

INTERFEROMETRIA SAR (BANDAS X E P) NA ESTIMATIVA DE BIOMASSA FLORESTAL

João Roberto dos Santos¹
Till Neeff²
Luciana Spinelli de Araujo³
Fábio Furlan Gama¹
Luciano Vieira Dutra¹
Manoel de Araujo Sousa Júnior¹

¹ INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - jroberto@ltid.inpe.br

² University of Freiburg - Germany - tillneeff@fulbrightweb.org

³ ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Pós-Graduação em Ecologia de AgroEcossistemas - lsaraujo@esalq.usp.br

RESUMO

A técnica de interferometria derivada de dados na faixa de microondas permite obter informações adicionais sobre a estrutura tri-dimensional dos alvos na imagem e vem sendo empregada em mapeamento de larga escala e monitoramento florestal. Uma missão científica aerotransportada foi executada na região da Floresta Nacional do Tapajós (PA), provendo dados SAR (radar de abertura sintética) em bandas X e P. No procedimento metodológico, uma vez realizadas as correções geométrica e radiométrica das imagens SAR, valores de retroespalhamento em determinada polarização foram extraídos e combinados com um modelo de altura interferométrica para estabelecer a relação estatística com a biomassa florestal. O pulso-radar em frequência da banda P penetra na estrutura da floresta, atingindo a superfície do solo, podendo ser utilizado para a geração de um Modelo Digital de Elevação (DEM) por interferometria. O pulso-radar em banda X, por sua vez, é rebatido pelo dossel, refletindo o topo da floresta o que permite gerar um Modelo Digital de Superfície (DSM). A diferença entre os dois modelos representa a altura da cobertura vegetal, cuja imagem resultante é aplicada para gerar um mapeamento temático com a espacialização das variações de biomassa. Um melhor modelo de biomassa foi definido [$\text{biomass} = 44.965 + 13.887 \times h_{int} + 10.556 \times \sigma_{HH}^0$], buscando estabelecer uma predição desejável, tendo como suporte informações inventariadas em campo e o emprego de equações alométricas específicas. Os dados SAR foram tratados por técnica de segmentação de imagens, baseada em algoritmo de crescimento de regiões por critério hierárquico, para dar suporte a aplicação desse modelo de biomassa, pois o delineamento de cada polígono foi considerado como unidade de paisagem homogênea com características biofísicas próprias, permitindo assim, um mapeamento das variações de biomassa encontradas na área investigada.

Palavras-chave: Interferometria, Biomassa, SAR, Floresta Tropical, Inventário, Modelagem.

SAR INTERFEROMETRY (X AND P BAND) FOR THE ESTIMATION OF FOREST BIOMASS

ABSTRACT

The interferometric technique using microwave data contains additional information on the three-dimensional structure of the scattering targets of the area under study. It has been applied for large-scale mapping and forest monitoring. An experiment was performed in the Tapajós National Forest region to provide airborne SAR (Synthetic Aperture Radar) data at X- and P- bands over tropical rain forest. In the methodology used, the radar backscatter results are combined with an the interferometric height model to establish a statistical relationship to the forest aboveground biomass. The P-band radar signal penetrates in the forest structure, until the ground surface, and it be used for interferometric generation of a Digital Elevation Model (DEM). The X-band is reflected by dossel, and so the forest canopy is related to a Digital Surface Model (DSM). The difference between both models represents the height of vegetation. Subsequently, this model is applied to

generate a thematic land cover map which expresses the range of the forest biomass. A best biomass model [biomass = 44,965 + 13,887 × h_{int} + 10,556 × σ^o_{HH}] was established after comprehensive testing of a range of specific allometric equations to achieve statistically high precision in biomass prediction. A segmentation algorithm (based on hierarchical region growth) was applied to the SAR dataset (derived from P_{HH} band and interferometric images) to provide average values to use this biomass model to homogeneous landscape units with similar biophysical characteristics.

