geoprocessamento. Segundo Assad e Sano (1998), o geoprocessamento pode ser entendido como disciplina do conhecimento que faz uso de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas, que possibilitam a realização de análises complexas ao integrar dados de distintas escalas e temáticas e mesmo, criar bancos de dados georeferenciados. Como referência adicional para esse tópico, recomenda-se a leitura de Câmara et al. (2001).

No contexto florestal, quando dados sensorizados são combinados com dados geoespaciais (exemplo, dados de modelo digital do terreno, hídricos, edáficos, climáticos, etc), através de SIGs, o usuário pode rapidamente avaliar a característica sinóptica do problema e, para num cruzamento de informações variadas, tomar decisões mais apropriadas. Como exemplo de aplicações, pode-se citar: a delimitação de áreas de preservação permanente (APPs) e suas condições, a identificação de zonas aptas à prática da silvicultura, o planejamento da colheita florestal, dentre outras. Como fonte de consulta cita-se o trabalho de Espírito-Santo et al. (2004) que integraram dados multi-fontes e através de análise espacial analisaram áreas florestais sob regime de exploração madeireira.

III. Uso do sensoriamento remoto (nível orbital e aerotransportado) como ferramenta de caracterização, inventário e monitoramento florestal: as experiências de pesquisas e aplicações brasileiras.

Nas diretrizes de desenvolvimento científico do nosso país, o Governo brasileiro tem procurado investir na capacitação de recursos humanos e no provimento de meios a uma constante busca de avanços na área de tecnologia espacial, facilitando entre muitos cenários de prioridades, um efetivo acompanhamento dos recursos

naturais renováveis. Isso, em função de contínuo e acelerado processo de degradação dos recursos naturais do território nacional, que tanto tem afetado a qualidade de vida da população brasileira. Face a diversa complexidade da paisagem, em domínios da floresta tropical, dos cerrados, das caatingas, do complexo Pantanal e dos campos e Matas de Araucária, o emprego de geotecnologias tem se mostrado uma ferramenta importante para detectar e monitorar alguns dos típicos processos de degradação desses ambientes, razão de freqüentes desmatamentos, queimas e considerável exploração madeireira.

Nas diretrizes de desenvolvimento científico do nosso país, o Governo brasileiro tem procurado investir na capacitação de recursos humanos e no provimento de meios a uma constante busca de avanços na área de tecnologia espacial, facilitando entre muitos cenários de prioridades, um efetivo acompanhamento dos recursos naturais renováveis. Isso, em função de contínuo e acelerado processo de degradação dos recursos naturais do território nacional, que tanto tem afetado a qualidade de vida da população brasileira. Face a diversa complexidade da paisagem, em domínios da floresta tropical, dos cerrados, das caatingas, do complexo Pantanal e dos campos e Matas de Araucária, o emprego de geotecnologias tem se mostrado uma ferramenta importante para detectar e monitorar alguns dos típicos processos de degradação desses ambientes, razão de freqüentes desmatamentos, queimas e considerável exploração madeireira.

Nesse contexto, pode-se afirmar que a tecnologia espacial, associada a técnicas de extração de informações, tem permitido significativo conhecimento das situações que envolvem os recursos florestais desses vastos domínios, levando em conta o nível da escala de trabalho, a temporalidade e a complexidade da informação (Figura 1). Estratégias técnico-científicas governamentais, sobretudo em níveis federal e estadual, têm mantido agenda de compromissos permanentes e com programas operacionais, incrementado a utilização de dados de sensoriamento remoto (sobretudo em nível

orbital) e de sistemas de informações geográficas, para agilizar os processos de tomada de decisão no que se refere à fiscalização, controle e gerenciamento racional dos vários ecossistemas.

