

ESTUDO DA DINÂMICA FLORESTAL ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Simey Thury Vieira Fisch

Departamento de Biologia - Unitau

Flávio Jorge Ponzoni

Divisão de Sensoriamento Remoto/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Av. dos Astronautas, 1758 12227-010 São José dos Campos - SP

flavio@LTID.INPE.BR

RESUMO

Os processos dinâmicos das florestas tropicais úmidas podem ser estudados em diferentes escalas. As alterações naturais de pequena escala são, p.ex., abertura de clareiras, processos sucessionais, fenologia. As alterações naturais observadas em grande escala podem ser causadas principalmente por inundações, vento e fogo. As alterações antrópicas são, entre outras, queimadas, uso agropecuário, exploração madeireira. Foram ilustrados exemplos de como o Sensoriamento Remoto pode contribuir para estudos de dinâmica florestal, procurando focar: a) sua aplicabilidade nas diversas formas em que se processa a dinâmica; b) algumas formas de emprego dessa técnica nos estudos de dinâmica e c) algumas limitações do seu uso neste tipo de estudo. Através da literatura consultada, verificou-se que o sensoriamento remoto permite uma visão sinóptica da área em estudo; os domínios temporal e espectral fornecem informações que dificilmente seriam obtidas em nível de campo. Quanto às formas de emprego, observou-se que, tanto através de imagens analógicas como digitais, é possível obter informações que facilitem análises dos fenômenos dinâmicos; as interpretações são ampliadas por comparações de produtos em diferentes bandas espectrais, por meio de índices de vegetação etc. Quanto às limitações, constatou-se: que as alterações que ocorrem em pequena escala não podem ser monitoradas por sensoriamento remoto orbital, ficando restritas ao uso de fotografias aéreas; e que este recurso só permite uma avaliação estrutural da vegetação, podendo ser utilizado como informação complementar em análises mais aprofundadas.

PALAVRAS-CHAVE: Dinâmica florestal; sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The dynamic process of the tropical rainforests can be studied in different scales. The natural disturbances in a small scale are gaps, successional process and phenology. The natural disturbances observed in large scale can be caused mainly by flooding, wind and fire. The anthropic disturbances are, amongst others, burning, pastures and agriculture management, logged exploitation. In this study we provide examples on how remote sensing can aid forest dynamic studies, trying to obtain answers about: a) its applicability in the different ways of the dynamics process; b) some kinds of the use of this technique and c) some limitations of the use in studies of the forest dynamics. Through the literature, we have verified that remote sensing can provide one synoptic view of the site studied; the temporal and spectral scale also provide information very hard to be acquire in the field. With respect to the kinds of usage, both analogical and digital images, make possible acquiring information that help analyse dynamics phenomena; the interpretation are enlarged by comparisons of the different spectrals bands, by vegetation indices etc. With respect to the restrictions, we have verified that disturbances in small scale can not be monitored by orbital remote sensing, only using aerial photos. The remote sensing only provides a structural evaluation of the vegetation and it is desirable that it be used as complementary information of more accurate analysis.

KEY WORDS: Forest dynamics; remote sensing

1. INTRODUÇÃO

A escala de abordagem dos estudos sobre cobertura vegetal, através do sensoriamento remoto, normalmente aborda o aspecto fisionômico das comunidades. Em larga escala, as comunidades que co-ocorrem em uma dada área constituem formações ou biomas, e em menor escala a co-ocorrência de determinadas espécies constitui uma associação (Whittaker, 1978). A floresta tropical úmida é a formação florestal predominante das regiões de clima tropical úmido da Terra, onde a estação seca é curta ou ausente (Whitmore, 1992).

Uma visão do "manto" florestal, por imagens orbitais ou mesmo de um avião, permite ao observador reconhecer distintas formações florestais, provocadas por uma combinação particular da estrutura vegetacional e por aspectos fisionômicos da flora. Essas formações ocupam diferentes habitats e respondem normalmente às suas principais características físicas (p.ex. disponibilidade de água, topografia, tipos de solos etc). Essas variações são contínuas e ocorrem em gradientes.

A própria floresta apresenta variações internas, sob a forma de verdadeiro mosaico de clareiras ("gaps") em diferentes estágios sucessionais. Há floresta em fase de clareira recém aberta, em fase de fechamento e em fase madura (Richards, 1981; Whitmore, 1992). Essa variação observada dentro de uma comunidade constitui a sua própria dinâmica de manutenção, estando a floresta, portanto, em contínuo crescimento. Outras variações internas dizem respeito às alterações

observadas sazonalmente, i.e., aos aspectos fenológicos da vegetação.

Alterações naturais observadas em maior escala são causadas pela ação do fogo, vento e inundação. Ação antrópica, através de queimadas, utilização agropecuária e exploração madeireira, também atua modificando o ecossistema. A resposta de recuperação do ambiente a essas alterações está muitas vezes relacionada ao tamanho e frequência do evento, bem como as características inerentes à própria dinâmica natural da floresta.

Estudos de ecossistemas, onde a abordagem é tanto temporal como espacial, como no caso das alterações acima citadas, são em grande parte proibitivos em nível de campo. Requerem grande esforço de pessoal no campo e gastos com equipamentos, uma vez que exigem vários anos e continuidade de observações. Nesse sentido, a utilização do sensoriamento remoto pode se tornar um meio viável para estudos da dinâmica florestal.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principal objetivo mostrar de que forma o sensoriamento remoto pode contribuir para estudos de dinâmica florestal, procurando enfocar:

- . sua aplicabilidade nas diversas formas em que se processa a dinâmica;
- . algumas formas de estudos de dinâmica por sensoriamento remoto e
- . algumas limitações do uso desse recurso nesse tipo de estudo.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PRINCIPAIS PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZADOS EM ESTUDOS DE VEGETAÇÃO

2.1 Fotografias Aéreas

Os sistemas fotográficos foram um dos primeiros produtos de sensoriamento remoto desenvolvidos. Constituem-se de câmara fotográfica (objetiva, diafragma, obturador e corpo) que focaliza a energia proveniente do alvo sobre o detector, que nesse caso é o filme fotográfico. Os filmes utilizados em sensoriamento remoto são classificados em: pancromáticos (preto e branco, sensíveis a toda porção do espectro); infravermelhos preto e branco (com sensibilidade espectral entre 0,36-0,90 μm); filmes coloridos e infravermelhos coloridos ou filmes falsa-cor (assim chamados por reproduzirem objetos da natureza com cores diferentes das que possuem) (Novo, 1989).

