

Estimativa de Parâmetros Biofísicos de Povoamentos de *Eucalyptus* Através de Dados SAR

Estimation of Biophysical Parameters in the *Eucalyptus* Stands by SAR Data

Fábio Furlan Gama¹
João Roberto dos Santos¹
José Cláudio Mura¹
Camilo Daleles Rennó¹

Resumo

O objetivo deste trabalho foi estabelecer as relações entre os parâmetros dendométricos de florestas e a resposta da radiometria e da interferometria obtidas por sensores SAR (Synthetic Aperture Radar), utilizando técnicas de regressão multivariada. Uma área de povoamento de *Eucalyptus grandis*, com 6,1 anos de plantio, foi selecionada para estudo. Os resultados indicaram que o volume das parcelas foi altamente correlacionado com o logaritmo da altura interferométrica (LogHint) obtida pela diferença entre os modelos interferométricos nas bandas X e P, enquanto que o DAP (Diâmetro à Altura do Peito) apresentou melhor relação com a combinação da coerência interferométrica na banda P_{VV} (CohP_{VV}) e o LogHint. A altura comercial da vegetação, similarmente ao DAP, foi melhor explicada com a combinação da CohP_{VV} e o LogHint. Os resultados obtidos demonstraram que, devido ao povoamento ser constituído de indivíduos cuja estrutura era predominantemente cilíndrica de orientação vertical, houve uma maior interação com a polarização VV. Os resultados indicaram também que a resposta radiométrica na banda P, de maior comprimento de onda, não foi tão eficaz quanto a interferometria (CohP_{VV} e o LogHint) para estimativa dos parâmetros dendométricos estudados, obtendo índices de determinação de 84 a 88% em relação ao inventário florestal das áreas.

Palavras-chave: SAR; radar; interferometria; polarimetria; inventário florestal.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos – SP – Brasil – CEP: 12.227-010, Fax : (12) 3945 6468
email: fabio@dpi.inpe.br; mura@dpi.inpe.br; camilo@dpi.inpe.br; jroberto@dsr.inpe.br

Abstract

The main goal of this paper was to establish the relationship between the forest dendrometric parameters and the interferometric and radiometric image response, obtained from a SAR sensor (Synthetic Aperture Radar), using multivariable regression techniques. A 6.1-year-old *Eucalyptus grandis* stand area was selected for this study. The results pointed out that the stand volume was highly correlated with the interferometric height logarithm (LogHint), obtained by the difference between interferometric models in X and P bands, whereas the DBH presented better relationship with the combination of VV coherence (CohPvv) and the LogHint. The commercial vegetation height, similar to the DBH, was better explained by the combination of CohPvv and LogHint. The results showed that due to the fact that the population of individuals whose structure was predominantly cylindrical and vertically oriented, caused a higher interaction with the vertical polarization. The higher wavelength P band radiometry efficacy wasn't as good as the interferometry (CohPvv and LogHint) to estimate the dendrometric parameters studied, which obtained 84 to 88% of determination coefficient in relation to the area forest inventory.

Key words: SAR; radar; interferometry; polarimetry; forest inventory.

Introdução

O Sensoriamento Remoto por microondas apresenta independência das condições de iluminação solar e proporciona a obtenção de imagens sob as mais variadas condições meteorológicas, mostrando-se uma eficiente ferramenta de suporte no processo de caracterização, inventário e monitoramento florestal. A utilização do SAR para estimar determinados parâmetros biofísicos e, por conseguinte, obter um maior conhecimento fisionômico-estrutural da vegetação, tem sido intensificada nos últimos anos, principalmente devido, de um lado, às interações que o sinal de microondas pode ter com a vegetação em determinadas faixas de comprimento de onda e da polarização empregada, e de outro como às melhorias tecnológicas oferecidas, como polarimetria, interferometria e uma melhor qualidade da radiometria nas imagens SAR.

Estudos realizados por Beaudoin et al. (1994) em floresta de *Pinus* sp (floresta de Landes -França), durante a campanha Maestro-1, utilizando o SAR do JPL/NASA nas bandas P, L e C, indicaram que a melhor correlação foi obtida entre a biomassa inventariada e a resposta radiométrica do SAR imageador na banda P, de maior comprimento de onda, por permitir uma maior penetração das ondas eletromagnéticas no

dossel se comparada com as demais bandas empregadas. Verificaram ainda que a resposta radiométrica do SAR na banda P, em todas as polarizações, foi a que apresentou os melhores coeficientes de correlação, para a biomassa dos galhos, troncos, acículas e total; e a resposta do SAR na banda L, na polarização cruzada (HV), apresentou valores muito semelhantes à banda P na polarização VV. Verificou-se também que a banda P, na polarização HH, apresentou altos valores de coeficientes de correlação com os parâmetros estruturais da floresta, principalmente para o diâmetro à altura do peito (DAP) e área basal, enquanto que para a banda L, os valores de correlação foram aproximadamente 20% menores. A causa destes efeitos se deve ao fato de as polarizações VV e HV exibirem uma menor dispersão dos dados que a polarização HH, devido à variação do ângulo de incidência, estrutura da copa e práticas de exploração madeireira. A resposta das polarizações VV e HH foi maior devido provavelmente à alta penetração nas copas das árvores e a consequente ocorrência dos mecanismos de *double-bounce* nos troncos das árvores, principalmente na polarização HH.