Keywords: Interferometry, Biomass, SAR, Tropical Forest, Inventory, Modelling.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia que emprega produtos de sensores remotos tem direcionado esforços para geração e tratamento de dados orbitais de alta resolução, hiperespectral e de radar. Esse último tipo, adquirido na faixa de microondas, através de plataformas que utilizam sistemas SAR estão disponíveis, para suprir e complementar informações em diferentes níveis àquelas obtidas por sensores ópticos, sobretudo em programas de monitoramento de uso e cobertura da terra da região amazônica. Porém, apesar de certas possibilidades de utilização de imagens-radar (como aquisição de informações da superfície terrestre em áreas sob condições de cobertura de nuvens) na estratificação temática, certos estudos específicos, tais como na estimativa de parâmetros biofísicos da cobertura florestal têm encontrado limitações de desempenho, por razões inerentes às características do sistema e da frequência utilizada (Wegmüller and Werner, 1997). Dentro desse contexto de tecnicamente explorar essa informação na faixa de microondas, um experimento foi conduzido na região do Tapajós (Estado do Pará), para prover dados interferométricos de SAR aerotransportado, em bandas X e P, sobre a floresta tropical primária e áreas de sucessão secundária. Por conseguinte, o objetivo desse trabalho é apresentar uma análise e mapeamento das variações da biomassa florestal nessa área investigada, fazendo uso dos dados interferométricos SAR nas duas frequências citadas. Essa abordagem interferométrica vem demonstrado potencialidades para um maior conhecimento estrutural da floresta e da estimativa de suas variáveis biofísicas, em ambientes diversos do tropical, conforme mencionam Cloude et al., (2000); Treuhaft e Siqueira (2000); Balzter, (2001).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.

Variados tipos de interação do sinal-radar podem ocorrer com as partes constituintes da estrutura florestal (Dallemand et al., 1993). Dependendo da banda que opera o sensor radar, há sensibilidade para parâmetros como rugosidade do dossel, umidade da vegetação, estrutura, orientação e intensidade de troncos e galhos. No meio florestal, o retroespalhamento da energia pode ocorrer devido ao retorno do sinal no topo do dossel, múltiplo e volumétrico no interior do dossel, direto do solo, na interação por troncos e galhos e devido a ocorrências de sombras das árvores (Dallemand et al., 1993).

A partir dessa conceituação sintetizada, pode-se comentar que a técnica de interferometria com radar está baseada na interação de ecos recebidos pelo sensor por duas antenas ou mais, separadas no espaço por uma distância pré-estabelecida denominada *baseline* (linha de base) e por conseguinte, de posições conhecidas. Essa *baseline* pode ser obtida por meio de duas passagens do sensor ou por única passagem com as antenas instaladas na mesma plataforma de missão aerotransportada ou em nível orbital (Bamler, 2004) As imagens assim geradas, são formadas por diferenças de fases entre os pixels correspondentes constituintes dessas imagens no modo complexo, representando os ecos recebidos por cada uma das antenas do sistema sensor (Bamler e Hartl, 1998). Para a interferometria, um maior afastamento entre antenas resulta em melhoria na resolução do modelo digital do terreno (MNT), mas não pode ser excessivo esse valor, o que ocasionaria uma desconexão entre imagens, o que afetaria a qualidade do MNT ou mesmo a sua geração. Dependendo da frequência do radar imageador pode-se, para os casos de áreas florestais, ter variações nos valores tanto de retroespalhamento, como na interferometria e mesmo, na coerência interferométrica [que segundo Balzter (2001), corresponde ao grau de correlação complexa entre pixels das imagens, cujo módulo é designado na literatura pelo índice γ]. A interferometria para comprimentos de onda mais longos, bandas L ou P, por exemplo, tendem a apresentar valores de coerência mais estáveis.

Estudos ligados a interferometria SAR estão sendo mais amplamente tratados pela comunidade científica, podendo-se citar dentre outros, Bourgeaud e Wegmüller (1996), Wegmüller e Werner (1997), Madsen e Zebker (1998), Koskinen et al.(2001), Van Zyl e Kim (2003), Cloude et al (2004), além daqueles citados anteriormente. Em florestas tropicais, especialmente na região do Tapajós, o modelamento de dados SAR teve como primeiras publicações demonstrando o conhecimento estrutural das áreas de florestas primária e secundária e, inclusive de biomassa, os trabalhos de Mura et al (2001), Santos et al (2003) e Neeff et al (2003). Em resumo, a interferometria SAR permite obter o modelo digital que, dependendo da frequência empregada pode ter maior ou menor penetração na estrutura do alvo florestal, obtendo-se por conseguinte, modelos numéricos do terreno para diferentes camadas da vegetação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área investigada está localizada na região do baixo Rio Tapajós (Estado do Pará), entre as coordenadas W 54° 53' to 55° 06' and S 3° 03' to 3° 12' , próximo a Vila de São Jorge, ao longo da estrada BR – 167 que liga Cuiabá - Santarém. A precipitação anual varia de 1.750 a 2.000mm de chuva. O latossolo amarelo distrófico (oxisol) predomina na área em duas classes texturais: argiloso e médio argiloso. São normalmente solos profundos, em relevo ondulado, cobertos por floresta densa de terras baixas e submontana. A ocupação da área está relacionada com a agricultura de subsistência (arroz, mandioca, milho, feijão e pimenta) e extensas áreas de pastagem.