O produto fotográfico, i.e., a fotografia aérea, apresenta diversos fatores que contribuem para a redução de sua resolução final, tais como: resolução do filme, da tomada da foto (altura do vôo, velocidade do avião), velocidade do obturador, resolução das lentes, etc. A qualidade das fotografias também é afetada pela iluminação da cena, pela reflectância dos alvos, pelo espalhamento e pelo ângulo de elevação do sol. Dessa forma, as missões de aereolevanteamento devem sempre levar em consideração as condições atmosféricas e, dependendo do caso, o horário de tomada das fotografias definirá o posicionamento do sol. Mesmo com todas essas implicações, a fotografia aérea

ainda é o sistema que melhor fornece informações sobre a superfície em termos espaciais (Novo, 1989).

Sabins (1978) fez comentários sobre a forma versátil de sensoriamento remoto que é a fotografia aérea, levantando os seguintes aspectos: 1. a resolução espacial e o conteúdo de informações são altos; 2. a aquisição é relativamente simples e barata, em relação aos levantamentos convencionais (em campo); e, 3. numerosos tipos de filmes fornecem uma faixa de sensibilidade que varia da região espectral do ultra-violeta através do visível, indo até a região do infravermelho refletido.

2.2 Imagens Orbitais

O lançamento do primeiro satélite Landsat, em 1972, iniciou uma nova era na aquisição e geração de dados de sensoriamento remoto. Os dados gerados pelo MSS ("Multi-spectral Scanner System")/Landsat forneceram dados no visível e na porção infravermelho próxima do espectro eletromagnético com uma visão sinóptica da área muito maior do que era possível com as fotografias aéreas (Irons *et al.*, 1989). A partir de 1973, entrou em operação o Sistema Brasileiro de Recepção de Dados de Satélite, composto de uma estação de recepção, implantada em Cuiabá-MT, e um laboratório de processamento eletrônico e fotográfico (situado em Cachoeira Paulista-SP) dos dados coletados pelos sensores a bordo do satélite (Novo, 1989).

Atualmente os principais sistemas orbitais em operação com sensores para aplicação em recursos naturais são o Landsat 4 e 5, Spot 1 e 2 e NOAA 7 e 9 (Tabela 1).

TABELA 1 - PRINCIPAIS SATÉLITES EM OPERAÇÃO

Satélite*	Sensor	Banda	Região espectral (µm)	Ciclo (dias)	Hora de Aquisição	Resolução
NOAA-7	AVHRR-2	1	0,58- 0,68	1	14:30	1,1 km ²
		2	0,725-1,10			"
		3	3,55-3,93			"
		4	10,5-11,50			"
		5	11,5-12,50			"
NOAA-9	AVHRR-2	1	0,58- 0,68	1	19:30	1,1 km ²
		2	0,725-1,10			"
		3	3,55-3,93			"
		4	10,5-11,50			"
		5	11,5-12,50			"
LANDSAT-4	MSS	4	0,50-0,60	16	9:45±15min	80 m
LANDSAT-5		5	0,60-0,70			"
		6	0,70-0,80			"
		7	0,80-1,10			"
LANDSAT-4	TM	1	0,45-0,52	16	9:45±15min	30 m
LANDSAT-5		2	0,52-0,60			"
		3	0,63-0,69			"
		4	0,76-0,90			"
		5	1,55-1,75			"
		6	10,40-12,50			120 m
		7	2,08-2,35			30 m
SPOT-1	HVR	1	0,50-0,59	26	10:30	20 m
		2	0,61-0,68			"
		3	0,79-0,89			"
		Pancrom	0,51-0,73			10 m

FONTE: Adaptado de Asrar (1989) com informações de Novo (1989).

* Todos os satélites possuem órbita quase polar hélio-sincrôna.

2.2.1 NOAA

O sensoriamento remoto orbital para fins de observações ambientais (meteorológicas, hidrológicas, climatológicas e oceanográficas) teve seu início com o lançamento pelos EUA do satélite TIROS ("Television and Infrared Observation Satellite"). A partir dessa data, vários foram os avanços ocorridos, tanto em nível de plataforma, como de sensores e de outros requisitos para o melhor suprimento de informações ambientais do planeta. A partir do satélite NOAA-6, lançado em 1979, que levava a bordo o sensor AVHRR ("Advanced Very High Resolution Radiometer"), com uma banda correspondente ao infravermelho próximo, tornaram-se possíveis estudos de cobertura vegetal com esse sistema (Rao *et al.*, 1990).

Os satélites da série NOAA, além de disseminar dados do imageador AVHRR em tempo real, podem também gravá-los a bordo, de dois modos: 1. LAC ("Local Area Coverage"), com resolução 1,1 km em nadir; e 2. GAC ("Global Area Coverage"), com resolução espacial degradada de 4 km. Em virtude de limitações intrínsecas ao sistema de bordo, o modo GAC é o mais adequado para armazenamento de imagens (Ferreira, 1993).

A partir de dados GAC, é gerado um outro produto o GVI ("Global Vegetation Index"), com resolução de 15 km, sendo possível também a geração de produtos com 8 km de representatividade. Grande parte dos trabalhos de fenologia e dinâmica de vegetação utiliza composições GVI, obtidas em intervalos semanais, mensais e trimensais. Uma das grandes vantagens dessas

composições é a redução quase total dos efeitos da cobertura de nuvens, além do fato de sua eficiência em relação a sua sensibilidade a atributos da vegetação e a sua alta frequência de aquisição de dados.

