

Diagnosticando florestas tropicais através do sensoriamento remoto

Simone Rodrigues Freitas¹
Yosio Edemir Shimabukuro²

¹Laboratório de Ecologia e Biogeografia, Depto. Geografia, Inst. de Geociências,
Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, RJ, Brasil
simonerfreitas@yahoo.com.br

²Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São
José dos Campos, São Paulo, Brasil
yosio@dsr.inpe.br

Abstract. Remote sensing has been used extensively to identify and quantify forest area reduction in the tropics. However, it has proven insufficient for determining precisely how much forest remains. It is critical to know the state or condition of this remaining forest, i.e., the extent to which this forest is structurally mature. Certain initiatives improved monitoring through diagnosing tropical forests. Could forest condition be estimated from space? The aim of this paper is twofold. The first goal is to review these initiatives, explaining the remote sensing techniques used. Most studies analyzed the relationships of structural features of forests to vegetation indices and radiance measurements in spectral bands related to vegetation, mainly using images acquired by Landsat series. The second goal is to discuss how forest conditions can be assessed through these techniques. The most popular vegetation index is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). However, NDVI sensitivity is reduced over dense canopies, which may constrain its usage in dense tropical forests. Then other vegetation indices have been proposed to be more suitable for dense tropical forests. This saturation matter in vegetation indices and the transferability of relationships between biophysical characteristics and vegetation indices to other sites and times will be discussed.

Palavras-chave: remote sensing, tropical forest, diagnose, sensoriamento remoto, floresta tropical, diagnóstico.

1. Introdução

As florestas tropicais são importantes estoques de carbono e habitats para espécies animais e vegetais (Whitmore 1990, Fisher e Thomas 2004, Fearnside 2005). No entanto, estão constantemente sob ameaça, principalmente devido à dinâmica do uso da terra (Lambin et al. 2003, Roberts et al. 2003). O sensoriamento remoto é uma ferramenta usada para identificar e quantificar a distribuição da floresta desde a escala global até a local (Myers 1988, Howard 1991, Achard et al. 2002). Além disso, o sensoriamento remoto é uma ferramenta útil para monitorar a cobertura da floresta tropical na superfície terrestre porque imagens são registradas todos os dias por uma constelação de satélites. O mapeamento e o monitoramento do desmatamento (incluindo corte seletivo) e de focos de incêndios florestais também permitem a análise dos padrões e das causas da perda de floresta tropical, podendo sugerir ações políticas e locais para a conservação da floresta (Laurance et al. 2002, Millington et al. 2003, Caviglia-Harris 2004, Davidson & Artaxo 2004, Pfaff & Sanchez-Azofeifa 2004, Walker 2004, Ferraz et al. 2005, Perz et al. 2005, Armenteras et al. 2006). O monitoramento da floresta e as mudanças do uso e da cobertura da terra necessitam de análises temporais e geralmente usam imagens de satélite ou fotografias aéreas (Millington et al. 2001, Mendoza & Etter 2002, Lambin et al. 2003). Embora seja uma tarefa usual distinguir áreas florestais de outros tipos de cobertura e uso da terra, é difícil discriminar diferentes tipos de floresta. Esta limitação do sensoriamento remoto se dá devido às características do sensor e ao gradiente contínuo formado por florestas adjacentes (Freitas e Cruz 2003). Nos trópicos, a floresta é um mosaico de estádios sucessionais com limites não-claros (Whitmore 1990). No entanto, quando fragmentada, uma floresta pode ser circundada por diferentes usos da terra, tais como pastagens, plantações ou áreas urbanas, tornando o contraste entre os elementos

maior e a distinção da floresta mais clara. Outra limitação dos sensores remotos, exceto os sensores que operam na faixa de micro-ondas, é que eles não medem o sub-bosque, já que eles não podem penetrar através do dossel (Wilkie & Finn 1996). Assim, a maioria dos sensores não pode identificar clareiras e impactos antrópicos (p.ex. corte seletivo) obstruídos pelo dossel, exceto nos casos onde as clareiras e trilhas criam uma abertura no dossel.

