

## PREDIÇÃO DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS DE FLORESTAS TROPICAIS A PARTIR DAS TÉCNICAS DE TRANSFORMADA DE FOURIER E DELINEAÇÃO MANUAL DE COPAS APLICADAS EM IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

**Arimatéa de Carvalho Ximenes**

[arimatea@dpi.inpe.br](mailto:arimatea@dpi.inpe.br)

Mestre em Sensoriamento Remoto

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

**Silvana Amaral**

[silvana@dpi.inpe.br](mailto:silvana@dpi.inpe.br)

Pesquisadora titular III - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

### RESUMO

Problemas relacionados à dificuldade de acesso e limitações em termos de recursos humanos restringem o monitoramento constante e estudos nas florestas tropicais brasileiras. O Sensoriamento Remoto (S.R.) apresenta-se como alternativa para suprir esta necessidade, devido à relativa facilidade de estudos em larga escala e possibilidade de recobrimento periódico da superfície terrestre. Estas aplicações potenciais fazem dos produtos de S.R. uma ferramenta promissora para estudos relacionados com a conservação e estimativa da biomassa florestal. Métodos de extração de informação de parâmetros estruturais da floresta são investigados a partir de imagens de alta resolução. Este trabalho tem como objetivo apresentar algumas aplicações das imagens de alta resolução para os estudos das florestas tropicais, abordando basicamente duas técnicas de predição de parâmetros estruturais de floresta: delimitação manual de copa e a análise de textura baseada na Transformada de Fourier.

**Palavras-chave:** floresta tropical, imagens de alta resolução, estrutura florestal, conservação, processamento digital de imagens.

### PREDICTION THE PARAMETERS OF STRUCTURAL TROPICAL FOREST WITH THE FOURIER TRANSFORMED TECHNIQUES AND MANUAL DELINEATION CROWN APPLICATION IN HIGH-RESOLUTION IMAGERY

#### ABSTRACT

The difficulty of access and the human resources needed to cover all the Brazilian tropical forests limit its study and the frequent forest monitoring. **Alternatively**, Remote Sensing (R.S.) data can support studies over large areas, also providing frequent observation of the land surface. These potential applications indicate RS data as a potential tool for studies related to conservation and biomass estimates of natural tropical forest. Research initiatives over high-resolution imagery are trying to develop suitable methods to obtain forest structural parameters. This paper reviews the use of high-resolution imagery data over tropical forest, describing two techniques available to estimate forest structure parameter based on crown diameter and distribution: visual interpretation, and the digital image processing technique of Fourier transformation.

**Keywords:** tropical forest, high-resolution imagery, forest structure, Fourier Transformation, digital image processing.

### INTRODUÇÃO

A necessidade de prever e detectar mudanças no ambiente natural tem se tornado de interesse primário nas conferências internacionais sobre meio ambiente (KERR; OSTROVSKY, 2003). Há diferentes parâmetros estruturais que podem ser medidos de maneira quantitativa dentro do contexto florestal. Dentre os principais parâmetros estão: diâmetro na altura do peito (DAP), altura da árvore, diâmetro do tronco e área da copa. Estes parâmetros estruturais das

---

Recebido em 16/07/2009

Aprovado para publicação em 06/01/2010

---

espécies arbóreas da floresta tropical podem fornecer informações importantes sobre biomassa, ciclagem de carbono, equilíbrio de energia, processos hidrológicos e detecção de mudanças climáticas no ecossistema de floresta tropical.

Desta importância decorrem os estudos que investigam métodos para caracterizar estrutura e dinâmica das florestas (ASNER et al., 2002; READ et al., 2003; COUTERON et al., 2005). Problemas relacionados à dificuldade de acesso no campo e limitações em termos de recursos humanos restringem o monitoramento constante e estudos em larga escala das florestas tropicais. Assim, o Sensoriamento Remoto (S.R.) apresenta-se como alternativa para suprir estas restrições, uma vez que proporciona relativa facilidade de estudos em larga escala e o recobrimento periódico da superfície terrestre (NAGENDRA, 2001; FOODY; CUTLER, 2003).

Existem variados produtos de S.R. derivados de diferentes sistemas orbitais, que definem escalas e resoluções variadas. Na década de 90 avanços nas áreas da ciência e tecnologia permitiram o desenvolvimento de sensores orbitais de alta resolução espacial. Com o aparecimento dos sensores orbitais de alta resolução surgem métodos que permitem quantificar e aprimorar a compreensão dos estoques de carbono com base na predição de parâmetros estruturais da floresta tropical. Estas aplicações potenciais fazem dos produtos de S.R. uma ferramenta promissora para estudos ecológicos que visam a conservação da biodiversidade (NAGENDRA, 2001; FOODY; CUTLER, 2003; TURNER et al., 2003) e quantificação dos estoques de carbono (COUTERON et al., 2005).