Com relação a outras aplicações, vale ressaltar o monitoramento de queimadas através de imagens termais AVHRR/NOAA (banda 3: 3,55-3,99 μm), realizado unicamente pelo Brasil desde 1987. Há vários fatores que contribuem para o não emprego dessa técnica para esse fim em outros países, entre os quais o fato de sua própria inexpressiva ocorrência (Setzer *et al.*, 1992).

Como pode ser observado pela Tabela 1, o AVHRR/NOAA apresenta vantagens de resolução temporal em relação aos demais sistemas sensores, pois uma mesma área pode ser imageada 1 vez ao dia e 1 vez à noite, por cada um dos satélites operantes. Esse fato pode ser útil na detecção de alterações na vegetação que ocorram em curtos intervalos de tempo, onde o acompanhamento do evento pelos sensores do Landsat é dificultado pelo fato de sua passagem ser feita somente a cada 16 dias. Outra grande vantagem das imagens AVHRR/NOAA é o seu baixo custo.

A desvantagem de seu uso para estudos de dinâmica florestal refere-se às limitações em 2 aspectos de grande importância em estudos dessa natureza: as resoluções espectral e espacial. Em muitos casos, as limitações desse sensor não permite o monitoramento da dinâmica da cobertura vegetal (Moran *et al.*, 1993). Devido a essa baixa resolução, esse instrumento não tem se mostrado eficiente para estimar áreas desmatadas. Como no caso da super-estimativa de desmatamento para Amazônia

em 1987, ocasionada pelas imprecisões nas quantificações de "pixels" ("picture elements") tomados pelo fogo na banda 3 do AVHRR (Fearnside, 1990).

2.2.2 Landsat

Os satélites Landsat 1 e 2, atualmente não operacionais, levavam a bordo 2 sensores, o RBV ("Return Beam Vidicon") que faziam o imageamento instantâneo de toda a cena e o MSS que imageava o terreno por varredura de linhas. Os sistemas sensores foram sendo modificados até que, a partir do Landsat 4, lançado em 1984, o RBV foi substituído pelo TM ("Thematic Mapper"). Esse sensor que opera em 7 faixas espectrais (Tabela 1) é também um sistema de varredura de linhas

como o MSS, porém de maior resolução espacial (Novo, 1989).

Com ampla aplicação para estudos de recursos naturais (Tabela 2), os produtos resultantes do processamento dos dados enviados pelos satélites Landsat, para as estações terrenas de recepção, são imagens fotográficas pictóricas que se tornam disponíveis na forma analógica (fotográfica) ou digital.

Através desses produtos vêm sendo feitos vários estudos que abordam diferentes aspectos da dinâmica florestal. Por esses trabalhos, exemplificados posteriormente nesse texto, pode-se verificar que para estudos de alterações na vegetação as bandas do TM mais utilizadas foram as 3, 4 e 5.

TABELA 2 - PRINCIPAIS APLICAÇÕES DOS CANAIS DO SENSOR TM/LANDSAT

Canal	Faixa Espectral (µm)	Principais Aplicações
1	0,45 - 0,52	Mapeamento de águas costeiras Diferenciação entre solo e vegetação Diferenciação entre veg. coníferas e decíduas
2	0,52 - 0,60	Reflectância de vegetação verde sadia
3	0,63 - 0,69	Absorção da clorofila Diferenciação de espécies vegetais
4	0,76 - 0,90	Avaliação de biomassa Delineamento de corpos d'água
5	1,55 - 1,75	Medidas de umidade da vegetação Diferenciação entre nuvens e neve
6	10,4 - 12,5	Mapeamento de estresse térmico em plantas Outros mapeamentos térmicos
7	2,08 - 2,35	Mapeamento hidrotermal

FONTE: Adaptado de Novo (1989).

Muitos dos trabalhos também utilizaram comparações entre a radiância dessas bandas através do índice NDVI ("normalized difference vegetation index", NDVI infravermelho próximo - vermelho/ infravermelho próximo + vermelho). Esse índice correlaciona-se bem com o índice de área foliar, fitomassa, taxa de crescimento, produtividade primária líquida. Uma vez que o NDVI presta-se para medidas de parâmetros vegetacionais relacionados à presença de clorofila, sua aplicação em estudos de dinâmica florestal pode fornecer importantes informações para a sua melhor compreensão. Deve-se, no entanto, tomar cautela em situações onde outros fatores (p.ex. topografia) possam estar influenciando os resultados (Sader *et al.*, 1989).

2.2.3 Spot

Em 1986, o CNES ("Centre national d'Etudes Spatiales") lançou o satélite Spot ("Systeme Probatoire pour l'Observation de la Terre") carregando a bordo o sensor HRV ("Haut Resolution Visible"). O HRV (Tabela 2) adquire dados de imagens digitais com 10 metros de resolução espacial no seu modo pancromático e com 20 metros de resolução em 3 bandas do espectro eletromagnético (verde, vermelho e infravermelho próximo). Outra característica desse sensor é o fato de poder ser apontado "off-nadir" para aquisição de imagens estereoscópicas. O imageamento "off-nadir" permite observar cenas laterais à órbita em que se encontra o satélite, possibilitando um aumento no recobrimento

repetitivo de determinadas áreas (Irons *et al.*, 1989; Novo, 1989).

A grande vantagem oferecida pelo HVR/Spot é a sua alta resolução espacial. No entanto, sua resolução espectral (opera em apenas 3 bandas) é inferior ao do TM/Landsat que opera em 7 bandas espectrais. Há casos de estudos, como o de classificação de florestas, onde o atributo espectral é mais importante que o espacial, tornando o sistema ineficiente. Porém, há possibilidade de analisar imagens HVR/Spot em conjunto com imagens TM/Landsat. Nesse caso, superpõe-se uma imagem HVR pancromática em uma TM reamostrada em 10x10m (nove pixels idênticos em cada pixel TM), obtendo-se, assim, bons resultados (Nelson, 1992).