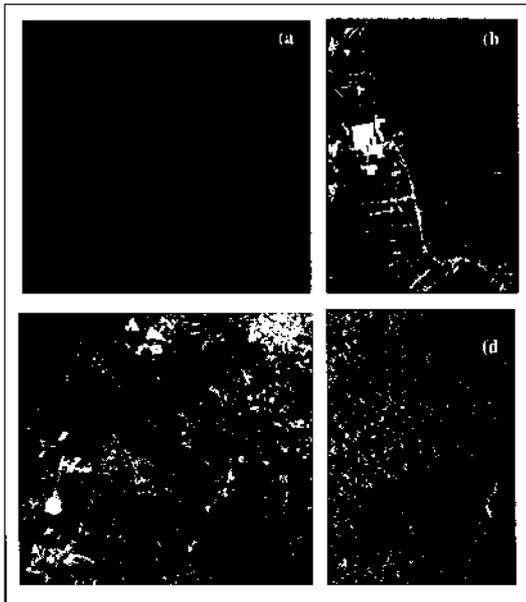


Figura 1. Imagens derivadas de sensores ópticos e de radar, ilustrando diversas formas de ocupação de terras florestais. (a) imagem TM/Landsat com fragmentos florestais remanescentes (Jiparaná/Rondônia); (b) lago da U.H.E. de Samuel (Rondônia); (c) áreas com faciações da vegetação de cerrados (Piauí) em imagem do CCD/CBERS-2; (d) imagem de radar aerotransportado de banda X, com caracterização de áreas de floresta primária e sucessão secundária após abandono (Tapajós/Pará).

Assim, pela experiência acumulada ao longo dos anos, pretende-se no presente artigo científico, abordar de forma bem sintetizada, algumas pesquisas e aplicações julgadas relevantes no uso de produtos e de técnicas de extração e análise de dados espaciais

para a caracterização, inventário e monitoramento florestal. Assim, exemplificam-se a seguir, alguns casos aplicativos no tocante aos estudos da cobertura vegetal e a dinâmica de conversão temática, razão da ação humana.

III.1. Caracterização do desflorestamento.

Tomando-se como base de trabalho a Amazônia brasileira, onde certos fatores sociais e econômicos impulsionam a atividade de derrubada em áreas contínuas da floresta tropical (geralmente fruto da ação de médios e grandes proprietários de terra, sobretudo para implantação de projetos de pecuária e agricultura) torna-se premente uma contínua operação de caracterização temática e monitoramento (indicações da magnitude, direção e causas da atividade antropogênica) com dados sensoriados. O desenvolvimento metodológico para a cartografia e estimativa das taxas anuais do desflorestamento, atividade inserida na cooperação técnica de equipes do MCT/INPE e o MMA/IBAMA, é um significativo exemplo operacional, cujos detalhamentos e resultados podem ser observado em < <http://www.obt.inpe.br/deter> >. Imagens digitais do TM/Landsat, em bandas espectrais do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio, tratadas por técnicas que empregam um modelo linear de mistura espectral, segmentação por regiões e classificação, fazem parte do procedimento metodológico adotado.

Como essa área de geotecnologias está em contínuo avanço, novos produtos e técnicas de manipulação e integração de dados estão sendo sempre testados para melhorar o nível de extração de informações, de acurácia na cartografia e sobretudo, de rapidez de análise e conseqüente uso da informação gerada para a tomada de decisões. Como fonte de consulta bibliográfica acerca dessa diversidade de técnicas e produtos em atualização, pode-se citar alguns trabalhos como de: Lorena et al (2002) que aplica na análise das transformações da paisagem florestal a técnica de Análise de Vetor de Mudanças, Mendoza Rojas et al. (2004) que utiliza dados

do sensor ASTER/TERRA tratados por redes neurais para caracterização de mudanças temáticas de uso e cobertura da terra; e de Santos et al. (2005a), que integram dados de distintos sensores, (ASTER/TERRA, CCD/CBERS-2, TM/LANDSAT) através da abordagem de rotação radiométrica controlada por eixos de não mudança (RCEN) para mapear temporalmente níveis de degradação e recuperação em áreas de floresta tropical sob influência da pressão agrícola e de exploração madeireira, estendendo tal experiência em área do semi-árido brasileiro (Santos et al., 2005b). Não se pode também esquecer o recente uso de dados de alta resolução, como aqueles provenientes de imagens IKONOS e QUICKBIRD, onde o suporte computacional de técnicas orientadas a objetos tem demonstrado importante contribuição na categorização e delineamento da tipologia florestal, como observado em trabalhos práticos de Antunes (2005) e de Kux e Pinheiro (2005), cujo desenvolvimento metodológico foi executado em áreas de mata ciliar (Estado do Paraná) e mata Atlântica no Rio Grande do Sul, respectivamente.