Para a análise de ecossistemas agrícolas e florestais, foram desenvolvidos vários tipos de índices que empregam imagens SAR. Os índices desenvolvidos por Pope et al. (1994) se baseiam nos dados polarimétricos do SAR, que se relacionam com diferentes características da vegetação, o primeiro índice CSI (*canopy structure index*) ($CSI = VV/(VV+HH)$), corresponde à estrutura do dossel; o BMI (*biomass index*) ($BMI = (VV+HH)/2$), corresponde à biomassa; o VSI (*volume scattering index*) ($VSI = (HV+VH)/Potência\ total$), ao espalhamento volumétrico, e o ITI (*interaction type index*) (Df), ao valor absoluto da diferença de ângulo de fase, que corresponde ao tipo de mecanismo de interação. Esses índices apresentam a vantagem de serem funções lineares que facilitam a utilização de ferramentas de análise estatística, pois são independentes dos efeitos de distância da antena do SAR ao alvo ou da inclinação do terreno, sendo desta forma uma função da vegetação ou da condição da superfície facilitando a sua interpretação.

Pope et al. (1994) testaram estes índices em uma região de floresta tropical na América Central, utilizando dados do sistema AIRSAR nas bandas P, L e C; cujos resultados apresentaram maior variação na banda P do que nas demais bandas. Verificou-se, igualmente, que o índice VSI, na banda P e L, foi melhor que a banda C por apresentar uma melhor separação nas respostas para os diferentes alvos.

Além da radiometria do SAR, nos últimos anos desenvolveu-se a técnica da interferometria SAR, que consiste na interação dos ecos recebidos por duas ou mais antenas, separadas no espaço por uma distância conveniente, denominada linha-base ou *baseline*, cujas posições são conhecidas, permitindo a geração do modelo de elevação do terreno. A *baseline* pode ser obtida por meio de duas passagens do sensor, ou por uma única passagem com ambas as antenas instaladas, operando conjuntamente na plataforma de vôo, podendo, assim, operar ao nível orbital como aerotransportado.

Dependendo da frequência de operação do SAR imageador, a interferometria permitirá obter o modelo digital do terreno com maior ou menor penetração no dossel, obtendo assim modelos numéricos do terreno para diferentes camadas da vegetação. Mura et al. (2001) utilizaram dados interferométricos obtidos na campanha de mapeamento da Floresta Nacional do Tapajós- PA (Teste da banda-P), nas bandas de operação X e P e, através da diferença entre os modelos digitais de elevação do terreno (MDT) na banda P, de alta penetração no dossel, e na banda X, de baixa penetração, puderam avaliar as alturas da vegetação.

A qualidade dos dados interferométricos é medida pelo grau de correlação complexa entre os pixels das imagens, cujo módulo é denominado coerência (g). No caso de áreas vegetadas, esta coerência interferométrica algumas vezes decresce com o incremento da biomassa da floresta, os efeitos do terreno, e as mudanças das constantes dielétricas (alagamento, umidade, congelamento). Assim, para dosséis de florestas, os comprimentos de onda maiores possuem maior capacidade de penetração, influenciando no retroespalhamento dos alvos, na interferometria e na coerência. No caso do satélite JERS-1, banda L, o retroespalhamento sofre grande influência dos troncos e galhos, enquanto para o ERS ou Radarsat (banda C), o retroespalhamento ocorre nas folhas ou nos galhos. Desta forma, a interferometria para comprimentos de onda longos, bandas L ou P, tende a apresentar uma coerência mais estável.