O sistema apresenta também resolução temporal nominal inferior ao Landsat, devido o intervalo entre ciclos se realizar em 26 dias. Esse fato apresenta desvantagens devido diminuir o número de dados por problemas com coberturas de nuvens e por dificultar estudos de fenômenos dinâmicos que ocorrem em curtos intervalos de tempo. Nesse sentido, a visada "off-nadir" permite melhorar a resolução temporal do sistema, aumentando a frequência de aquisição de dados, através da observação obtida de órbitas adjacentes. Outra vantagem desse tipo de visada é permitir uma visão tridimensional do terreno, através dos pares estereoscópicos. No entanto, as implicações que a visada "off-nadir" possa ter sobre a reflectância dos alvos sobre a superfície terrestre, vêm gerando indagações e pesquisas no sentido de avaliá-las (ver citações em Novo, 1989).

O grande problema, porém, na utilização do sistema está no fato do elevado custo dos produtos gerados. O mesmo é operado comercialmente através da venda de fitas e imagens, e devido a isso os dados da maioria das passagens não são armazenados. É necessário uma etapa de "encomenda" da cena a ser imageada, quando o usuário deve informar a coordenada, o modo espectral, a data e a configuração do produto desejado. No caso de imagens "off-nadir" é feita uma priorização de pedidos, ficando o usuário na incerteza de sua aquisição (Novo, 1994).

3. ALTERAÇÕES NATURAIS EM PEQUENA ESCALA

3.1 Formação de Clareiras

Embora não seja recente o reconhecimento da dinâmica da floresta, a compreensão dos processos envolvidos na mesma ainda hoje desperta interesse dos ecólogos. Considerando-se a base da dinâmica natural do ecossistema florestal, a formação de clareiras tem importante papel no processo das estratégias evolutivas das espécies, tanto ecofisiologicamente como por suas características demográficas (Bazzaz, 1983). Essas estratégias dizem respeito à própria "performance" da(s) espécie(s) em diferentes tipos de clareiras (tamanho, frequência de ocorrência, agente causador, intensidade).

As clareiras, aberturas do dossel florestal, variam de tamanho em decorrência, em grande parte, do seu agente causador: a) as pequenas: causadas normalmente pela queda de ramos; e b) as grandes: provocadas pela queda de árvores devido à idade, doença e

vento. Outros agentes causadores de grandes clareiras são: fogo, ciclones, terremotos, etc (Bazzaz, 1983). A ocorrência de clareiras é de certa forma sazonal, sendo mais freqüente na estação chuvosa, quando a queda de árvores e de ramos é também ampliada pelos fortes ventos (Sarukhán, 1978).

O preenchimento das clareiras está intimamente relacionado com o seu tamanho. Quando muito pequenas, são fechadas com o simples crescimento dos ramos das árvores adjacentes. Com o aumento no tamanho das clareiras, o preenchimento é feito pelas plântulas da regeneração, que compõem o banco de plântulas, que se mantém sob o dossel aguardando o momento propício para o crescimento (Richards, 1981). As clareiras grandes são fechadas pelas espécies presentes no banco de sementes, como as espécies secundárias que possuem grande longevidade nessa fase. Nas muito grandes, a contribuição de novos colonizadores passa ser substancial (Bazzaz, 1983).

O tempo de recuperação (Tabela 3) da área aberta responde, portanto, à forma e a severidade do evento causador, podendo agir sobre os elementos regenerantes (plântulas) e sobre o banco de sementes. Em locais ocupados por invasoras, como determinadas gramíneas e herbáceas, ou por "stands" homogêneos de *Cecropia* spp, *Trema* spp etc., o processo de recuperação é, muitas vezes, atrasado (Bazzaz, 1983).

TABELA 3 - TAMANHOS MÉDIOS DE CLAREIRAS E TAXAS DE RECUPERAÇÃO EM ALGUMAS FLORESTAS TROPICAIS

Localização	Tamanho Médio da Clareira (m ²)	Taxa de Recuperação (anos)
La Selva, Costa Rica	89 ± 90	80 - 130
BCI, Panama	85	114
Malásia	400	250
Amazônia	--	100
Los Tuxtlas, Mexico	91	100

FONTE: Bazzaz (1983).

Como é possível observar pela Tabela 3, as clareiras naturais que se abrem nas florestas tropicais são de pequeno tamanho (89-90 a 400 m²). Esse fato restringe o seu monitoramento por sensoriamento remoto somente através das fotografias aéreas. O sensoriamento remoto orbital é limitado pela sua resolução espacial. Os produtos orbitais mais acessíveis, imagens TM/Landsat (Tabela 3), possuem "pixels" de 900m², portanto, superiores às áreas das próprias clareiras. As fotografias aéreas possuem resolução espacial superior àquelas das imagens orbitais, o que permite uma boa análise estrutural da cobertura vegetal e acompanhamento da recuperação do dossel. Um estudo intensivo foi realizado por Holdridge *et al.*(1971) em florestas tropicais na Costa Rica, onde pares estereoscópicos de fotografias aéreas, pancromáticas e infravermelhas, em diferentes escalas, permitiram distinguir tipos florestais, estágios sucessionais e aberturas no dossel.

3.2 Sucessão e Clímax

A sucessão ecológica, como é chamado o desenvolvimento do ecossistema, envolve uma série de mudanças temporais na estrutura das espécies e na comunidade vegetal. A seqüência inteira de comunidades, que se substituem umas às outras em uma dada área, é chamada **sere**, as comunidades transitórias de **estádios serais** ou **estádios de desenvolvimento**, e o sistema estabilizado terminal, de **clímax**. Denomina-se **sucessão primária** aquela que ocorre em uma área ainda não ocupada, e **sucessão secundária** aquela que ocorre em área já anteriormente ocupada (Odum, 1988). Dessa forma, em dunas recém-criadas, ocorre sucessão primária e, em um pasto abandonado, sucessão secundária.