Face ao elevado grau de desflorestamento, há uma preocupação no acompanhamento das áreas de conservação (reservas ecológicas, parques nacionais,...), com estudos inclusive das condições de corredores ecológicos. Imagens quinzenais NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) derivadas de dados MODIS/TERRA, com resolução de 250 metros, tratadas por uma nova abordagem através da técnica de análise harmônica (Pardi Lacruz et al., 2005), vêm sendo empregadas no monitoramento da representação das mudanças da paisagem por atividades antrópicas (ou até mesmo, resultante de simples efeito sazonal da cobertura vegetal).

III.2. Mapeamento da exploração madeireira.

É possível mapear facilmente, com sensores de resolução

espacial mais fina e sobretudo na faixa óptica, a conversão de florestas em áreas agrícolas ou de pecuária. Métodos específicos de interpretabilidade das imagens de satélite, suportadas por informações de campo, têm também permitido a partir da identificação de pátios de estocagem de madeira (criados no processo de exploração da floresta, junto com os “ramais” para retirada e transporte das toras) indicar com alguma segurança onde está havendo esse tipo de processo de degradação. Esse novo tipo de aplicabilidade, feita a partir da geração de conhecimentos derivados das imagens orbitais, em resolução espacial e espectral compatíveis, como aquelas do TM/Landsat, HRV/SPOT, ASTER/Terra e CCD/CBERS-2 dentre outros, de anos subseqüentes, tem ocupado espaço nas pesquisas metodológicas, cujo aprimoramento pretende objetivar o avanço da exploração florestal seletiva, como avaliar as condições das áreas abandonadas pós-exploração. Como fonte de consulta pode-se observar os artigos de Sousa e Barreto (2000), Silva et al. (2003) e Graça (2005), explorando as distintas formas dessa geotecnologia na temática em questão.

III.3. Caracterização e monitoramento de focos de calor (processo de queima).

Outro significativo ponto do uso de geotecnologias está no monitoramento do processo de queima dos bosques tropicais, que gera efeitos diretos na paisagem, sob ponto de vista do ciclo hidrológico, das condições edáficas com pensamento de produtividade da terra, e da biodiversidade com a redução da valoração e disponibilidade genética. Alterações no ciclo hidrológico vão paulatinamente acontecendo à medida que a escala de desflorestamento aumenta, ocasionando modificações nos níveis de chuva e variações nos graus de estiagem, afetando as condições biológicas locais, sobretudo com o aumento da susceptibilidade das florestas ao fogo, assoreamento de rios, lagos e represas e ainda

conseqüências diretas na qualidade de vida e meios de produção das populações locais. Aliado a isso, há um aumento do potencial de inflamabilidade do material residual de florestas exploradas, o que pode gerar um efeito de elevação do grau de severidade da queimada.

Essa tecnologia espacial vem sendo desenvolvida e aplicada no país tem, neste programa de monitorar diariamente os focos de calor uma outra de suas aplicações mais significativas: fazer o controle e fiscalização do processo de queimadas, quer seja em nível local ou regional. A utilização de dados de satélites NOAA/AVHRR-12 e 14, TERRA/MODIS, GOES-12, de resoluções espaciais mais grosseiras, tem permitido a identificação dos focos de calor, cujas informações colocadas numa base de dados georeferenciada (Pereira et al., 2004), facilita a análise das estimativas de qual local, quanto e que tipo de cobertura está sofrendo ação do fogo, permitindo ainda, fazer um planejamento de operações prévias de alerta e combate aos incêndios florestais. Boletins diários dos focos de calor identificados em nível nacional, mapas e diversos produtos estão disponíveis nos sites [<http://www.cptec.inpe.br/queimadas>](http://www.cptec.inpe.br/queimadas) e [<http://www.2.ibama.gov.br/proarco>](http://www.2.ibama.gov.br/proarco).

III.4. Inventário e cartografia do conteúdo de biomassa florestal.