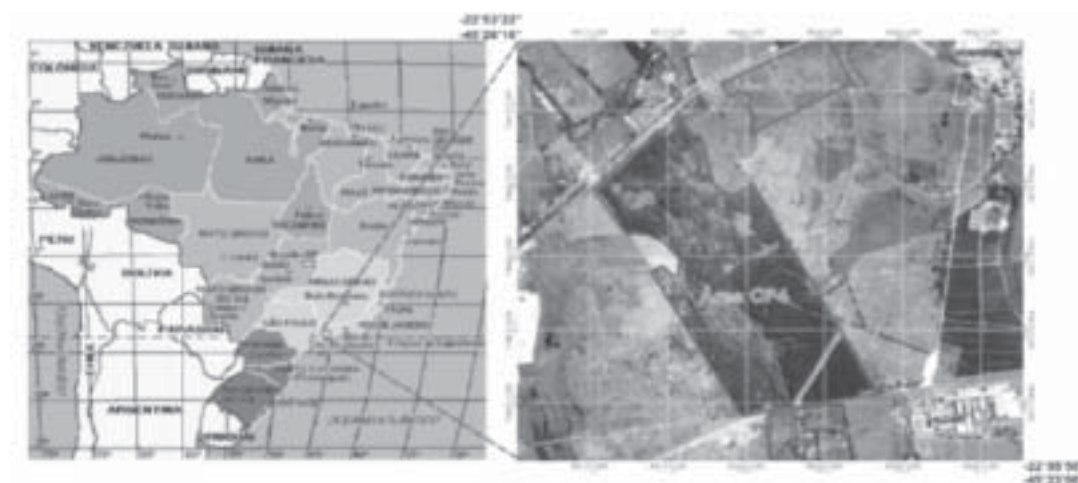
Neeff et al. (2005) combinaram a técnica descrita por Mura et al. (2001), para obter a altura da floresta através da diferença do MDT obtido pela interferometria nas bandas X e P, para determinar a biomassa da vegetação, que permitiu obter um modelo com um índice de determinação de 88 %, ao invés 77 % obtido por Santos et al. (2003) para o mesmo conjunto de dados, que empregaram apenas a resposta radiométrica da polarização P-HH; Gama et al (2005), utilizando o mesmo conjunto de dados, conseguiram obter um modelo de regressão para o volume da floresta tropical empregando a resposta radiométrica da banda P na polarização HH, bem como verificou-se que o modelo de regressão do logaritmo da biomassa da vegetação, poderia obter um índice R^2 mais elevados por linearizar esta variável.

O INPE, em cooperação com a empresa Orbisat aerolevantamentos S.A. e a empresa Nobrecel Celulose e Papel S.A., realizou uma missão aerotransportada empregando um SAR (*Synthetic Aperture Radar*) na banda P ($\lambda = 72$ cm) multipolarizada (HH, HV, VH, VV), e na banda X ($\lambda = 3$ cm) numa área de reflorestamento de *Eucalyptus*, no Vale do Paraíba (Estado de São Paulo), que possuía características mais homogêneas, de forma a conseguir um melhor entendimento da interação do sinal de microondas com os parâmetros estruturais do povoamento. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a relação de resposta do SAR, quanto à radiometria (s° -sigma nought) na banda P (polarizações HH, HV e VV), à interferometria e à coerência interferométrica nas bandas X e P, com os parâmetros biofísicos da vegetação (altura comercial, DAP e volume).

Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Pindamonhangaba/SP, em uma área de reflorestamento da empresa de celulose Nobrecel S.A, composta por talhões de *Eucalyptus grandis*, de 6,1 anos de idade, com altura média de 23,3 metros, numa área total plantada de 128,64 hectares, em relevo plano, composta de dois platôs com níveis altimétricos distintos. A figura 1 apresenta a imagem aérea fornecida pela empresa BASE que foi obtida durante o aerolevantamento do município de Pindamonhangaba em fevereiro de 2003.

Figura 1. Área de estudo



Material e Métodos

Na região de estudo foram realizados inventários florestais em *transectos*, com medidas da altura comercial das árvores, do DAP e do volume, em indivíduos cujo diâmetro fosse superior a 5,0 cm de diâmetro. A localização das 23 parcelas na área pode ser observada na figura 2, em que os círculos amarelos de interior vermelho correspondem ao centro das parcelas. A medida de biomassa da vegetação foi obtida através de métodos destrutivos, empregando as medidas do inventário para a escolha da árvore representativa da parcela. O vôo de mapeamento foi realizado a aproximadamente 4000 m de altitude, em duas direções para minimizar os efeitos de sombra e *layover* nas imagens.

Figura 2. Imagem do radar na banda X com a localização das parcelas inventariadas



Além do inventário florestal, foram realizadas 1221 medidas topográficas no interior das parcelas e 98 medidas na área de pasto vizinha ao povoamento, e medidas do centro das mesmas nos produtos gerados pelo SAR. Para este levantamento foi empregada uma estação total marca Topcon 701 com precisão de 3"; que no levantamento manteve-se o limiar de erro máximo de 5cm, para os 1200 pontos medidos no interior das parcelas. A figura 3 apresenta exemplos das fotos obtidas durante a campanha, mostrando a operação da estação total e o interior de uma parcela estudada.

Figura 3. a) Levantamento topográfico; b) Parcela



Para a realização do mapeamento SAR empregando a interferometria, foi necessária a implantação dos pontos de controle no solo, que se tornam visíveis ao SAR por meio da instalação de sinalizadores metálicos, denominados refletores de canto, que permitem a calibração de fase da interferometria e de georeferenciamento dos produtos. Os refletores foram instalados no momento do voo, nos pontos previamente medidos e implantados, empregando GPS geodésicos que se utilizou de um ponto SAT do IBGE como base.