3.2. DADOS DE RADAR E PARÂMETROS BIOFÍSICOS INVENTARIADOS

As imagens do SAR aerotransportado foram obtidas por um sistema desenvolvido pela AeroSensing RadarSysteme GmbH (Alemanha), que adquire dados interferométricos em bandas X e P (polarimétrico). Esse sistema radar proporciona dados em banda P ($\lambda = 72$ cm) com frequência de 415 MHz, largura de banda de 70 MHz, ângulo de depressão de 45°, resolução no terreno de 1,5 m and azimutal of 0,7 m para imagens de 1 *look slant range*. Os dados em banda X foram adquiridos na polarização HH, frequência de 9,6 GHz , com largura de banda de 400MHz e com pixel de 0,5 m de resolução espacial no terreno. Os vários *tracks* do radar que compõem a área total imageada foram radiométricamente corrigidos de acordo com o padrão de antena, usando uma função baseada em áreas homogêneas; posteriormente, foi realizada a correção polarimétrica para cada polarização (modo *slant range*), baseada em 8 refletores de canto (*corner reflectors*), distribuídos na fase de campo em pontos estratégicos das linhas de voo e devidamente posicionados com GPS diferencial. Nesse estudo, somente imagens na polarização HH foram trabalhadas, por constar nas bandas X e P.

Conforme anteriormente mencionado, no desenvolvimento teórico consta que os comprimentos de onda mais longos (banda P) atravessam a estrutura florestal, atingindo o solo, podendo ser utilizados para gerar um Modelo Digital de Elevação (DEM). Os comprimentos de onda mais curtos (banda X) são refletidos pelo dossel e podem ser utilizados para gerar um Modelo Digital de Superfície (DSM). Nessa abordagem metodológica esses modelos foram feitos e calibrados, tendo uma resolução espacial de 2,5m para facilitar o entendimento temático, em base de uma condição cartográfica aceitável. A diferença entre ambos os modelos, DEM e DSM, foi considerado para representar a altura da cobertura vegetal em estudo, originando assim, o modelo de altura interferométrica (HIM). A imagem assim gerada foi segmentada, utilizando para tal um algoritmo incremental multi-nível (conceitualmente definido como hierárquico, baseado em crescimento de regiões), ainda em desenvolvimento. Essa abordagem de segmentação tem início, segundo Sousa Jr. et al. (2003), com a degradação da imagem em níveis de estrutura piramidal, procedimento esse definido como compressão (diminuição da resolução espacial), no qual cada nível é representado por uma imagem de médias. Nessa, cada pixel é formado pela média de quatro pixels da imagem do nível hierárquico abaixo. Posteriormente, ocorre a segmentação propriamente dita daquela imagem representada no nível hierarquicamente mais elevado (N), ou de máxima compressão, obedecendo sempre a um critério de agrupamento por regiões, definindo-se essa relação com a vizinhança através do teste t-Student, para o qual é estabelecido um valor de probabilidade de aceitação (Cook et al., 1994). Em etapas subsequentes, essa rotina de processo continua, descomprimindo a imagem a cada nível e fazendo o teste para re-segmentar regiões heterogêneas e posteriormente agrupar regiões homogêneas. Essa inovação na forma de segmentar imagens permite ao usuário trabalhar com segmentações intermediárias, enquanto o processo de estratificar e delinear regiões está em andamento em outros níveis hierárquicos (Sousa Jr. et al., 2003).

Testes de bordas, seguido de testes de homogeneidade por e entre regiões foram conduzidos no decorrer da análise, para corrigir tanto exclusões ou inclusões de *pixels* numa região. De uma maneira generalizada nesse trabalho, seis níveis hierárquicos foram considerados. Nessa condição de hierarquia, onde se tem uma compressão superior a três níveis, é válida a suposição de distribuição gaussiana para regiões homogêneas em dados SAR, o que permitiu realizar esse teste t-Student para agrupar regiões, uma vez definido uma probabilidade de aceitação para agrupar regiões e um limiar para agrupar *pixels*. Ao final dos resultados da segmentação, polígonos abaixo de 2.500 m² foram desconsiderados para prover um grau de estratificação adequado e que refletisse unidades mínimas de paisagem no sítio investigado, permitindo entender certas variações temáticas e de distribuição espacial em área. Após todo esse procedimento de segmentação dos dados SAR, o valor de altura interferométrica em cada polígono, correspondente ao posicionamento na imagem de cada amostra georeferenciada e inventariada em campo, foi extraído. Utilizando essa maneira, valores de altura interferométrica de florestas primárias e de sucessão secundária foram obtidos, que integrados àqueles valores de *backscatter* P_{HH}, puderam compor o modelo de biomassa, baseado numa equação ajustada e na seqüência, permitindo a geração do mapeamento temático com os indicativos das variações de biomassa encontrados na área.