Estudos sobre o processo sucessional em florestas tropicais, através do sensoriamento remoto, referem-se principalmente à sucessão secundária, ou melhor, às áreas de regeneração natural provocadas em sua maioria pela ação antrópica. Grande parte dos trabalhos utilizam esse recurso somente para mapeamento, diferenciando as áreas de regeneração das florestas intactas. Outros, porém, referem-se a análises temporais do processo, procurando também diferenciar as etapas de sucessão por valores radiométricos determinados a partir de dados orbitais e índices de vegetação (Sader *et al.*, 1989; Hall *et al.*, 1991; Brondizio *et al.*, 1993; Moran *et al.*, 1993). Em tais análises, os dados dos sensores MSS e TM do Landsat, foram os mais utilizados.

Moran *et al.* (1993) puderam verificar, através de imagens TM/Landsat,

diferenças nos padrões assumidos pelos "pixels" em imagens de áreas ocupadas por florestas em três diferentes etapas sucessionais: 1. secundária inicial (com menos de 6 anos) - com números digitais baixos (escuros) nas bandas do visíveis e valores elevados no infravermelho; 2. secundária intermediária (com 6 a 10 anos) - com números digitais e valores inferiores no infravermelho próximo em relação à etapa anterior; e 3. secundárias entre 11 a 15 anos - cujo padrão nas imagens e biomassa aproxima-se da floresta intacta, porém diferenciando-se dessa pelos menores valores de números digitais nas bandas do infravermelho. Os autores observaram ainda diferenças nas taxas de regeneração devido a variações nos solos. Em solos paupérrimos, a regeneração de 15 anos correspondia à regeneração de 2 anos em áreas eutróficas. Nelson (1992) fez comentários sobre a facilidade de detecção de florestas oligotróficas na Amazônia pelo uso de imagens TM 4, nas quais essas aparecem como manchas escuras. O autor sugeriu que, dado a peculiaridade de sua flora, essas áreas fossem consideradas como prioritárias para a conservação. As observações de Moran *et al.* (1993) colaboram para reforçar essa afirmação.

Sader *et al.* (1989) estudaram as relações entre os estágios sucessionais, biomassa e o índice de vegetação NDVI ("Normalized Difference Vegetation Index") derivado de imagens TM/Landsat, em floresta tropical nas montanhas Luquillo em Porto Rico. Constataram que o NDVI foi influenciado pela topografia e que esse índice não foi apropriado para prever mudanças na

biomassa da floresta estudada. Nesse caso, o índice também não foi bom para diferenciar etapas sucessionais, embora tenham obtido NDVI médios significativamente mais baixos para florestas em estágios iniciais de sucessão (< 16 anos), quando comparadas com florestas mais velhas. Como recomendação, os autores sugerem que, para estudos de mudanças florestais em regiões montanhosas, deve se ter cautela na aplicação do NDVI derivado dos dados TM/Landsat.

3.3 Fenologia

Outro aspecto dinâmico da floresta diz respeito à ocorrência de eventos fenológicos (brotamento e queda de folhas, floração e frutificação). Esses eventos estão comumente associados a variações sazonais, sendo, portanto, sua ocorrência dependente do ano astronômico.

As florestas tropicais úmidas são geralmente sempre-verdes, beneficiadas, na maior parte do tempo, pelo clima ameno e úmido. Por esse motivo, é de se esperar que as árvores apresentem crescimento contínuo. O que ocorre na verdade é que somente poucas possuem esse comportamento. A maioria possui crescimento intermitente de caule (tronco) e folhas, ocorrendo em fluxos. Quanto à queda de folhas, uma distinção entre decíduas e sempre-verdes não é tão clara nos trópicos úmidos quanto é nos climas temperados (Whitmore, 1992).

Embora haja grande variação de comportamento, em nível de espécie é possível distinguir três padrões de deciduidade: 1. decíduas, cuja queda de folhas ocorre antes do rompimento das gemas

florais, deixando a copa desnuda e florida, por talvez alguns dias (p. ex. *Bombax*); 2. decíduas, cuja queda de folhas ocorre ao mesmo tempo em que há o rompimento das gemas, podendo se dar um pouco antes ou depois, dependendo das condições climáticas (p.ex. *Samanea saman* é sempre-verde em Singapura e breve-decídua nas Américas, onde é nativa); e 3. sempre-verdes, cuja queda de folhas pode ocorrer bem após a quebra das gemas, podendo coexistirem na mesma copa várias gerações de folhas. A deciduidade, ou melhor, o período de copa desnuda, é mais pronunciado em climas tropicais mais fortemente sazonais. Vale aqui ressaltar que ao reenfolhar, as folhas jovens apresentam-se nos trópicos fortemente coloridos (Whitmore, 1992).

Aires (1986), estudando a fenologia de árvores de várzea na floresta Amazônica, constatou que os padrões fenológicos das matas nesse ambiente constituem respostas ao balanço hídrico nos solos. Observou que a queda das folhas iniciava-se ao término da frutificação, ficando considerável quantidade das árvores desnudas quando as águas desciam. O período desnudo coincidia com o pico do florescimento, sendo esse último seguido pela renovação das folhas.

Examinando imagens TM/Landsat das várzeas do baixo rio Purus, através de composições coloridas das bandas 3, 4 e 5, Nelson (1994) pôde verificar indício de maior deciduidade da floresta no mês de janeiro, pela queda na reflectância da banda 4. Em margens inundáveis dos rios Japurá e Juruá, pôde observar forte deciduidade (mês de janeiro), com queda sincrônica de folhas no período inicial de subida das águas e maiores

taxas pluviométricas. Em imagens desse local, no mês de agosto, verificou alta reflectância na banda 4.