As imagens geradas pelo SAR necessitam de calibrações polarimétricas, que corrigem a influência de uma polarização com as demais, bem como calibrações radiométricas que transformam a imagem radar em uma imagem que se relaciona apenas a resposta do alvo, denominada imagem *sigma nought* (s^0). Neste trabalho, a calibração polarimétrica das imagens foi realizada através do programa RAT (Radar Tools), que empregou a resposta radiométrica das imagens complexas nas áreas dos refletores de canto. A calibração radiométrica empregou os mesmos refletores de canto como referência, cujo valor de pico que ocasionou nas imagens, serviu para gerar o fator de calibração da cena. A figura 4 apresenta um refletor instalado na área de estudo e a geometria de apontamento.

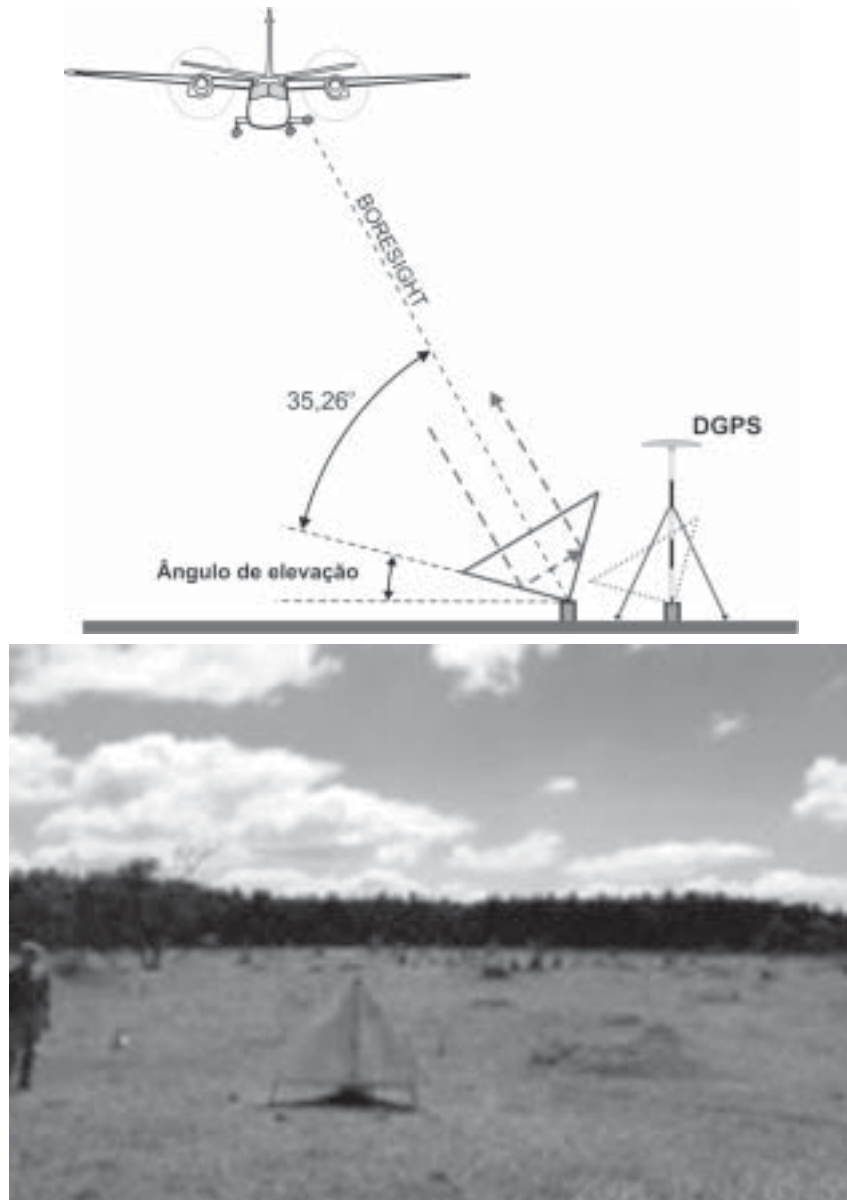
A partir das respostas radiométricas das imagens complexas calibradas polarimetricamente, foram geradas as medidas de entropia e do ângulo α , que são obtidas a partir de uma série de decomposições de matrizes, de forma a caracterizar o tipo de espalhamento predominante nas imagens. A partir dos dados calibrados polarimetricamente, foram aplicados fatores de correção obtidos pelos valores de resposta dos refletores de canto, de forma a obter as imagens *sigma nought* (s^0) para cada polarização das imagens da banda P, permitindo, assim, calcular os índices desenvolvidos por POPE et al. (1994).

Uma vez obtidos os dados radiométricos e os índices derivados BMI, CSI e VSI destas respostas radiométricas, foram empregadas técnicas de regressão multivariada para estimar modelos entre os parâmetros biofísicos e os dados do SAR.