Durante a fase de campo, além de pontos observacionais para reconhecimento dos temas, aspectos biométricos em áreas de floresta primária e secundária, como medidas de diâmetro (DAP ≥ 5cm), altura total das árvores, incluindo a identificação botânica, foram coletados em vários *plots*, cujas dimensões por área inventariada foram de 2.500 e 1.000 m² respectivamente (Santos et al., 2003). A organização e análise dos dados inventariados permitiram o conhecimento das características estruturais da cobertura florestal que estava sendo investigada com os dados SAR, traduzida pelos intervalos de classe diamétrica, área basal, altura média e também altura do estrato predominante, além da biomassa, cuja estimativa foi obtida a partir de equações alométricas de Nelson et al. (1999) and Chambers et al. (2001), respectivamente para os dados de floresta primária e de sucessão secundária.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ALTURA INTERFEROMÉTRICA VERSUS DADOS DE CAMPO

A altura interferométrica (h_{int}) aqui tratada é uma medida na imagem SAR que reflete o comportamento em altura do conjunto de árvores contidas no estrato superior da floresta primária, designada no texto por h_{dom} . Aliás, nesse caso, foram considerados para cálculos os valores em altura das 200 árvores de fuste mais elevado por hectare, conforme tratado em Neeff et al.(2004). No caso das sucessões secundárias, a altura interferométrica corresponde as medidas de altura média (conjunto designado por $h_{sub-emergente}$) de todos os indivíduos com DAP ≥ 5cm, exceto de algumas poucas árvores de elevado porte remanescentes da floresta primária, encontradas ainda em alguns sítios. Para permitir uma melhor visualização da estrutura vertical das classes de vegetação primária e secundária em investigação, é mostrada na Figura 1 a freqüência de árvores por intervalos de altura, permitindo dessa forma entender a forma de escolha de quais componentes em altura deviam constar no procedimento interferométrico.

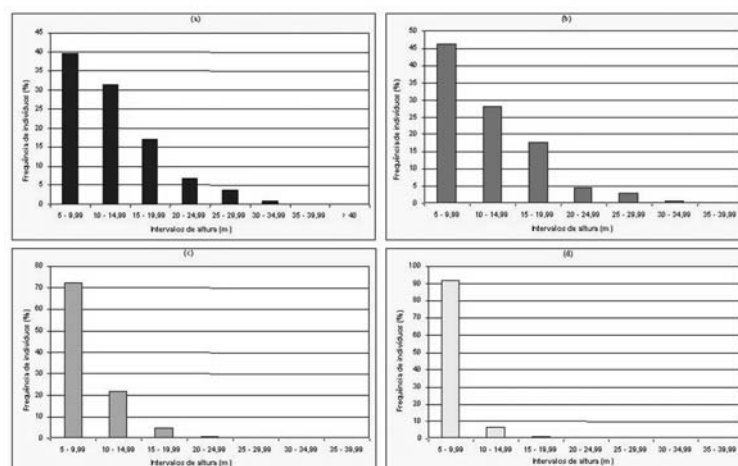


Figura 1. Distribuição em altura das árvores constituintes de floresta primária (a), sucessão secundária avançada (b), sucessão intermediária (c) e sucessão inicial (d).

Uma função linear foi ajustada para combinar as variáveis h_{dom} e $h_{sub-emergente}$ da cobertura vegetal, oriundas das mensurações no decorrer do inventário florestal, com a altura interferométrica correspondente (h_{int}), derivada dos dados de sensoriamento remoto (Figura 2). Considerando haver uma adequada relação entre essas variáveis, onde se obtém um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,87 na regressão, fica mais evidente que essa altura interferométrica nos dados SAR é uma medida válida da altura do povoamento florestal estudado.