Não é o suficiente saber apenas quanto de cobertura florestal resta e onde as mudanças ocorrem. É necessário conhecer também o estado dos remanescentes florestais, isto é, quantificar que proporção desta floresta está estruturalmente madura. Algumas iniciativas aperfeiçoaram o monitoramento através do diagnóstico das florestas tropicais. Uma das primeiras etapas é associar as características estruturais e funcionais das florestas às medidas tomadas pelos sensores remotos. Assim, as medidas provenientes do sensoriamento remoto podem ser usadas como indicadores das condições da floresta. Biomassa, produtividade, fenologia e diversidade são algumas das características estruturais e funcionais das florestas relacionadas às medidas tomadas pelos sensores remotos (Foody 2003).

2. Biomassa

Um variado leque de abordagens tem sido proposto para quantificar biomassa usando sistemas óticos, radares (SAR) e lasers (LIDAR) estimulado pelo Protocolo de Kyoto e pelas necessidades de quantificar o carbono total e aprimorar a compreensão dos estoques de carbono terrestre (Rosenqvist et al. 2003). Os sistemas óticos mais usados para estimar a biomassa florestal são IKONOS, Landsat e NOAA. IKONOS não é capaz de estimar com acurácia como o tamanho das copas das árvores se distribuem em florestas tropicais altas da Amazônia (Asner et al. 2002). No entanto, a densidade e o diâmetro das árvores com área basal mediana podem ser estimados pela textura do dossel medida através de análise de Fourier em duas dimensões a partir de imagens IKONOS (Couteron et al. 2005). Apesar disso, quando comparado às imagens de Landsat ETM+, as relações espectrais entre imagens IKONOS com a área basal e a densidade de galhos são mais fracas do que aquelas obtidas pelo sensor ETM+ nas bandas 5 ou 7 (infravermelho médio) (Thenkabail et al. 2003). Na verdade, índices de vegetação usando a banda TM5 aumentaram as correlações com os parâmetros da floresta tropical, tais como biomassa acima do solo e área basal, que representam a maturidade estrutural da floresta (Lu et al. 2004, Freitas et al. 2005). Mesmo a banda do infravermelho médio de imagens NOAA-AVHRR mostrou uma forte correlação com biomassa (Boyd et al. 1999). Em contraste, NDVI geralmente satura à medida que a biomassa aumenta, que é uma situação normal em florestas tropicais (Huete et al. 1997, Sader et al. 1989, Freitas et al. 2005). Exceto para mapear a densidade da cobertura da copa em áreas de terreno irregular, as imagens NDVI foram mais apropriadas do que o uso das bandas TM3, TM4 e TM5 (Apan 1997). O índice de vegetação realçado (EVI) é também mais sensível às variações do dossel do que o NDVI (Huete et al. 2002). Baseando-se nessas relações entre bandas espectrais e parâmetros florestais, é possível gerar mapas de área basal prevista, fornecendo uma visão detalhada da heterogeneidade estrutural da floresta (Ingram et al. 2005). Além disso, quantificar e monitorar a biomassa florestal objetiva compreender a relação entre biomassa, solo e clima, conectando a questões sobre mudanças climáticas (Malhi et al. 2002). Em relação a transferibilidade das relações entre características biofísicas e índices de vegetação para outros locais e épocas, Foody et al. (2003) destacaram certas limitações, tais como diferenças nas técnicas de processamento de imagens, dependência da estimativa da biomassa de equações alométricas específicas, diferenças nos critérios de inclusão usados para selecionar as árvores medidas e entre o trabalho de campo e a imagem quanto à estação do ano e ao ano.