Este trabalho tem como objetivo apresentar algumas aplicações recentes das imagens de alta resolução espacial para os estudos das florestas tropicais no que se refere a predição de parâmetros estruturais. Duas técnicas de predição de parâmetros estruturais de floresta a partir de dados de sensoriamento remoto de alta resolução são discutidas com mais detalhe: (1) delimitação de copas das árvores por meio de interpretação visual e (2) análise de textura baseada na transformada de Fourier.

Este artigo está estruturado em cinco tópicos. O primeiro expõe os sensores de alta resolução mais utilizados para os estudos das florestas tropicais. O segundo descreve brevemente as medidas tiradas de campo que são estimadas utilizando as imagens de alta resolução. O terceiro tópico investiga os métodos de predição de parâmetros estruturais de floresta que são divididos em dois métodos: delimitação visual de copa e análise de textura de dossel. O quinto tópico apresenta as considerações finais observando os problemas e possíveis soluções para o futuro em relação ao estudo das imagens de S.R. de alta resolução aplicado às florestas tropicais.

## **SENSORIAMENTO REMOTO NOS ESTUDOS DE FLORESTAIS TROPICAIS**

Tradicionalmente, estudos florestais em escala detalhada se restringiam ao uso de fotografias aéreas (COUTERON et al., 2005). Entretanto, levantamentos aerofotográficos são procedimentos custosos em termos de logística (READ et al., 2003) e resultam em coberturas parciais, o que é limitante ao se tratar de florestas tropicais (ASNER et al., 2002). Como vantagem do emprego de sensores orbitais de alta resolução, tem-se a possibilidade de cobertura sistemática da superfície terrestre, a revisita em intervalos regulares de tempo e a acurácia dos dados (NAGENDRA, 2001).

Recentemente, satélites com resoluções métricas e submétricas na banda pancromática tornaram-se comercialmente viáveis possibilitando estudos em escalas detalhadas (READ et al., 2003). Os principais produtos de S.R. de alta resolução utilizados nos estudos sobre as florestas tropicais são: imagens IKONOS-2, com resolução espacial de 1m e QUICKBIRD-2, com resolução espacial de 0,7m (CLARK et al., 2004; COUTERON et al., 2005).

Um aspecto problemático na aquisição destas imagens relaciona-se ao alto índice de cobertura de nuvens na região tropical, o que pode limitar o uso destas imagens (COUTERON et al., 2005). Apesar destas limitações, diferentes iniciativas científicas têm se concentrado em avaliar o potencial dos sensores de alta resolução como fonte de informação sobre florestas tropicais (ASNER et al., 2002; READ et al., 2003; CLARK et al., 2004; COUTERON et al., 2005; PALACE et al., 2008).

O satélite *CBERS-2B* (China-Brazil Earth Resources Satellite) lançado em 2007 possui em sua carga útil a câmera pancromática de alta resolução chamada High Resolution Camera (*HRC*) com 2,7m de resolução espacial ([http://www.cbears.inpe.br/pt/programas/cbers1-2\\_cameras.htm](http://www.cbears.inpe.br/pt/programas/cbers1-2_cameras.htm)). As potencialidades do *HRC* do *CBERS-2B* ainda não foram testadas para os estudos de parâmetros estruturais de florestas tropicais. Com a política de dados livres do programa *CBERS* o avanço das técnicas de processamento digital de imagens de alta resolução pode avançar o conhecimento científico e metodológico dos parâmetros estruturais das florestas devido ao grande número de imagens de livre acesso.

## **MEDIDAS DE CAMPO PARA ESTIMAR A ESTRUTURA FLORESTAL**

A escassez de informação sobre as características da cobertura florestal ou medidas de dossel é resultado da dificuldade das medições de campo. Tradicionalmente, os métodos empregados contêm erros intrínsecos ao processo de medição. A visualização da copa em florestas não é trivial, e os equipamentos existentes ainda não permitem acurácia na medição de altura, diâmetro da copa, entre outros parâmetros estruturais da floresta (ASNER et al., 2002).

A tecnologia de laser, como o *Laser range finder* (ASNER et al., 2002) oferece um método alternativo para medir altura da árvore e diâmetro de copa. Com a melhor acurácia nos dados de campo é possível estabelecer comparações mais precisas entre os resultados obtidos por imagens de satélite e medidas de campo. Além da dificuldade de dados de campo, os estudos realizados em larga escala são mal distribuídos (ao longo de rios e estradas) e geralmente só possuem medidas de *DAP* (MALHI et al., 2006).