Os modelos digitais de elevação do terreno (MDT) foram gerados por interferometria SAR de uma passagem para a banda X, e de duas passagens para a banda P, de forma que foram gerados 4 MDT para cada polarização da banda P e um MDT para a banda X na polarização HH. A altura interferométrica foi obtida pela diferença do MDT da banda X, relativo à altura do dossel, e o MDT da banda P na polarização HH, relativo à altura do solo. Os demais MDT da banda P não foram utilizados por não apresentaram a mesma acurácia para as áreas vegetadas que o da polarização HH.

Para a determinação do conjunto das variáveis que poderiam contribuir para a regressão, foram utilizados critérios de escolha de variáveis, como o de determinação (R^2),

Figura 4. Instalação dos refletores de canto



o índice de determinação ajustado (R^2_a), o critério C_p , e o critério F do método *Stepwise*. Segundo Neter et al. (1996) um valor elevado de índice R^2 não significa necessariamente um bom ajustamento do modelo de regressão, pois depende do número de variáveis empregado. O índice R^2_a emprega uma ponderação para a medida de ajustamento da regressão sendo mais relevante do que o índice R^2 . O critério C_p envolve o conceito do erro quadrático médio total de cada subconjunto de modelos de regressão ajustado, o qual considera o

erro total em cada valor ajustado. Com o critério C_p pode-se identificar subconjuntos de variáveis dependentes, nos quais o erro quadrático médio total é pequeno, ou seja, quando o valor de C_p for igual ou próximo ao número de parâmetros p , corresponderá ao modelo com menor viés.

O procedimento *forward stepwise* consiste em iniciar a análise computacional somente com uma constante, sem nenhuma das variáveis de interesse, e a cada passo, após acrescentar uma nova variável, retira-se do modelo aquela cuja contribuição parcial não foi considerada significativa. Variáveis contidas no modelo, em um determinado passo, não necessariamente permanecem até o final do processo.

Para a avaliação heterocedasticidade (constância da variância dos resíduos) foi empregado o teste de Levene, que realiza a comparação do teste t de dois sub-grupos de amostras do conjunto de dados, para determinar se a média dos desvios absolutos de um sub-grupo difere do outro.

Para a avaliação da existência de *outliers* no conjunto de dados, empregou-se o método de distância de Cook, que considera a influência de uma determinada observação em todos os outros valores ajustados. Esta influência é medida pelo percentil de uma distribuição F, cujo limite aceitável é de 20% para que um caso seja considerado um *outlier*.

Resultados

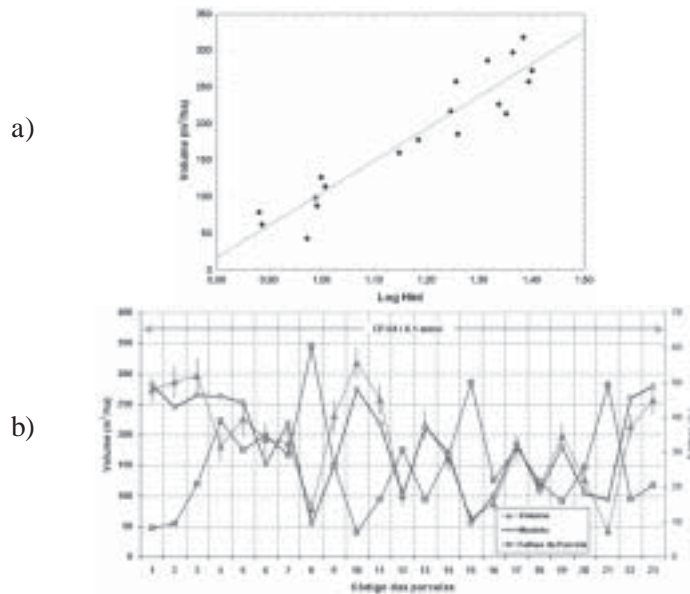
No desenvolvimento do modelo de regressão para o volume da vegetação (variável dependente), foram incluídas as variáveis radiométricas referentes às imagens nas polarizações HH, VV e HV, à altura interferométrica (Hint e Log Hint), às coerências interferométricas nas três polarizações, aos índices derivados da radiometria BMI, CSI e VSI, e as medidas de entropia e ângulo α .

Durante os testes estatísticos na determinação das variáveis explicativas para o volume, verificou-se pelo critério R^2 , R_a^2 e C_p que o modelo necessitaria de três variáveis, mas com a eliminação de 4 casos de *outliers* detectados (parcelas 4, 6, 9, 19), verificou-se pelo critério Stepwise que variável LogHint e CohPvv seriam as melhores candidatas. A análise deste resultado indicou que a variável CohPvv apresentou um baixo valor de significância ao modelo, e após a realização de um teste F, para checar a influência de sua eliminação, verificou-se que ela poderia ser excluída sem prejuízo do modelo final.