Os radares SAR mostraram ser potenciais ferramentas para mapear a biomassa de florestas primárias e secundárias nos trópicos, especialmente imagens polarizadas (banda P)

(Hoekman & Quiñones 2000, Neeff et al. 2003, Santos et al. 2003). No entanto, a banda P satura em níveis muito altos de biomassa e parece cobrir bem a faixa de 10 a 200 ton/ha, que é de especial interesse para monitoramento de florestas secundárias em regeneração (Luckman et al. 1998, Hoekman & Quiñones 2000).

Um avanço promissor nas medições remotas do carbono da biomassa florestal é o LIDAR, que coleta dados altimétricos para o topo do dossel assim como para a topografia terrestre (Brown 2002). Drake et al. (2003) encontraram uma forte correlação entre as medidas lidar e a biomassa acima do solo em várias florestas tropicais, e acreditam que lidar é um aperfeiçoamento de muitas técnicas de sensoriamento remoto existentes que atualmente são incapazes de obter estimativas de biomassa confiáveis em florestas primárias e secundárias avançadas. Outro avanço promissor é a videografia digital acoplada com laser e GPS diferencial que captura faixas georreferenciadas de 200 m de largura com resolução de 50 cm usando câmera com ângulo aberto, ou faixas de 20 m de largura com resolução de 3 cm usando câmera com zoom (Brown 2002). Esta técnica pode reproduzir a área da copa das árvores, a altura das árvores (através do laser), a densidade da copa e o número de galhos por unidade de área; medidas altamente correlacionadas com a biomassa acima do solo de florestas tropicais (Brown 2002). Além disso, o lidar pode ser usado para monitorar a saúde da floresta, por exemplo, detectando a perda de folhas devido ao ataque severo de insetos; entretanto, experimento semelhante ainda não foi feito em florestas tropicais (Solberg et al. 2006).

3. Produtividade Primária

Produtividade Primária Líquida (PPL) é a energia acumulada em biomassa vegetal e é tipicamente expressa em termos de gramas de carbono fixado por metro quadrado por ano (Smith e Smith 2003). PPL pode ser medido através de técnicas de sensoriamento remoto nas escalas regional e global, relacionando índices de vegetação (NDVI e EVI) ao índice de área foliar que regula o número de processos ecofisiológicos, tais como evaporação, transpiração e fotossíntese (Matsushita e Tamura 2002, Aragão et al. 2005). Comparando NDVI com EVI, o NDVI satura assintoticamente em regiões com alta biomassa, tais como na Amazônia, enquanto que o EVI foi sensível às variações do dossel e identificou súbitas mudanças na dinâmica estacional da fenologia foliar na floresta (Huete et al. 2002, Xiao et al. 2005). A fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida é outra medida da PPL coletada pelos sensores remotos, tais como MODIS, NOAA, ou SPOT, que é usada em modelos que representam a transferência de energia, carbono, água e a biogeoquímica de ecossistemas terrestres (Senna et al. 2005). Estes estudos normalmente visam comparar a produtividade primária entre biomas e avaliar a estacionalidade (Kicklighter et al. 1999, Schloss et al. 1999). Atualmente, o sensor MODIS possui um produto PPL global que fornece novas formas para monitorar a biosfera terrestre (Turner et al. 2006).

4. Fenologia

Alguns estudos enfocam especificamente a fenologia, isto é, as mudanças estacionais na vida das plantas e as relações dessas mudanças com o clima (Smith & Smith 2003). Para estudar fenologia, os sensores remotos com alta resolução temporal são os mais adequados. Estes estudos usam sensores AVHRR, MODIS ou IRS-1C WiFS e índices de vegetação (NDVI, EVI), associando o clima com os parâmetros biofísicos (p.ex. índice de área foliar) (Roy e Joshi 2002, Xavier e Vettorazzi 2004, Shabanov et al. 2005, White et al. 2005, Huete et al. 2006). Usando um sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) no Brasil, Gurgel e Ferreira (2003) concluíram que dados de NDVI podem caracterizar os principais padrões de tipos de vegetação, e obtiveram alta correlação entre NDVI e radiação média mensal sugerindo que a

variabilidade anual da vegetação brasileira é principalmente modulada pelas condições climáticas dominantes. Outros estudos avaliaram as respostas da vegetação à precipitação e às anomalias de temperatura associadas às mudanças climáticas globais ou ao *El Niño*, usando as amplitudes de NDVI como um indicador de fenologia (Asner e Townsend 2000, Salinas-Zavala et al. 2002, Chen et al. 2004).