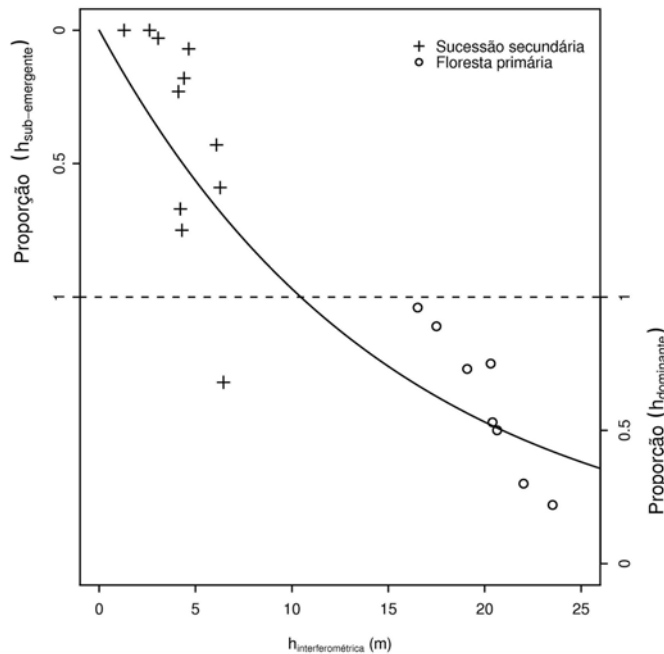


Figura 2. Relação da altura obtida em inventário florestal versus altura interferométrica derivada de imagens SAR (bandas X e P).
Fonte: Neeff et al.(2004).

Apenas como discussão complementar dessa análise de relação acerca da altura interferométrica SAR e o conjunto de árvores cuja medida de altura pode influenciar os sinais-radar e conseqüentemente, a ser empregado na relação, pode-se mencionar que as proporções desse conjunto variam de acordo com as condições da floresta. O aparente gradiente nas características fisionômico-estruturais entre a floresta primária e a sucessão secundária avançada e essa por sua vez, com as sucessões intermediária e inicial, permitem estabelecer um ajuste da variável “proporção do número de árvores” (num determinado patamar de altura que expressa determinado estrato ou o conjunto deles) oriunda dos dados de campo e do SAR, através de uma função contínua. Uma função exponencial foi assim ajustada, para expressar a qualidade dessa relação entre o conjunto de árvores dominantes ou sub-emergentes (altura média) em proporção, respectivamente para as classes de floresta primária e sucessão secundária, àquele conjunto de dados interferométricos (Figura 3) extraídos de setores na imagem-radar correspondentes aos *plots* inventariados em campo. Partindo da origem, no ponto de intersecção de valores nulos para ambas as variáveis, essa curva de ajustamento assume uma característica assintótica a medida que há um aumento nos valores de altura interferométrica SAR, na direção dos estádios sucessionais para a floresta primária. Para melhor ilustração dessa Figura 3 cita-se que: no caso da floresta primária, se a altura interferométrica calculada nas imagens SAR for de aproximadamente 16 - 17 metros, a proporção do número de árvores que necessitamos ter é 90% de indivíduos do estrato dominante, na base de cálculo nessa relação de modelagem do campo versus SAR, para se ter uma representação adequada; a medida que essa altura interferométrica atinja a faixa de 22 - 23 metros, é suficiente ter somente cerca de 40% das medidas de altura das árvores do estrato dominante. No caso da vegetação secundária, para uma altura interferométrica de 7 – 8 metros, a proporção de árvores do estrato considerado como sub-emergente está em torno de 75% para essa base de dados que trata da variável altura, em acordo com a configuração da curva traçada.

4.2. INTERFEROMETRIA SAR E BIOMASSA

O estoque de biomassa aérea de florestas primária e secundária (região do Tapajós) foi relacionada de forma logarítmica com dados somente de *backscattering* da banda P em polarização HH (σ_{HH}^0), mostrando conforme Santos et al. (2003), um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,66. Utilizando a mesma base de dados, mas uma função do tipo polinomial, esses mesmos autores reportaram um melhor ajuste de dados nessa polarização HH, comparativamente as polarizações HV e sobretudo VV. Tais valores de R^2 encontrados mostram, a nosso ver, um ajuste com desempenho ainda não satisfatório na estimativa de biomassa, o que demonstrou a necessidade da inserção da variável “altura interferométrica” na modelagem. Feito isso, numa relação linearizada simples entre biomassa e altura interferométrica (h_{int}), o coeficiente de determinação atingiu 0,77 de valor tratando dados de floresta primária e sucessão secundária, cujo ajuste foi acrescido, segundo Neeff et al (2004), para 0,89 com a inserção simultânea da variável *backscatter* (σ_{HH}^0) na modelagem. Nesse último caso, o valor do intercepto da linha de regressão não é significativamente diferente de zero ao nível de $\alpha = 0,1$ podendo-se então, admitir que a linha dessa regressão passa pela origem. O modelo de biomassa foi estabelecido para todas as faciações estudadas na área, desde a sucessão secundária (capoeira) de estágio inicial com biomassa de 5 ton/ha, até a floresta primária com níveis de 350 ton/ha, cuja equação está descrita como:

$$\text{biomass} = 44.965 + 13.887 \times h_{int} + 10.556 \times \sigma_{HH}^0 \quad (1)$$