## **MÉTODOS BASEADOS EM S.R. PARA PREDIÇÃO DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS DE FLORESTA**

Dados provenientes dos sensores remotos de alta resolução espacial permitem distinguir árvores individuais (Figura 1). Um relevante potencial de aplicação de imagens de alta resolução nos estudos florestais está na possibilidade preditiva da biomassa acima do solo, relacionando as dimensões das copas com os parâmetros estruturais das árvores. Asner et al. (2002) utilizaram uma imagem pancromática do satélite IKONOS e individualizaram manualmente cada copa de árvore definindo área e diâmetro de copa.

Estes dados foram correlacionados com os dados mensurados no campo, para avaliar a imagem IKONOS, que superestimou as medidas de campo e não apresentou resultados significativos. Os autores atribuíram o resultado à dificuldade na individualização de copas, provavelmente muitas copas pequenas e grupos nebulosos de pequenas copas foram delimitados como uma copa única.

Read et al. (2003) utilizaram técnica semelhante nas imagens IKONOS e QUICKBIRD e obtiveram correlação significativa entre o diâmetro do tronco e as dimensões da copa. Os autores advertem que o local de estudo está inserido numa região de atuação madeireira, onde as associações entre floresta fechada e clareiras facilitam a visualização na imagem. Outro estudo utilizando a imagem QUICKBIRD para quantificar a taxa de mortalidade de árvores na floresta tropical apresentou correlações significativas entre a área das copas e os diâmetros dos troncos (CLARK et al., 2004).

Mesmo as árvores individuais que são claramente distinguíveis em imagens de alta resolução (Figura 1), podem apresentar dificuldades na localização correspondente no campo, devido às limitações do GPS (Global Position System), exceto as áreas em que o contexto espacial seja aberto (READ et al., 2003).



**FIGURA 1** - Reserva Ducke, Manaus, Amazonas, Brasil. Árvores emergentes isoladas (E). Existem também áreas onde os limites individuais da copa não são distinguíveis (M)  
**FONTE:** Google Earth

Devido à imprecisão dos métodos de delimitação manual de copas, métodos automatizados a partir do processamento digital de imagem buscam consolidação e precisão para medidas de dossel.

A análise de textura utilizando a transformada de Fourier para caracterizar rugosidade de dossel tem mostrado resultados significativos para predição de parâmetros estruturais de floresta (COUTERON et al., 2005). A função da transformada de Fourier é converter uma banda da imagem representada no domínio espacial para a representação equivalente no domínio da frequência e vice-versa (MATHER, 1993). O espectro de amplitude de uma matriz bi-dimensional decomposto a partir da imagem contém informações sobre o comprimento de onda, amplitude e ângulo de fase das formas de ondas senoidais. A aplicação mais comum da transformada de Fourier no sensoriamento remoto está na filtragem do domínio da frequência, como utilizado no trabalho de Sommerfeld et al. (2000).

A transformada de Fourier funciona basicamente da seguinte forma: primeiro a amplitude do espectro de Fourier fornece a informação da importância relativa de diferentes frequências da imagem variância. Pode-se comparar várias imagens a partir do método de ordenação multivariada PCA (Principal Component Analysis) que permite identificar os principais gradientes de variabilidade entre as imagens. Em geral este passo resulta em um ou dois índices (PCA1 e PCA2) que possuem informações importantes sobre a rugosidade do dossel (tamanho médio das copas) como também o grau de dominância de uma ou várias escalas (uniformidade ou homogeneidade). Este método da transformada de Fourier baseia-se nas características da amplitude do espectro de seus vizinhos (MATHER, 1993), que pode ser aproveitada para mensurar a textura da imagem (COUTERON et al., 2005; PALACE et al., 2008).

Para uma floresta tropical pode-se assumir a premissa que existe uma relação entre heterogeneidade de dossel e sua complexidade estrutural. Outras inferências a partir desta relação podem ser corroboradas. O aumento da heterogeneidade de dossel, por exemplo, acarreta o aumento na rugosidade de uma imagem de alta resolução. Com base nestas relações, Couteron et al. (2005) desenvolveram métodos preditivos de parâmetros estruturais de floresta, utilizando a técnica da transformada de Fourier. Um experimento realizado na floresta tropical da Guiana Francesa, utilizando esta metodologia, obteve correlações significativas (em alguns casos chega a ser superior a  $0.8 R^2$ ) entre o índice de textura de dossel da imagem IKONOS, e os parâmetros de diâmetro médio das árvores, rugosidade de dossel, densidade de árvores por hectare, altura média de dossel e estrutura dendrométrica.