A comunidade científica preocupada com o uso sustentável dos recursos florestais tem procurado utilizar os dados sensoriados não apenas como uma ferramenta de controle e fiscalização, como também ao suporte de inventários florestais, cujos dados têm contribuído para estudos de emissões globais de carbono, face às transformações em larga escala no uso e cobertura da terra. Os sensores que operam na faixa óptica têm demonstrado uma ampla

utilidade no acompanhamento das transformações florestais derivadas da ação humana. Contudo, em várias regiões do mundo, sobretudo em zonas tropicais, há um esforço de utilizar imagens de radar, como fonte complementar de informações, face a periodicidade de cobertura de nuvens que cobrem essas regiões e que limita sobremaneira a aquisição de dados pelos sistemas ópticos. Nesse contexto, imagens-radar de bandas X, C, L e P vêm paulatinamente sendo testadas e empregadas para caracterizar, inventariar e monitorar a dinâmica das áreas florestais.

Os radares que operam em banda X ($\lambda = 3$ cm) e C ($\lambda = 5,6$ cm) têm, por características peculiares das frequências em que atuam, a capacidade de fornecer informações do dossel do povoamento florestal, por penetração do sinal, respectivamente. Assim, qualquer modificação ocorrida na floresta, como por exemplo, corte e queima, abertura de clareiras e mesmo a caracterização de áreas em processo de regeneração, pode ser discriminada por modificações no espalhamento volumétrico, desde que consideradas a resolução espacial do imageamento. Em função do comprimento de onda, a radiação eletromagnética na faixa de microondas tem menor ou maior capacidade de penetração em determinados tipos de alvos, sob certas condições. No caso dos radares em banda L ($\lambda = 23$ cm) e P ($\lambda = 72$ cm), este último operacionalmente ainda em nível aerotransportado, de maiores comprimentos de onda, é possível obter informações da estrutura vertical da floresta até o solo, pela maior interação da radiação com troncos e galhos das árvores, sendo portanto mais sensíveis às variações de biomassa florestal. Características geométricas (como morfologia, rugosidade, declive) e físicas (constante dielétrica, condutividade, absorção) são alguns dos fatores que influenciam o retroespalhamento (σ^0) do sinal-radar com a superfície florestada, ocasionando respostas diversas. Ângulo de incidência do sinal, altura média e densidade das árvores, são também alguns fatores que atuam nos mecanismos de espalhamento. Para florestas com densidade de árvores moderada, o radar de banda L tende, por exemplo, a

apresentar um elevado valor de σ causado pela interação do tipo solo/tronco e solo/dossel, sendo mais acentuado quando o solo está alagado.

Trabalhando com dados JERS-1 (banda L) no relacionamento entre valores de biomassa e retroespalhamento para tipos de savanas e de floresta na Amazônia, Santos et al. (2002) empregaram uma função sigmoïdal, para melhor ajuste dos dados, observando haver um ponto de saturação do sinal de banda L perante o acréscimo de biomassa, com sensibilidade do modelo até os níveis de 60 tons/ha. Isso limita uma adequada estratificação da cobertura vegetal para altos valores de biomassa florestal. A partir do mapeamento de dados polarimétricos em banda P através de técnicas de classificação contextual, Santos et al. (2003) relacionam níveis de retroespalhamento encontrados nos segmentos delineados nesse produto-radar com valores de biomassa obtidos em amostras inventariadas em trabalho de campo, gerando um mapa com a discriminação de áreas de floresta primária e de áreas em estágios sucessionais e respectivas biomassas.

Outro exemplo de aplicabilidade vem sendo conduzido com radar aerotransportado no modo interferométrico, com a conjunção de dados em bandas X e P, conforme empregado por Mura et al. (2001). O Modelo Digital de Superfície (DSM), gerado exclusivamente a partir da banda X, reflete as condições de altitude do dossel (topo da cobertura vegetal), enquanto o Modelo Digital de Elevação (DEM) derivado da banda P está associado com o "piso" da floresta, pela capacidade desse comprimento de onda (λ) em penetrar toda a estrutura. A diferença entre o DSM e o DEM potencialmente fornece a altura da floresta. Esse tipo de mapeamento é muito importante para dar subsídios na estratificação temática e também, na geração de modelos de estimativas de biomassa, sem problemas usuais de saturação do sinal-radar para altos valores, conforme demonstram Santos et al. (2004). Dessa forma, pode-se modelar com mais segurança, as inferências de estoque de carbono para