Quanto ao florescimento, as espécies do clímax na floresta tropical úmida florescem em sua maioria (há também excessões), uma vez ao ano e mais ou menos ao mesmo tempo. Já as espécies pioneiras, e assim as florestas secundárias, apresentam florescimento contínuo, com algumas espécies florescendo várias vezes ao ano e outras durante todo o ano. A monocarpia (i.e. florescimento simultâneo, seguido de frutificação e morte), por conseguinte, é um fenômeno que ocorre em poucas florestas tropicais. É mais comum nas monocotiledôneas, como bambus e palmeiras, e pouco comum nas dicotiledôneas arbóreas (Whitmore, 1992).

Nelson (1994), estudando matas de bambu arbóreo (*Guadua weberbaueria* e *G. sacocarpa* que ocorrem no Estado do Acre), através de imagens TM/Landsat, pôde verificar, além da mortalidade sincrônica, diferentes estágios de crescimento, reconhecidos como grandes áreas circulares, espectralmente homogêneas internamente e distintas entre si. Segundo o autor, esses bambus são uma das poucas espécies de dossel amazônicas reconhecidas pelo sensoriamento remoto orbital.

4. ALTERAÇÕES NATURAIS EM LARGA ESCALA

Várias regiões dos trópicos úmidos estão sujeitas a perturbações naturais em larga escala. Algumas são verdadeiras alterações cataclísmicas, criando grandes clareiras ("big

gaps") onde, muitas vezes, a recuperação de volta ao estado original nunca se completa. Os vulcões e seus rios de lavas; os terremotos que causam deslizamentos de terras e destroem largas faixas de floresta, principalmente em áreas montanhosas; ciclones; ventos; fogo e inundação são algumas das alterações em larga escala que podem ocorrer em florestas tropicais úmidas (Garwood et al, 1979; Whitmore, 1992).

Muitas áreas que sofreram alterações naturais desse tipo podem ser reconhecidas por técnicas de sensoriamento remoto, podendo dessa maneira ser melhor avaliados os danos e planejados os esforços de reabilitação. A previsão de ocorrência de eventos específicos, embora desejável, é extremamente mais difícil. Porém, não se deve descartar a contribuição de dados de sensoriamento remoto para previsões desses eventos cataclísmicos (Sabins, 1978).

4.1 Inundações

Na Amazônia peruana ocorre uma curiosa ação de inundação sobre a vegetação. Fotografias aéreas, e mesmo imagens orbitais, revelaram largas faixas no dossel florestal, indicando mudanças nos meandros dos rios. Muitos tributários do Amazonas, que correm muito rapidamente devido aos declives andinos, são sujeitos a violentas inundações anuais, podendo erodir em alguns casos até 180 m de margem. Nas margens erodidas, ocorre sucessão primária, e as faixas de dossel observadas referem-se aos diferentes estágios sucessionais. O clímax, porém, é raramente atingido, devido as sucessivas inundações

destruírem constantemente a floresta (Whitmore, 1992).

Analisando imagens MSS/Landsat nos canais 6 e 7, Salo & Kalliola (1990) constataram que 26,6% das florestas de terras baixas peruanas possuem características de atividades erosivas e deposicionais, e que 12% dessas florestas estão em processos sucessionais, i.e., não estabilizadas. Com esse tipo de imagem, os autores estimaram que as áreas inundáveis cobrem 14,6% do território peruano, sendo esse dado passível de aumentar, se forem adicionadas informações de imagens de radar.

Nelson (1994) descreveu a detecção de pontos de mortalidade de árvores na floresta de terra firme amazônica por alagamento. Esse fenômeno, que não foi uma inundação, ocorreu devido ao acúmulo de águas de chuvas em depressões relativamente pequenas (< que 5 ha). Os pontos de mortalidade foram localizados por imagens digitais TM/Landsat, em duas cenas próximo a Manaus (WRS 232/062 e 231/062).

4.2 Vento

As regiões localizadas entre 10° a 20° ao norte e sul do Equador estão sujeitas à ação de ciclones que derrubam periodicamente a floresta, como no Caribe, região da Baía de Bengala, nordeste das Filipinas, Queensland e Melanesia. As clareiras abertas no dossel variam em tamanho, forma e extensão umas das outras (Whitmore, 1992).

A ação de ventos destrutivos localizados ("downburst") foi detectada na Amazônia em imagens TM/Landsat. Em

floresta primária foram identificadas 330 feições com área superior a 30 ha, com geometria (forma de leque) e padrão característico de ação do vento. Em análise temporal, as derrubadas novas em forma de leque apresentam altos valores de radiância nas bandas 3 e 5 do TM/Landsat e baixos valores de radiância na banda 4. Nessa situação, as árvores estão desnudas ou tombadas. À medida que a vegetação secundária avança, ocultando os galhos e árvores mortas, os valores de radiância na banda 4 e o NDVI passam a ser bem mais altos que os da floresta intacta. Os valores altos de radiância mantêm-se por vários anos, tendendo a cair nos níveis de floresta primária com o avanço sucessional, não sendo mais visíveis as derrubadas após 25 a 30 anos (Nelson, 1994).

4.3 Fogo

Fogos naturais em florestas tropicais úmidas são raros devido ao elevado conteúdo de água na biomassa, sendo normalmente associados a extensos períodos secos. A perturbação climática pantropical, conhecida como fenômeno El Niño, causa um aquecimento anômalo em regiões normalmente mais frias do leste equatorial do oceano Pacífico. Em 1983, 3 (três) milhões de hectares de florestas tropicais úmidas de terras baixas foram destruídos pelo fogo em Kalimantan. Esse evento também causou uma forte seca na ilha Barro Colorado no Panamá, onde ocorreu elevada mortalidade de árvores (Whitmore, 1992).