Esta técnica considerou a textura de dossel de toda a imagem e apresentou bons resultados sobre os parâmetros estruturais em questão, exceto a área basal. Uma das vantagens desta

técnica em relação às outras abordadas está na rapidez de coleta de dados em larga escala, sendo adequada para mensurar atributos de uma vegetação e inventário florestal (COUTERON et al., 2005).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à rapidez com que as florestas tropicais têm sido alteradas, faz-se necessário, métodos eficazes a fim de modelar, prever e detectar mudanças no ambiente natural. O mecanismo de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação (*REDD*), ainda precisa definir a sua metodologia, para tanto, é importante o desenvolvimento da base científica que apóie políticas nacionais e internacionais de redução de emissões por desmatamentos e degradação florestal. Entre as principais dúvidas metodológicas estão como medir as emissões e como mensurar a degradação. Parte do trabalho já vem sendo elaborada com o monitoramento de mudanças da cobertura de vegetação (corte raso, extração seletiva, etc) realizada pelo Programa Amazônia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2008).

Os métodos de métrica de copa e textura de dossel discutidos neste trabalho podem motivar a elaboração de metodologias e a quantificação de carbono estocado nas florestas. Para tanto, diferentes iniciativas científicas têm se concentrado em avaliar o potencial dos sensores de alta resolução como fonte de informação sobre florestas tropicais.

Métodos mais robustos como proposto por Couteron et al. (2005) apresentaram informações complementares a respeito da rugosidade do dossel florestal com resultados bastante significativos ao estimar métricas para toda a cena da imagem estudada.

Nas florestas tropicais os estudos estão apenas começando e há necessidade de mais estudos que possam aprimorar as técnicas de processamento digital de imagens de alta resolução e também as técnicas de campo. As principais limitações para o estudo das florestas tropicais brasileiras encontram-se na dificuldade de acesso terrestre, disponibilidade de imagens de alta resolução sem a cobertura de nuvens, complexidade e densidade do dossel florestal.

Os centros de pesquisas no Brasil também encontram dificuldades no acesso aos dados dos sensores de alta resolução devido ao alto custo das imagens. O uso de dados livres como o sensor *HRC* do *CBERS-2B* pode popularizar os métodos de predição de parâmetros estruturais da floresta tropical e assim realizar estimativas mais precisas do estoque de carbono desse ecossistema ainda pouco estudado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Phd. Nicolas Barbier da Université Libre de Bruxelles vinculado ao Service de Botanique Systématique et Phytosociologie que revisou o artigo e contribuiu com sugestões e críticas ao trabalho. O primeiro autor agradece também a bolsa de Desenvolvimento Tecnológico Industrial (DTI) do CNPq.

## REFERÊNCIAS

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.

CLARK, D. B.; CASTRO, C. S.; ALVARADO, L. D. A.; READ, J. M. Quantifying mortality of tropical rain forest trees using high-spatial-resolution satellite data. **Ecology Letters**, v. 7, p. 52-59, 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.

---

FOODY, M. G.; CUTLER, M. E. J. Tree biodiversity in protected and logged Bornean tropical rain forests and its measurement by satellite remote sensing. **Journal of Biogeography**, v. 30, p. 1053-1066, 2003.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Coordenação-Geral de Observação da Terra (INPE/OBT). **Projeto PRODES** – Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. São José dos Campos, 2008. Disponível em: <www.obt.inpe.br/prodes>. Acesso em maio de 2009.

KERR, J. T.; OSTROVSKY, M. From space to species: ecological applications for remote sensing. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 18, n. 6, p. 299-305, 2003.

MALHI, Y.; WOOD, D.; BAKER, T. R.; WRIGHT, J.; et al. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 12, n. 7, p. 1107-1138, 2006.

MATHER, P. M. Image transforms. In:\_\_\_\_\_. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. Chichester: John Wiley & Sons, 1993. p, 179-241.

NAGENDRA, H. Using remote sensing to assess biodiversity. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 12, p. 2377-2400, 2001.

PALACE, M.; KELLER, M.; ASNER, G. P.; HAGEN, S.; BRASWELL, B. Amazon forest structure from IKONOS satellite data and the automated characterization of forest canopy properties. **Biotropica**, v. 40, n. 2, p. 141-150, 2008.

READ, J. M.; CLARK, D. B.; VENTICINQUE, E. M.; MOREIRA, M. P. Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. **Journal of Applied Ecology**, v. 40, p. 592-600, 2003.

SOMMERFELD, R. A.; LUNDQUIST, J. E.; SMITH, J. Characterizing the canopy gap structure of a disturbed forest using the Fourier transform. **Forest Ecology and Management**, v. 128, n. 1, p. 101-108, 2000.

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.