determinadas regiões. Outras formulações empíricas derivadas de informações de radar também são encontradas na literatura para o entendimento da resposta do sensor na caracterização e inventário florestal. Pope et al. (1994) mencionam três índices biofísicos para imagens de radar que relativamente estão relacionados às características da vegetação: *volume scattering index* (VSI), *canopy structure index* (CSI) e *biomass index* (BMI). Tais índices são baseados em razões ou diferenças normalizadas, sendo mais específicos para o estudo de condições da cobertura vegetal, por serem independentes dos efeitos do imageamento em "range" e da inclinação do terreno. Particularmente, o VSI por ser um indicador da espessura ou densidade do dossel pode prover, em certos ecossistemas florestais, uma melhor estimativa de biomassa lenhosa. Uma experiência brasileira da aplicabilidade desses índices acima citados pode ser consultada em Gama et al. (2005), direcionados ao relacionamento desses valores derivados de radar polarimétrico com a estrutura florestal.

IV. Conclusões

Com todo esse ferramental tecnológico, quer seja de produtos orbitais como de técnicas de extração de informações, apoiadas também por sistemas de informações geográficas, pode-se dispor de informações mais seguras para adoção de planos e estratégias que minimizem a degradação dos recursos florestais, orientando inclusive planos racionais de uso e ocupação da terra. O exposto nesse artigo é apenas um panorama parcial da aplicabilidade dos dados sensoriados nesse contexto de caracterização, inventário e monitoramento da paisagem, mas fornece uma reflexão da potencialidade a ser explorada por qualquer usuário que pretenda se aventurar nessa significativa linha de aplicações referente à engenharia florestal. Apesar do significativo número de aplicações de imagens orbitais no estudo de recursos florestais nos últimos anos, percebe-se que o total

aproveitamento desse potencial ainda requer maior conhecimento das relações entre informação espectral e características biofísicas da cobertura vegetal, numa interação inclusive, com o conjunto de outras variáveis ambientais, lembrando que haverá disponibilidade no mercado de produtos derivados de novos satélites em futuro breve, assim como, novas abordagens metodológicas no que se refere à extração e análise de dados.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pela concessão de bolsa de estudo e CNPq (processo 300677/91-0) pela bolsa individual de produtividade à pesquisa.

Referências Bibliográficas

Antunes, A.F.B. Segmentação orientada a objeto aplicado ao monitoramento de ocupações irregulares em áreas de proteção ambiental. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. Goiânia, 16-21 abr., 2005. INPE. **Anais**. [CDROM].

Assad, E.D.; Sano, E.E. **Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura**. 2.ed. Brasília: EMBRAPA, 1998. 434p.

Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.; D'Alge, J.C. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2001 (2a. edição, revista e ampliada).

Campbell, J.B. **Introduction to remote sensing**. 3.ed. New York: The Guilford Press, 2002. 621p.

Espírito-Santo, F.D.B.; Santos, J.R.; Silva, P.G. Técnicas de

processamento de imagens e de análise espacial para estudo de áreas florestais sob exploração madeireira. **Revista Árvore**, v.28, n.5, p. 699-706. 2004.

Gama, F.F.; Santos, J.R.; Freitas, C.C.; Mura, J.C. Aplicação de dados polarimétricos de radar aerotransportado (banda P) para estimativa de parâmetros estruturais de florestas tropicais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. Goiânia, 16-21 abr., 2005. INPE. **Anais**. [CDROM].

Goel, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, p. 1-21, 1988.

Graça, P.M.L.A.; Santos, J.R.; Soares, J.V.; Souza, P.E.U. Desenvolvimento metodológico para detecção e mapeamento de áreas florestais sob exploração madeireira: estudo de caso, região norte do Mato Grosso. In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. Goiânia, 16-21 abr., 2005. **Anais**. [CDROM].

Hyypä, J.; Hyypä, H.; Inkinen, M.; Engdahl, M.; Linko, S.; Zhu, Y.H. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. **Forest Ecology and Management**, v. 128, n. 1-2, p. 109-120, 2000.

Huete, A.; Justice, C.; Lui, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 224-234, 1994.

Ingram, J.C.; Dawson, T.P.; Whittaker, R.J. Mapping tropical forest structure in southeastern Madagascar using remote sensing and artificial neural networks. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 491-507, 2005.