5. Diversidade Vegetal

Nagendra (2001) categorizou estudos sobre padrões de distribuição de espécies usando sensoriamento remoto em três tipos: 1) mapeamento direto de indivíduos vegetais ou associações mono-específicas em unidades relativamente grandes e espacialmente contínuas, usando dados de alta resolução espacial; 2) mapeamento de habitats usando dados de sensores remotos, e posterior previsão da distribuição das espécies baseada nas necessidades de habitat; e 3) investigações das relações diretas entre valores de radiância espectral registrada por sensores remotos com os padrões de distribuição das espécies registradas através de observações de campo. O mapeamento direto de espécies e comunidades normalmente usa sensores multiespectrais com resolução espacial muito alta (p.ex. IKONOS, QuickBird), que geram imagens nas quais é possível identificar a copa das árvores (Turner et al. 2003). No entanto, apesar da menor resolução espacial, sensores hiperespectrais (p.ex. Hyperion, AVIRIS) podem distinguir diferenças espectrais sutis entre as classes de cobertura da terra, e também podem discriminar comunidades vegetais. Além disso, um sensor com alta resolução temporal permite detectar mudanças fenológicas que podem identificar tipos de vegetação até o nível de espécie (Dymond et al. 2002, Thenkabail et al. 2003, Turner et al. 2003).

A diversidade de espécies tem sido detectada através do sensoriamento remoto de parâmetros ambientais, tais como: produtividade primária, clima e estrutura de habitat (Turner et al. 2003). Estimativas da produtividade primária através de técnicas de sensoriamento remoto são frequentemente derivadas dos índices de vegetação (p.ex. NDVI) ou medidas diretas (p.ex. produtividade primária) usando sensores de alta resolução temporal (p.ex. AVHRR/NOAA) que podem derivar proporções de fotossíntese por estação do ano (Turner et al. 2003). Parâmetros climáticos (p.ex. temperatura estacional, umidade relativa e do solo) podem limitar a distribuição de espécies e podem ser monitorados por sensores remotos (p.ex. MODIS/Terra, AVHRR/NOAA). Estrutura de habitat, biomassa e topografia podem ser medidas por sensores micro-ondas (p.ex. LIDAR e SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)) que detectam a altura do topo do dossel, a elevação do terreno, posições das folhas e galhos e a densidade da vegetação nos diferentes estratos, possibilitando, então, gerar perfis tri-dimensionais da estrutura da vegetação (Turner et al. 2003).

Nas florestas tropicais – áreas heterogêneas e ricas em espécies – o mapeamento direto de indivíduos e comunidades é limitado, podendo-se, na melhor das hipóteses, mapear pequenos números de espécies dominantes no dossel (Nagendra 2001). Mapas de habitat parecem capazes de fornecer informações sobre a distribuição de grandes números de espécies em uma ampla variedade de áreas, entretanto, a escala espacial é restrita (Nagendra 2001). A associação da distribuição de espécies com valores espectrais capaz de delinear a distribuição de grande número de espécies ainda não foi demonstrada (Nagendra 2001). Além disso, alguns estudos encontraram uma relação entre diversidade de espécies e dados de sensores remotos. Na floresta tropical mexicana, Hernandez-Stefanoni e Ponce-Hernandez (2004) mostraram uma relação positiva entre classes de floresta secundárias com a diversidade de espécies vegetais (árvores, arbustos e herbáceas), isto é, quanto mais avançado o estágio sucessional, maior o número de espécies e menor é a dominância de uma dada espécie. Foody e Cutler (2006) estimaram a biodiversidade nas florestas tropicais de Borneo através de dados de sensores remotos, com o auxílio de redes neurais. Eles encontraram uma alta relação entre riqueza de espécies arbóreas