O modelo desta equação (1) é linear e por conseguinte, não afetado pela saturação do *backscatter* com os níveis elevados de biomassa, problema geral da floresta tropical ao ser monitorada com imagens de radar, conforme relatado por LeToan et al. (1992), Imhoff, (1995) e Santos et al. (2002). Apesar de algumas diferenças nas curvas de respostas da relação de biomassa e *backscatter* oriundas de funções logarítmica ou exponencial, o sinal da banda P isolado nessa conjunção de variáveis tem mostrado limite de saturação não superior a 100 ton/ha, como citado por Santos et al (2003).

Na Figura 3 é mostrado o comportamento das variações na estimativa de biomassa (ton/ha) da cobertura florestal investigada, como função da escala de dados observada entre a altura interferométrica (h_{int}) e os valores de retroespalhamento (σ_{HH}^0). O erro padrão da estimativa oscila numa escala de 20-40 ton/ha, obtendo-se assim, com a aplicabilidade do modelo (equação 1) estimativas mais confiáveis e não com valores superiores às aproximações outras baseadas no simples uso da variável *backscatter*, porque a variação da estimativa não aumenta exponencialmente com quantidades elevadas de biomassa.

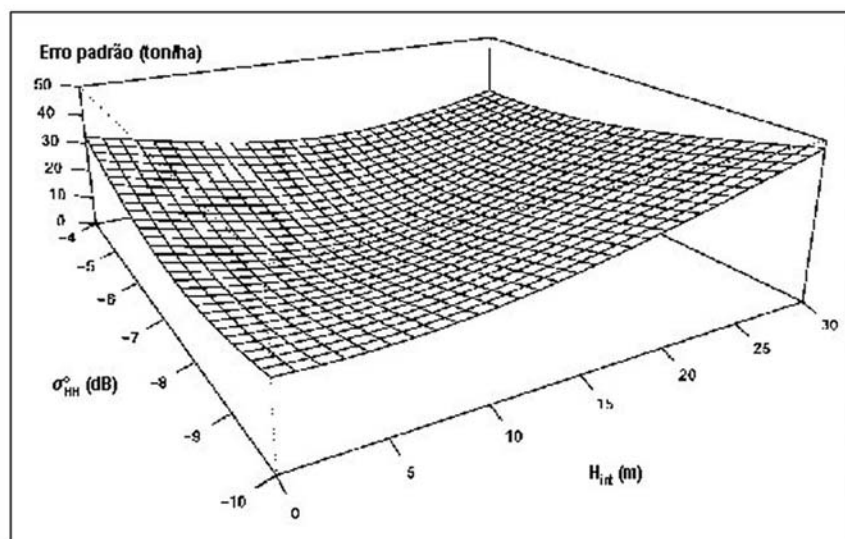


Figura 3. Diagrama com variações na estimativa de biomassa como função da altura interferométrica e de retroespalhamento para a cobertura florestal primária e secundária.

Após toda essa análise da confiabilidade de relacionamento entre variáveis de campo e do SAR, o objetivo final era gerar uma cartografia da biomassa presente nas faciações da cobertura florestal existente

na área. Isso foi inicialmente realizado, conforme citado na parte metodológica, através da segmentação da imagem correspondente ao modelo de altura interferométrica (HIM), cuja separabilidade em polígonos, representava variações na paisagem, refletindo povoamentos florestais distintos ou em outros casos, unidades de ocupação da terra (áreas agrícolas e de pecuária). Uma vez feita tal separabilidade em polígonos, representando cada um desses um grupamento de *pixels* homogêneos, foram extraídos os valores médios de altura interferométrica nessa imagem HIM. A partir dessa mesma segmentação, numa superposição desse delineamento sobre a imagem P_{HH} foram extraídos os valores médios de *backscatter* (σ_{HH}) para cada um dos polígonos. Isso feito, aplicou-se então a formulação do modelo de biomassa (equação 1), cuja distribuição espacial pode ser observada na Figura 4. No decorrer desse procedimento, uma classificação binária simples foi executada para caracterizar e separar áreas florestais de interesse, daquelas consideradas não florestais (agricultura e pecuária), fora do escopo do presente trabalho. Assim, todos os polígonos com altura interferométrica $\geq 2,6$ metros foram considerados de interesse, sendo categorizados como faciações de sucessão secundária ou de floresta primária; todos os polígonos segmentados com $h_{int} < 2,6$ metros foram tomados como pertencentes a categoria não-floresta, efetuando-se por conseguinte, uma máscara nas imagens SAR, com essa região não considerada na cartografia da biomassa florestal.