Na Amazônia brasileira, nesse mesmo ano, e também associado ao fenômeno El Niño, Nelson (1994) constatou a presença de extensas áreas atingidas por fogo. A mortalidade e desfolhamento do dossel apresentaram altos valores de números digitais na banda 5 e baixos na 4, em imagens TM/Landsat de 1984. Em uma análise temporal, pôde verificar que, em 1989, a mesma cena imageada permitiu discriminar as áreas onde ocorreu mortalidade do dossel daquelas onde ocorreu apenas desfolhamento.

5. ALTERAÇÕES ANTRÓPICAS

A ação antrópica sobre as florestas tropicais úmidas vem provocando alterações nesse ecossistema, em grande escala, devido principalmente ao desmatamento. Além de afetar a diversidade biológica, pela destruição de habitats, isolamento de fragmentos florestais etc, os desmatamentos têm implicações no ciclo do carbono e em possível mudança climática (Skole & Tucker, 1993).

No Brasil, a Amazônia tornou-se fronteira agrícola e sua grande ocupação iniciada nas décadas de 60 e 70, trouxe grandes transformações principalmente aos estados do Pará, Mato Grosso, Maranhão e Rondônia. Nessas fronteiras agrícolas, as principais ações antrópicas, além, é claro, da urbanização, são as formações de pastagens, agricultura e exploração madeireira. Vários trabalhos vêm sendo feitos a fim de caracterizar e levantar os diferentes usos da terra nas áreas desmatadas da floresta amazônica, utilizando-se produtos de sensoriamento remoto (Lunz *et al.*, 1990; Miranda *et al.*, 1990; Watrin & Rocha, 1992).

O desmatamento da Amazônia como um todo, avaliado também através dessa técnica, ainda provoca discussões sobre o seu impacto ecológico (Skole & Tucker, 1993).

5.1 Queimadas

Associado ao desmatamento de áreas florestadas, e mesmo como prática agrícola tradicional, o uso do fogo é mais intenso em todo território brasileiro na época da estiagem. Essas queimadas, além do impacto direto com o ambiente, contribuem para o aumento na concentração de poluentes, sendo também aventado o seu efeito sobre o clima através de emissões de dióxido de carbono. No Brasil, a determinação do número e a extensão de queimadas, assim como sua localização geográfica e distribuição espacial, vêm sendo feita pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, utilizando dados diários do canal 3 do AVHRR/NOAA. Por meio de trabalhos de campo, constatou-se que ocorreram efetivamente 98% das queimadas detectadas. Através de convênios com empresas e instituições ligadas à preservação ambiental, o monitoramento das queimadas fundamentado nessa metodologia, vem se mostrando eficiente, tanto no aspecto da cobertura de regiões de dimensões variadas (de poucos a milhões de km²), como pela precisão e rapidez da localização e fácil disseminação da informação (Setzer *et al.*, 1992; Miranda, 1993).

O acompanhamento posterior da dinâmica florestal e mesmo do uso do solo nas áreas de queimadas, detectadas pelo AVHRR/NOAA, pode ser verificado por meio desse e de outras metodologias que envolvem

dados de sensoriamento remoto, com maior resolução espacial. Assim, poderá ser melhor monitorada e estudada a recuperação das áreas queimadas inacessíveis.

5.2 Uso Agropecuário

Os desmatamentos da Amazônia, como citado anteriormente, vêm sendo provocados por atividades agropecuárias, como implantação de pastagens e culturas agrícolas com espécies exóticas. Lunz *et al.* (1992) e Miranda *et al.* (1992) analisaram esse tipo de atividade através de imagens TM/Landsat-5, nas bandas 3 e 4, e puderam dessa forma quantificar, além desse tipo de ação, as áreas urbanas, os espelhos d'água e capoeiras. Esse último indica processo de regeneração natural, i.e., sucessão secundária ocorrendo nas áreas desmatadas.

5.3 Exploração Madeireira

A exploração madeireira na floresta Amazônica foi estudada por Watrin & Rocha (1992), através de imagens TM/Landsat-5, nas bandas 4 e 5. Nesse tipo de atividade são abertas clareiras nas matas, chamadas "pátios", de 500 a 3000 m², espaçadas umas das outras de 100 a 150 m. Os pátios servem para estoque de madeiras e estacionamento de máquinas (tratores que arrastam as toras por ramais abertos na floresta). Os autores salientaram que a detecção dessa atividade é possibilitada pela resolução espacial do sensor TM/Landsat ser de 30 m, e pelo fato de o solo exposto apresentar alta reflectância em relação a outros alvos. Puderam também verificar a regeneração natural se

processando, pela atenuação ou mesmo ausência desses alvos em "pátios" abertos em épocas anteriores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelo exposto anteriormente, pode-se constatar alguns aspectos do emprego do sensoriamento em estudos de dinâmica florestal.

Quanto a sua aplicabilidade:

- . o sensoriamento remoto permite uma visão sinóptica da área em estudo;
- . os domínios temporal e espectral possibilitam o acesso a informações que dificilmente seriam obtidas em nível de campo;

Quanto às formas de emprego:

- . tanto através de imagens em papel, como digitais, é possível obter composições que facilitem a análise dos fenômenos dinâmicos;
- . as interpretações são ampliadas por comparações de produtos em diferentes bandas espectrais, por meio de índices de vegetação etc.

Quanto às limitações:

- . alterações que ocorrem em pequena escala não podem ser monitoradas por sensoriamento remoto orbital, ficando restritas ao uso de fotografias aéreas;
- . esse recurso só permite uma avaliação estrutural da vegetação, podendo ser utilizado como informação complementar em análises mais aprofundadas.

Dessa forma, verifica-se que o estudo de diferentes aspectos da dinâmica da floresta tropical através de sensoriamento remoto é possível, sendo também esse um recurso de grande potencial para a compreensão da

ecologia florestal e avaliação de impactos ambientais.