e dados de sensores remotos, indicando que pode ser possível mapear a composição de espécies em florestas tropicais. Além disso, eles obtiveram uma fraca relação entre a riqueza de espécies arbóreas e o NDVI. Bawa et al. (2002) também encontraram uma fraca correlação positiva entre NDVI e diversidade de espécies arbóreas em florestas tropicais indianas devido a problemas de saturação (Huete et al. 1997). No entanto, Bawa e colaboradores (2002) obtiveram uma forte correlação positiva entre NDVI e diversidade para florestas decíduas. Uma investigação é necessária para avaliar a relação entre diversidade vegetal e outros índices de vegetação que apresentam menos problemas de saturação, tais como EVI e MVI5.

6. Considerações Finais

Algumas iniciativas aperfeiçoaram o diagnóstico de florestas tropicais, principalmente associando as características estruturais e funcionais da floresta com medidas de sensores remotos. Biomassa, produtividade, fenologia e diversidade são algumas das características estruturais e funcionais das florestas que podem ser relacionadas às medidas de sensores remotos. Biomassa foi quantificada melhor usando sistemas Landsat, SAR e LIDAR. Índices de vegetação são ferramentas úteis para medir a maturidade estrutural da floresta, especialmente aqueles baseados nas bandas do infravermelho médio, porque NDVI geralmente satura com o aumento da biomassa. Produtividade primária pode ser monitorada por sensores remotos nas escalas regional e global (p.ex. MODIS, AVHRR), relacionando índices de vegetação (NDVI, EVI) com índice de área foliar que regula diversos processos ecofisiológicos. Estudos sobre fenologia necessitam sensores com alta resolução temporal (p.ex. AVHRR, MODIS) e geralmente associam parâmetros biofísicos (p.ex. índice de área foliar) com clima, usando a amplitude do NDVI como indicador de fenologia. O mapeamento direto da diversidade vegetal necessita sensores multiespectrais com alta resolução espacial (p.ex. IKONOS, QuickBird) para identificar espécies e comunidades. No entanto, em áreas heterogêneas e ricas em espécies, tais como as florestas tropicais, identificar espécies é difícil podendo-se mapear apenas pequenos números de espécies dominantes no dossel. Neste caso, os estudos geralmente visam relacionar a diversidade de espécies, medida no campo, com os dados dos sensores remotos, através dos índices de vegetação.

Referências

- Achard, F.; Eva, H. D.; Stibig, H.-J.; Mayaux, P.; Gallego, J.; Richards, T.; Malingreau, J.-P. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. **Science**, v. 297, p. 999-1002, 2002.
- Apan, A. A. Land cover mapping for tropical forest rehabilitation planning using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 5, p. 1029-1049, 1997.
- Aragão, L. E. O. C.; Shimabukuro, Y. E.; Espírito-Santo, F. D. B.; Williams, M. Landscape pattern and spatial variability of leaf area index in Eastern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 211, p. 240-256, 2005.
- Armenteras, D.; Rudas, G.; Rodriguez, N.; Sua, S.; Romero, M. Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon. **Ecological Indicators**, v. 6, n. 2, p. 353-368, 2006.
- Asner, G. P.; Palace, M.; Keller, M.; Pereira Jr., R.; Silva, J. N. M.; Zweede, J. C. Estimating canopy structure in an Amazon Forest from laser range finder and IKONOS satellite observations. **Biotropica**, v. 34, n. 4, p. 483-492, 2002.
- Asner, G. P.; Townsend, A. R. Satellite observation of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 7, p. 981-984, 2000.
- Bawa, K.; Rose, J.; Ganeshaiah, K. N.; Barve, N.; Kiran, M. C.; Umashaanker, R. Assessing biodiversity from space: an example from the western Ghats, India. **Conservation Ecology**, v. 6, n. 2, p. 7, 2002.
- Boyd, D. S.; Foody, G. M.; Curran, P. J. The relationship between the biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelengths (3.0-5.0 μ m). **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 5, p. 1017-1023, 1999.