O modelo final obtido foi : $\text{Volume} = -335,48 + 440,853 * \text{LogHint}$; em que o R^2 obtido foi de 88,79% e o R_a^2 foi de 88,13%, com uma tendência à normalidade, apresentando homocedasticidade dos resíduos pelo teste de Levene, sem necessitar aplicar correções adicionais ao modelo.

Os testes de *ouliers* no modelo final, utilizando o teste de distância de Cook, identificou o pior caso com um percentil de 19,6%, abaixo do limite de 20%, considerado aceitável por Neter et al. (1996), indicando a inexistência de casos significativos. A figura 5a apresenta os resultados do modelo de regressão, em que se verifica uma boa linearidade do modelo final. Comparando o resultado do modelo com os dados do inventário florestal (figura 5b), verifica-se em alguns casos que os valores do modelo se afastam do inventário, que corresponde aos casos detectados como *ouliers* que foram eliminados da regressão. O gráfico da figura 5b apresenta também o percentual de falhas do povoamento para cada parcela, em que se verifica que o modelo se mostrou insensível quanto as falhas, visto que nos casos de maior valor percentual de falhas não houve diferenças significativas nos resultados do modelo.

Figura 5. a) resultado do modelo do volume; b) resultado do modelo com o inventário florestal



No desenvolvimento do modelo de regressão para a altura comercial, foram utilizadas as variáveis radiométricas referentes às imagens nas polarizações HH, VV e HV, à altura interferométrica (Hint e Log Hint), às coerências interferométricas nas três polarizações, aos índices derivados da radiometria BMI, CSI e VSI, e às medidas de entropia e ângulo α . Durante os testes estatísticos para a seleção das variáveis explicativas para a altura comercial, verificou-se que pelo critério R^2 , R_a^2 e C_p , inicialmente o modelo necessitaria de três variáveis (LogHint, CohPvv e s^o Pvv), mas com a eliminação dos 2 casos de *ouliers* detectados (parcelas 4 e 8), identificou-se pelo critério Stepwise que as variáveis LogHint e CohPvv seriam as melhores candidatas.

O modelo final obtido foi $\text{Altura comercial} = -0,5768 + 16,4197 * \text{LogHint} - 10,2575 * \text{CohPvv}$; sendo que o R^2 obtido foi de 86,17% e o R^2_a foi de 84,64%, com uma tendência à normalidade, apresentando homocedasticidade dos resíduos pelo teste de Levene, sem necessitar aplicar correções adicionais ao modelo.

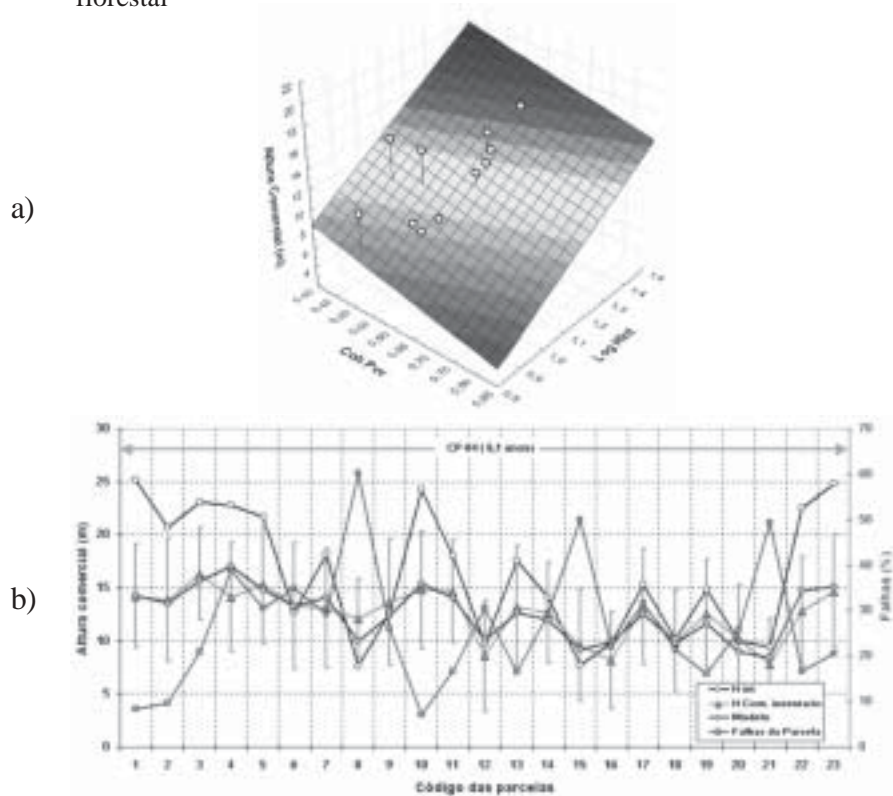
Os testes de *ouliers* realizados no modelo final, utilizando o teste de distância de Cook, não identificou nenhum caso com um percentil acima do limite de 20% (Netter, 1996), indicando a inexistência de casos significativos. A Figura 6a apresenta o gráfico dos resultados do modelo de regressão, em que se verifica uma boa linearidade do modelo final. Comparando o resultado do modelo com os dados do inventário florestal (Figura 6b), verifica-se, em alguns casos, que os valores do modelo se afastam do inventário, que corresponde aos dois casos detectados como *ouliers*, eliminados da regressão.