. Na figura 4, as áreas em preto correspondem as áreas desflorestadas, ocupadas geralmente com pastagens, os tons de cinza-claro pertencem a categoria temática de floresta primária e as variações de cinza médio refletem os estádios sucessionais da regeneração natural.

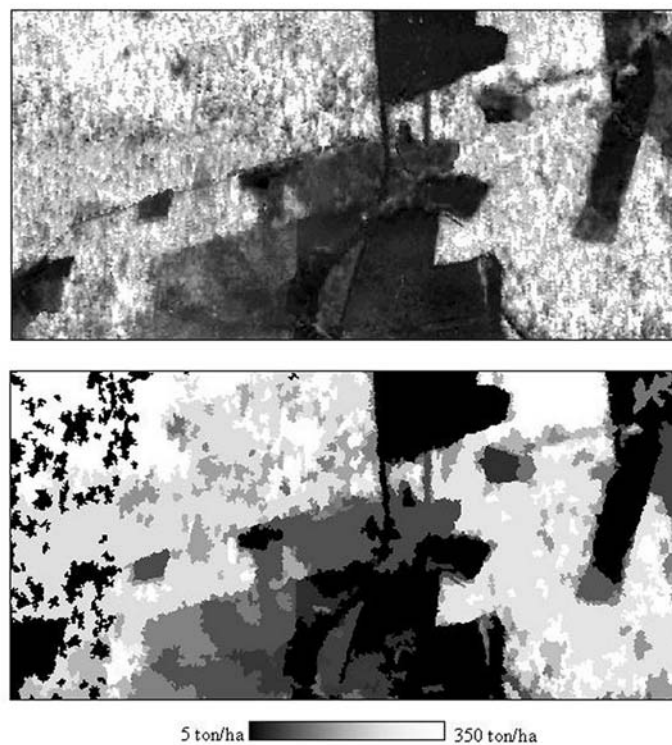


Figura 4. Seção de imagem interferométrica SAR (bandas X e P) e mapa da distribuição de cobertura florestal correspondente em área do Tapajós

5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra uma nova abordagem para o mapeamento e inventário de variáveis biofísicas da cobertura florestal, especificamente nesse caso, para a estimativa de biomassa, com a conjunção de dados SAR de altura interferométrica e de *backscatter*, fornecendo assim, uma maior acurácia ao modelo estimador. Para tal, é necessário que haja uma conveniente calibração dos modelos DSM e do DEM, geradores da imagem de altura interferométrica. Essa por sua vez, pode numa etapa de mapeamento, permitir mais facilmente um reconhecimento da tipologia vegetal, por refletir condições estruturais da floresta primária ou secundária. É muito importante o entendimento acerca da proporção de árvores dominantes ou