- Brown, S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. **Environmental Pollution**, v. 116, p. 363-372, 2002.
- Caviglia-Harris, J. L. Household production and forest clearing: the role of farming in the development of the Amazon. **Environment and Development Economics**, v. 9, p. 181-202, 2004.
- Chen, Z. M.; Babiker, I. S.; Chen, Z. X.; Komaki, K.; Mohamed, M. A. A.; Kato, K. Estimation of interannual variation in productivity of global vegetation using NDVI data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 16, p. 3139-3159, 2004.
- Couteron, P.; Pelissier, R.; Nicolini, E. A.; Paget, D. Predicting tropical forest stand structure parameters from Fourier transform of very high-resolution remotely sensed canopy images. **Journal of Applied Ecology**, v. 42, n. 6, p. 1121-1128, 2005.
- Davidson, E. A.; Artaxo, P. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. **Global Change Biology**, v. 10, p. 519-529, 2004.
- Drake, J. B.; Knox, R. G.; Dubayah, R. O.; Clark, D. B.; Condit, R.; Blair, J. B.; Hofton, M. Above-ground biomass estimation in closed canopy Neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships. **Global Ecology & Biogeography**, v. 12, p. 147-159, 2003.
- Dymond, C. C.; Mladenoff, D. J.; Radeloff, V. C. Phenological differences in Tasseled Cap indices improve deciduous forest classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 460-472, 2002.
- Fearnside, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 680-688, 2005.
- Ferraz, S. F. B.; Vettorazzi, C. A.; Theobald, D. M.; Ballester, M. V. R. Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: assessment and future scenarios. **Forest Ecology and Management**, v. 204, p. 67-83, 2005.
- Fisher, M. J.; Thomas, R. J. Implications of land use change to introduced pastures on carbon stocks in the central lowlands of tropical South America. **Environment, Development and Sustainability**, v. 6, p. 111-131, 2004.
- Foody, G. M. Remote sensing of tropical forest environments: towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 20, p. 4035-4046, 2003.
- Foody, G. M.; Cutler, M. E. J. Mapping the species richness and composition of tropical forests from remotely sensed data with neural networks. **Ecological Modelling**, v. 195, p. 37-42, 2006.
- Freitas, S. R.; Mello, M. C. S.; Cruz, C. B. M. Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic Rainforest. **Forest Ecology and Management**, v. 218, n. 1-3, p. 353-362, 2005.
- Freitas, S. R.; Cruz, C. B. M. Análise de Componentes Principais e Modelo Linear de Mistura na discriminação de classes de vegetação na Mata Atlântica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 1529-1536. CD-ROM, On-line.
- Gurgel, H. C.; Ferreira, N. J. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 18, p. 3595-3609, 2003.
- Hernandez-Stefanoni, J. L.; Ponce-Hernandez, R. Mapping the spatial distribution of plant diversity indices in a tropical forest using multi-spectral satellite image classification and field measurements. **Biodiversity and Conservation**, v. 13, n. 14, p. 2599-2621, 2004.
- Hoekman, D. H.; Quiñones, M. J. Land cover type and biomass classification using AirSAR data for evaluation of monitoring scenarios in the Colombian Amazon. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 2, p. 685-696, 2000.
- Howard, J. A. **Remote sensing of forest resources: theory and application**. London: Chapman & Hall, 1991. 419 p.
- Huete, A. R.; Didan, K.; Shimabukuro, Y. E.; Ratana, P.; Saleska, S. R.; Hutyrá, L. R.; Yang, W.; Nemani, R. R.; Myneni, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. L06405, p. 1-4, 2006.