7. Referências Bibliográficas

- AYRES, J.M.C. *Uakaris and Amazonian Flood Forest*. (PHD Dissertation) - Cambridge University, Sidney Sussex College, June, 1986.
- ASRAR, G. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. John Wiley & Sons, New York, 1989.
- BAZZAZ, F.A. Dynamics of wet tropical forest and their species strategies. In: Medina, E.; Mooney, H.A.; Vázquez-Yanes, ed. *Physiological ecology of plants of wet tropics*. The Hague, Dr W. Junk Publishers, 1984.
- BRONDIZIO, E.S.; MORAN, E.F.; MASUEL, P.; WU, Y. Dinâmica na vegetação no baixo Amazonas: análise temporal do uso da terra integrando imagens LANDSAT TM, levantamentos florísticos e etnográficos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. *Anais*. Curitiba, Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, v. 2, 1993, p. 38 - 46.
- FEARNSIDE, P.M. Rate and extent of deforestation in Brazilian Amazonia. *Environmental Conservation*, 17(3): 213-226, 1990.
- FERREIRA, M.E. Satélites Meteorológicos: Histórico, Principais Características, Sensores e Dados. In: *III Curso de Interpretação de Imagens e Análise Meteorológica*: apostila de curso da

- Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos, 4 a 8 de outubr. 1993.
- GARWOOD, N.C.; JANOS, D.P.; BROKAW, N. Earthquake cause landslide: a major disturbance to tropical forest. *Science*, 205: 997-999, 1979.
- HALL, F. G.; BOTKIN, D. B.; STREBEL, D. E.; WOODS, K.; GOETZ, S.J. Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing. *Ecology*, 72(2):628 - 640, 1991.
- HOLDRIDGE, L.R.; GRENKE, W.C.; HATHEWAY; LIANG. T.; TOSI Jr, Oxford, Pergamon Press, J.A. *Forest Enviroments in Tropical Fife Zones a Pilot Study.*, 1971.
- IRONS, I.R.; WEISMILLER, R.A.; PETERSEN, G.W. Soil Reflectance. In: Asrar, G. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. NewYork, John Wiley & Sons, p. 66-106, 1989.
- LUNZ, H.; PEREIRA, V.F.G.; PEREIRA, A.M.B. Desmatamento e uso atual da terra no Estado do Acre. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, 1990. *Anais*. Manaus, Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, v. 2, p. 373-380, 1990.
- MIRANDA, E.E. Variabilidade Espaço-temporal das Queimadas no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. *Anais*. Curitiba, Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, v. 2, p.197-201, 1993.
- _____; SANTOS, R.Z.; MATTOS, C. Aplicação de imagens TM/LANDSAT na análise de uso das terras no Estado de Rondônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, 1990. *Anais*. Manaus, Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, v. 2, p. 451-456, 1990.
- MORAN, E.F.; BRONDÍZIO, E.; MASUEL, P.; LI, Y.H. Assinaturas Espectrais Diferenciando Etapas de Sucessão Secundária no Leste Amazônico. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. *Anais*. Curitiba, Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, v. 2, p. 202- 209, 1993.
- NELSON, B.W. *Caracterização da Flora Amazônica por Satélite*. Trabalho realizado para a conferência "Uma estratégia Latino-Americana para Amazônia" - Fundação Memorial América Latina. São Paulo, 25 a 27 de março, 1992.
- NELSON, B.W. Natural Disturbance and Change in Brazilian Amazon. *Remote Sensing Reviews*. 1994. No prelo.
- NOVO, E.M.L.M. *Sensoriamento Remoto Princípios e Aplicações*, Ed. Edgar Blücher Ltda., São Paulo, 1989.
- _____. *Introdução aos Sensores Remotos: notas de aulas dadas no INPE*. São José dos Campos, março a maio, 1994. Manuscrito.
- ODUM, E. *Ecologia*. Ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1988.
- RAO, P.K.; HOLMES, S.J.; ANDERSON, R.K.; WINSTON, J.S.; LEHR, E. *Weather Satellites: Systems, Data, and Enviroments*

- Applications. Boston, American Meteorological Society, 1990. 503 p.
- RICHARDS, P.W. *The Tropical Rain Forest, an Ecological Study*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1981.
- SABINS Jr, F.F. *Remote Sensing Principles and Interpretation*. W.H. Freeman, San Francisco, 1978. 426 p.
- SADER, S.A.; WAIDE, R.B.; LAWRENCE, W.T.; JOYCE, A.T. Tropical forest Biomass and Successional Age Class Relationships to a Vegetation Index Derived from Landsat TM data. *Remote Sens. Environ.*, 28: 143 - 156, 1989.
- SALO, J.S.; KALLIOLA, R. J. River dynamics and regeneration in the peruvian amazon. In: Gómez-Pompa, A.; Whitmore, T.C.; Hadley, M. eds. *Rain Forest Regeneration and Management*. Paris, Unesco, 1990. p. 245-256. (Man and Biosphere Series; v.6).
- SARUKHAN, J. Studies on the demography of tropical trees. In: Tomlinson, P.B.; Zimmerman, M.H. ed. *Tropical Trees as Living Systems*. Cambridge, Cambridge University Press, 1978, p. 163-184.
- SETZER, A.W.; PEREIRA, M.C.; PEREIRA, A.C. O uso de satélites NOAA na detecção de Queimadas no Brasil. *Climanálise*, 7(8): 40-53.
- SKOLE, D.; TUCKER, C. Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in Amazon: Satellite Data from 1978 to 1988. *Science*, 260: 1905-1910, 1993.
- WATRIN, O.S.; ROCHA, A.M.A. *Levantamento da vegetação natural e uso da terra no Município de Paragominas (PA) utilizando imagens TM/landsat*. Belém, EMBRAPA-CPATU, 1992. 40 p.
- (EMBRAPA-CPATU. Circular Técnica, 124).
- WHITMORE, T.C. *Tropical Rain Forest of the Far East*. Oxford, Claredon Press, 1975. 278 p.
- _____. *An Introduction to Tropical Rain Forests*. Oxford, Claredon Press, 1992. 226 p.