Jensen, J.R. **Remote sensing of the environment**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2000. 545p.

Kux, H. J. H.; Pinheiro, E. S. Dados do satélite QUICKBIRD para o mapeamento do uso e cobertura da terra numa seção da Mata Atlântica no Estado do Rio Grande do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. Goiânia, 16-21 abr., 2005. INPE. **Anais**. [CDROM].

Lorena, R.B.; Santos, J.R.; Shimabukuro, Y.E.; Brown, I.F.; Kux, H.J.H. A change vector analysis technique to monitor of landuse/landcover in SW Brazilian Amazon, Acre State. In: PECORA 15 – Integrating Remote Sensing at Global, Regional and Local Scale. Denver, Colorado, 2002. ASPRS. [CDROM].

Mendoza Rojas, E.H.; Santos, J.R.; Santa Rosa, A.N.; Silva, N.C. Land use/ land cover mapping in Brazilian Amazon using neural network with ASTER/TERRA data. In: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress, 20. Istanbul, Turkey. 12-23 Jul., 2004. **Proceedings**. [CDROM].

Meneses, P.R.; Madeira Netto, J.S. **Sensoriamento remoto: refletância dos alvos naturais**. Brasília: UNB; Planaltina(DF), Embrapa Cerrados, 2001. 262p.

Moreira, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2.ed. Viçosa: UFV, 2003. 307p.

Mura, J.C.; Bins, L.S.; Gama, F.F.; Freitas, C.C.; Santos, J.R.; Dutra, L.V. (2001). Identification of the tropical forest in Brazilian Amazon based on the DEM difference from P and X bands interferometric data. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS'01. Sydney, Austrália. 9-13 Jul., 2001. **Proceedings**. [CDROM].

Pardi Lacruz, M.; Santos, J.R.; Conforte, J.C. Utilização de séries temporais de imagens MODIS/TERRA e análise harmônica para o monitoramento de corredores ecológicos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. Goiânia, 16-21 abr., 2005. **Anais**.

[CDROM].

Pereira, J.A.R.; Setzer, A.; Maurano, L.E. Visão atual do sistema de monitoramento de fogo na América do Sul. In: **Aplicações de Geotecnologias na Engenharia Florestal**. Ed., Disperatti, A.A.; Santos, J.R., Curitiba (PR), Copiadora Gabardo LTDA., 2004. p. 245-254.

Pope, K.O.; Rey-Bcbayas, J.M.; Paris, J.F. (1994). Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics. **Remote Sensing of Environment**, v. 2, n. 48, p. 205-219.

Santos, J.R.; Freitas, C.C.; Araujo, L.S.; Dutra, L.V.; Mura, J.C.; Gama, F.F.; Soler, L.S.; Sant'Anna, S.J.S. Airborne P-band SAR applied to the above ground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 482-493, 2003.

Santos, J.R.; Maldonado, F.D.; Graça, P.M.L.A. Integração de imagens Landsat/ETM+ e CBERS-2/CCD para detecção de mudanças em áreas da Amazônia sob domínio da floresta de transição. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n.1, p. 15-21, 2005 (a).

Santos, J.R.; Maldonado, F.D.; Quintano Pastor, C.; Fernandez Manso, A. Radiometric rotation technique to monitor degradation and regeneration features in Brazilian semi-arid region. In: **International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 25th – IGARSS'05**. Seoul, Korea, 25-29 Jul., 2005 (b). **Proceedings**. [CDROM].

Santos, J.R.; Neeff, T.; Araujo, L.S.; Gama, F.F.; Dutra, L.V.; Sousa Júnior, M.A. Interferometria SAR (bandas X e P) na estimativa de biomassa florestal. In: **Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 1**. Recife (PE). 1-3 set., 2004. **Anais**. [CDROM].

Santos, J.R.; Pardi Lacruz, M.S.; Araujo, L.S.; Keil, M. (2002). Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n.7, p. 1217-1229.

Silva, P.G.; Santos, J.R.; Shimabukuro, Y.E.; Souza, P.E.U. Change vector analysis technique to monitor selective logging activities in Amazon tropical rainforest. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS' 03. Toulouse, France. 21-25 Jul., 2003. **Proceedings**. [CDROM].

Souza, C.; Barreto, P. An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, p. 173-179, 2000.