- Huete, A. R.; Liu, H. Q.; Van Leeuwen, W. J. D. The use of vegetation indices in forested regions: Issues of linearity and saturation. In: Proceedings of IGARSS '97 - International Geoscience and Remote Sensing Seminar, 4, 1997, Noordwijk. **Anais...** Noordwijk: ESA Publications, 1997. p. 1966-1968.
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X.; Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.
- Kicklighter, D. W.; Bondeau, A.; Schloss, A. L.; Kaduk, J.; McGuire, A. D.; Intercomparison, T. P. O. T. P. N. M. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): global pattern and differentiation by major biomes. **Global Change Biology**, v. 5, n. Suppl. 1, p. 16-24, 1999.
- Lambin, E. F.; Geist, H. J.; Lepers, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annu. Rev. Environ. Resour.**, v. 28, p. 205-241, 2003.
- Laurance, W. F.; Albernaz, A. K. M.; Schroth, G.; Fearnside, P. M.; Bergen, S.; Venticinque, E. M.; Costa, C. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. **Journal of Biogeography**, v. 29, p. 737-748, 2002.
- Lu, D.; Mausel, P.; Brondizio, E.; Moran, E. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, v. 198, p. 149-167, 2004.
- Luckman, A.; Baker, J.; Honzák, M.; Lucas, R. Using JERS-1 SAR: Seasonal variation, confidence limits, and application to image mosaics. **Remote Sensing of Environment**, v. 63, p. 126-139, 1998.
- Malhi, Y.; Phillips, O. L.; Lloyd, J.; Baker, T.; Wright, J.; Almeida, S.; Arroyo, L.; Frederiksen, T.; Grace, J.; Higuchi, N.; Killeen, T.; Laurance, W. F.; Leão, C.; Lewis, S.; Meir, P.; Monteagudo, A.; Neill, D.; Núñez Vargas, P.; Panfil, S. N.; Patiño, S.; Pitman, N.; Quesada, C. A.; Ruelas-Ll., A.; Salomão, R.; Saleska, S.; Silva, N.; Silveira, M.; Sombroek, W. G.; Valencia, R.; Vásquez Martínez, R.; Vieira, I. C.; Vinceti, B. An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). **Journal of Vegetation Science**, v. 13, p. 439-450, 2002.
- Matsushita, B.; Tamura, M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 58-66, 2002.
- Mendoza, J. E.; Etter, A. Multitemporal analysis (1940-1996) of land cover changes in the southwestern Bogotá highplain (Colombia). **Landscape and Urban Planning**, v. 59, p. 147-158, 2002.
- Millington, A. C.; Velez-Liendo, X. M.; Bradley, A. V. Scale dependence in multitemporal mapping of forest fragmentation in Bolivia: implications for explaining temporal trends in landscape ecology and applications to biodiversity conservation. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 289-299, 2003.
- Millington, A. C.; Walsh, S. J.; Osborne, P. E. **GIS and remote sensing applications in biogeography and ecology**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. 333 p.
- Myers, N. Tropical deforestation and remote sensing. **Forest Ecology and Management**, v. 23, p. 215-225, 1988.
- Nagendra, H. Using remote sensing to assess biodiversity. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 2, p. 2377-2400, 2001.
- Neeff, T.; Dutra, L. V.; Santos, J. R.; Freitas, C. C.; Araujo, L. S. Tropical forest stand table modelling from SAR data. **Forest Ecology and Management**, v. 186, p. 159-170, 2003.
- Perz, S. G.; Aramburú, C.; Bremner, J. Population, land use and deforestation in the Pan Amazon basin: a comparison of Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú and Venezuela. **Environment, Development and Sustainability**, v. 7, p. 23-49, 2005.
- Pfaff, A. S. P.; Sanchez-Azofeifa, G. A. Deforestation pressure and biological reserve planning: a conceptual approach and an illustrative application for Costa Rica. **Resource and Energy Economics**, v. 26, p. 237-254, 2004.
- Roberts, D. A.; Keller, M.; Soares, J. V. Studies of land-cover, land-use, and biophysical properties of vegetation in the Large Scale Biosphere Atmosphere experiment in Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 377-388, 2003.
- Rosenqvist, Å.; Milne, A.; Lucas, R.; Imhoff, M.; Dobson, C. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environmental Science & Policy**, v. 6, p. 441-455, 2003.