O gráfico da Figura 6b apresenta também o percentual de falhas do povoamento para cada parcela, em que se observa que nas parcelas de menor percentagem de falhas, os valores obtidos pelo modelo se aproximam mais dos valores do inventário. A possível razão desse efeito seria de que o modelo de elevação do dossel foi melhor discriminado pela banda X nas áreas de menor incidência de falhas. O comportamento geral do modelo obtido em relação à altura comercial das parcelas indicou uma boa concordância com os dados inventariais quanto à média e não ultrapassou os valores do desvio padrão das alturas comerciais. A altura interferométrica (Hint) apresentou uma elevada variância para as diferentes parcelas, distanciando-se do valor da altura comercial média do inventário e em alguns casos ultrapassando o desvio padrão das medidas.

O desenvolvimento do modelo de regressão para o DAP, como nos outros modelos, utilizou as variáveis radiométricas referentes às imagens nas polarizações HH, VV e HV, à altura interferométrica (Hint e Log Hint), às coerências interferométricas nas três polarizações, aos índices derivados da radiometria BMI, CSI e VSI, e às medidas de entropia e ângulo α .

Os testes estatísticos utilizados (R^2 , R^2_a e Stepwise) para a seleção das melhores variáveis para a construção do modelo de regressão para o DAP, indicaram que as variáveis LogHint, $s^\circ P_{VV}$ e a Coh Pvv, seriam as melhores candidatas para a regressão. Como o gráfico de espalhamento apresentou um grande espalhamento dos pontos, foi utilizado o teste de distância de Cook para verificação de existência de *ouliers*. O resultado obtido neste teste indicou a presença de um caso (parcela 4) como candidato, por apresentar o valor de distância de Cook acima do limite de 20% (NETTER, 1996). Após a sua supressão, a nova regressão apresentou um baixo nível de significância referente à variável $s^\circ P_{VV}$ (~32,46%), sendo candidata a ser retirada do modelo.

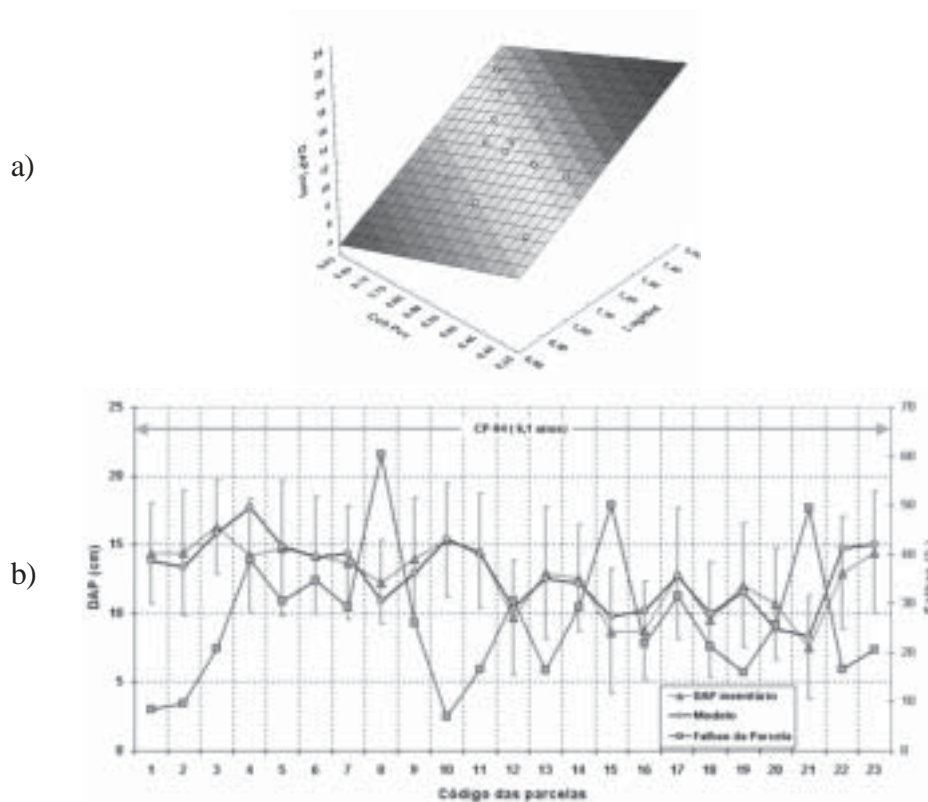
Figura 6. a) resultado do modelo da altura comercial; b) resultado do modelo com o inventário florestal



Quando retirada a variável $s^o P_{vv}$ do modelo, verificou-se que o valor de R^2_a sofreu um acréscimo, cujo resultado final foi : $DAP = 1,4657 + 16,6123 * LogHint - 13,6849 * CohPvv$; sendo que o R^2 obtido foi de 85,9% e o R^2_a foi de 84,42%. Para confirmação, realizou-se um teste F que indicou que a variável não deveria integrar o modelo. Os resíduos do modelo de regressão apresentaram-se com uma tendência à normalidade, apresentando homocedasticidade dos resíduos pelo teste de Levene, sem necessitar aplicar correções adicionais ao modelo.