sub-dominantes para mensurar, nos dados SAR, a altura interferométrica dos diferentes estratos que compõem as fâcies florestais. As discussões aqui mencionadas sugerem que, num modelo de biomassa, uma mesma medida de altura para qualquer tipo florestal pode confundir essa análise de dados SAR, visto que a inserção de valores interferométricos deve levar em conta a existência de dois *clusters* (agrupamentos), representativos de fâcies florestais primárias ou secundárias. No decorrer do procedimento metodológico que tratou da espacialização das variações de biomassa, o emprego da técnica de segmentação incremental multi-nível, produzindo em seu processo uma estrutura que representa simultaneamente características de *backscatter*, textura e forma de regiões, pôde ser considerado eficaz ao se usar dados SAR interferométricos. Isso, por permitir a análise de segmentações intermediárias, auxiliando na definição por parte do analista, do nível desejado de detalhes dos polígonos delineados em associação com a representação temática envolvida na área de estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALZTER, H. **Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar (INSAR)**. Progress in Physical Geography, 25(2):159-177, 2001.
- BAMLER, R. (2004). **Digital terrain models from radar interferometry**. Disponível em: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo97/bamler.pdf> (acesso em março de 2004).
- BAMLER, R. ; HARTL, P. **Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems**, 14: 01-54, 1998.
- BOURGEAUD, M.; WEGMÜLLER, U. **On the use of ERS SAR interferometry for retrieval of geo-and bio- physical information**. In: ESA Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry – FRINGE/96, Sept., 1996, Zurich. Proceedings. Disponível em: <http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/borgeaud-wegmüller/> (acesso em março de 2004).
- CHAMBERS, J.Q.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R.J.; HIGUCHI, N. **Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest**. Forest Ecology and Management, 152: 73-84, 2001.
- CLOUDE, S.R.; PAPATHANASSIOU, K.P.; REIGBER, A.; BOERNER, W.M. **Multi-frequency polarimetric SAR interferometry for vegetation structure extraction**. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS'2000. Proceedings. Honolulu, Hawaii (USA), 24-28 July, 2000. [CDROM].
- CLOUDE S.R.; WOODHOUSE, I.H.; PAPATHANASSIOU, K.P.; ZIMMERMANN, R. (2004). **Polarimetric interferometry in forest applications: a review**. Disponível em: <http://hawk.iszf.irk.ru/URSI2002/Gabstract/papers/p0589.pdf> (acesso em abril de 2004).
- COOK, R.; MC CONNELL, I.; STEWART, D.; OLIVER, C. **MUM (Merge Using Moments) segmentation for SAR images**. In: EurOpto SAR Data Processing for Remote Sensing - SPIE. Proceedings. Rome, Italy. 1994. pp. 92 - 103.
- DALLEMAND, J.F.; LICHTENEGGER, J.; RANEY, R.K.; SCHUMANN, R. **Radar imagery: Theory and Interpretation Lecture Notes**. FAO, Rome, 1993. 103p.
- IMHOFF, M.L. **Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33: 511- 518, 1995.
- KOSKINEN, J.;T.; PULLIAINEN, J.T.; HYYPPÄ, J.M.; ENGD AHL, M.E.; HALLIKAINEN, M.T. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 39(4):820 - 829, 2001.
- LE TOAN, T.; BEAUDOIN, A.; GUYON, D. **Relating forest biomass to SAR data**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(2): 403 – 411, 1992.

MADSEN, S.N.; ZEBKER, H.A. **Imaging radar interferometry**. In: Ryerson, R.A. ed., Principles & Applications of Imaging Radar: Manual of Remote Sensing. 3., ed. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1998. v.2., cap.6, p. 359-380.

MURA, J.C.; BINS, L.S.; GAMA, F.F.; FREITAS, C.C.; SANTOS, J.R.; DUTRA, L.V. **Identification of tropical forest in Brazilian Amazon based on the MNT difference from P and X bands interferometric data**. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS'01. Sidney, Australia, 2001. Proceedings. [CDROM].

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, 189: 159 – 170, 2003.

NEEFF, T.; DUTRA, L.V.; SANTOS, J.R.; FREITAS, C.C.; ARAUJO, L.S. (2004). **Tropical forest biomass measurement by backscatter and DEM information as derived from airborne SAR**. Forest Science. (*manuscript #03-07-01 submitted*).

NELSON, B.W.; MESQUITA, R.; PEREIRA, J.L.G.; SOUZA, S.G.A.; BATISTA, G.T.; COUTO, L.B. **Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon**. Forest Ecology and Management, 117: 149-167, 1999.

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, 87: 482-493, 2003.

SANTOS, J.R.; PARDI LACRUZ, M.S.; ARAUJO, L.S.; KEIL, M. (2002). **Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data**. International Journal of Remote Sensing, 23(7): 1217-1229, 2002.

SOUZA, JR.; M.A.; DUTRA, L.V.; FREITAS, C.C. **Desenvolvimento de um segmentador incremental multi-nível (SIM) para imagens ópticas e de radar**. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Belo Horizonte (MG), Brasil. 5 - 10 abril, 2003. Anais. p. 2293-2300. [CDROM].

TREUHAFT, R.N.; SIQUEIRA, P.R. **Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar**. Radio Sciences, 35(1):141-177, 2000.

VAN ZYL, J.J.; KIM, Y. (2003). **The use of polarimetric and interferometric SAR data in floodplain mapping**. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS'03. Toulouse, France, 2003. Proceedings. [CDROM].

WEGMÜLLER, U.; WERNER, C. **Retrieval of vegetation parameters with SAR interferometry**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35(1): 18-24, 1997.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (processos 300677/91-0, 380597/99-3, 309922/2003-8) e também ao 8º BEC (Exército), IBAMA/MMA, SUDAM pelo suporte logístico. Essa pesquisa foi conduzida como parte do projeto LBA/LC-11, do Programa AMZ/INPE (PPA2000-2003) e sobretudo, da cooperação científica INPE e DSG (Diretoria do Serviço Geográfico).