- Roy, P. S.; Joshi, P. K. Forest cover assessment in north-east India - the potential of temporal wide swath satellite sensor data (IRS-1C WiFS). **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 22, p. 4881-4896, 2002.
- 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 Sensing of Environment**, v. 28, p. 143-156, 1989.
- Salinas-Zavala, C. A.; Douglas, A. V.; Diaz, H. F. Interannual variability of NDVI in northwest Mexico: Associated climatic mechanisms and ecological implications. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, p. 417-430, 2002.
- 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 aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 482-493, 2003.
- Schloss, A. L.; Kicklighter, D. W.; Kaduk, J.; Wittenberg, U.; Intercomparison, T. P. O. T. P. N. M. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): comparison of NPP to climate and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). **Global Change Biology**, v. 5, n. Suppl. 1, p. 25-34, 1999.
- Senna, M. C. A.; Costa, M. H.; Shimabukuro, Y. E. Fraction of photosynthetically active radiation absorbed by Amazon tropical forest: A comparison of field measurements, modeling, and remote sensing. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. G01008, p. 1-8, 2005.
- Shabanov, N. V.; Huang, D.; Yang, W.; Tan, B.; Knyazikhin, Y.; Myneni, R. B.; Ahl, D. E.; Gower, S. T.; Huete, A. R.; Aragão, L. E. O. C.; Shimabukuro, Y. E. Analysis and optimization of the MODIS leaf area index algorithm retrievals over broadleaf forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 8, p. 1855-1865, 2005.
- Smith, R. L.; Smith, T. M. **Elements of ecology**. San Francisco: Benjamin Cummings, 2003. 682 p.
- Solberg, S.; Næsset, E.; Hanssen, K. H.; Christiansen, E. Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, v. 102, p. 364-376, 2006.
- Thenkabail, P. S.; Hall, J.; Lin, T.; Ashton, M. S.; Harris, D.; Enclona, E. A. Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using IKONOS and Landsat-7 ETM+ images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 4, p. 255-270, 2003.
- Turner, D. P.; Ritts, W. D.; Cohen, W. B.; Gower, S. T.; Running, S. W.; Zhao, M.; Costa, M. H.; Kirschbaum, A. A.; Ham, J. M.; Saleska, S. R.; Ahl, D. E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 102, p. 282-292, 2006.
- Turner, W.; Spector, S.; Gardiner, N.; Fladeland, M.; Sterling, E.; Steininger, M. Remote sensing for biodiversity science and conservation. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 18, n. 6, p. 306-314, 2003.
- Walker, R. Theorizing land-cover and land-use change: the case of tropical deforestation. **International Regional Science Review**, v. 27, n. 3, p. 247-270, 2004.
- White, M. A.; Hoffman, F.; Hargrove, W. W.; Nemani, R. R. A global framework for monitoring phenological responses to climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. L04705, p. 1-4, 2005.
- Whitmore, T. C. **An introduction to tropical rain forests**. Oxford: Clarendon Press, 1990. 226 p.
- Wilkie, D. S.; Finn, J. T. **Remote sensing imagery for natural resources monitoring: a guide for first-time users**. New York: Columbia University Press, 1996. 295 p.
- Xavier, A. C.; Vettorazzi, C. A. Monitoring leaf area index at watershed level through NDVI from Landsat-7/ETM+ data. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 3, p. 243-252, 2004.
- Xiao, X.; Zhang, Q.; Saleska, S.; Hutyrá, L.; De Camargo, P.; Wofsy, S.; Frohking, S.; Boles, S.; Keller, M.; Moore III, B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, p. 105-122, 2005.