O gráfico da figura 7a apresenta o resultado do modelo de regressão do DAP, em que se verifica que o modelo apresentou um comportamento inversamente proporcional quanto a CohPvv e o DAP. Isto ocorreu devido às variáveis CohPvv e LogHint apresentarem uma correlação de 53%, que causou a inversão do comportamento da variável CohPvv frente o DAP. Devido à contribuição da variável CohPvv ser expressiva no modelo (acréscimo de ~19% em R^2), ela foi mantida para se obter um modelo preditivo com melhor ajustamento aos dados. Comparando o comportamento do modelo de regressão frente às medidas do inventário florestal (Figura 7b), verifica-se uma boa concordância com os dados inventariais quanto à média, não ultrapassando os valores do desvio padrão do inventário de campo.

Figura 7. a) resultado do modelo do DAP; b) resultado do modelo com o inventário florestal



Conclusões e Recomendações

Os resultados obtidos indicaram que a radiometria na banda P, de maior penetração no dossel, não foi tão eficaz quanto a interferometria empregando as bandas P e X, uma vez que coerência da banda P (polarização VV) e o logaritmo da altura interferométrica, foram as variáveis mais significativas para os modelos do DAP e da altura comercial, bem como o volume da vegetação foi relacionado com a altura interferométrica. A provável razão para este efeito seria o fato de que o *Eucalyptus* é uma árvore que apresenta troncos muito longos possuindo uma copa de pequeno porte, cujos parâmetros dendométricos são estreitamente relacionados com a altura da vegetação.

Desta forma, o logaritmo da altura interferométrica permitiu inferir a altura do dossel a partir da diferença do MDT das banda X e P, uma vez que o MDT-X representa a altura do topo do dossel e o MDT-P_{HH}, representa a altura do solo sob a floresta. A coerência da banda P_{VV} contribuiu por indicar a interação do feixe do SAR com os troncos, que são os elementos estruturais dominantes da vegetação estudada.

Os modelos desenvolvidos para o DAP e altura comercial apresentaram um bom resultado preditivo, uma vez que os resultados obtidos foram próximos dos valores do inventário, e não ultrapassando o desvio padrão das medidas de campo. O modelo

para o volume apresentou um bom ajustamento nos casos estudados, sendo que as diferenças ocorridas se devem aos *outliers* detectados, que não apresentaram um comportamento muito diferenciado dos demais.

De forma geral, os modelos desenvolvidos obtiveram índices de determinação de 84 a 88% em relação ao inventário florestal das áreas, cujos resultados indicam grande potencialidade da interferometria SAR como suporte em inventários de grandes áreas, devido a rapidez de execução do mapeamento.

Como continuidade desta linha de pesquisa está sendo planejada uma nova missão de mapeamento das áreas estudadas para avaliação da capacidade de detecção de crescimento e de ganho de biomassa e volume.

Agradecimentos

Agradecemos ao apoio das empresas Nobrecel Celulose e Papel S.A., Orbisat Aerolevantamentos S.A., Diâmetro Biometria e Inventário Florestal e a 5ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro, na execução deste trabalho.

Referências

BEAUDOIN, A. et al. Retrieval of Forest Biomass from SAR Data. *International Journal of Remote Sensing*, v.15, n.14, p.2777-2796, Sept. 1994.

GAMA F.F., et al. Aplicação de dados polarimétricos de radar aerotransportado (banda P) para estimativa de parâmetros estruturais de florestas tropicais. In: XII SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia, 2005. *Anais...*, São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. p. 4413-4420. [CD-ROM]

MURA J.C. et al. Identification of the Tropical Forest in Brazilian Amazon based on the MNT difference from P e X bands interferometric data. [CD-ROM] In: IGARSS - International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sidney, 2001 *Proceedings*. IEEE, Apr. 2001.

NEEFF T. et al. Tropical forest measurement by interferometric height modeling and P-band backscatter. *Forest Science*. Bethesda, MD, USA, v. 51, n. 6, p. 585-594, 2005.

NETER, J. et al. *Applied Linear Statistical Models*, Boston, MA, McGraw-Hill, 1996.

POPE K.O. et al. Radar Remote Sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American Tropics. *Remote Sensing of Environment*, v.2, n. 48, p. 205-219, May 1994.

SANTOS J.R. et al. Airborne P-band SAR applied to the above ground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment*. v.87, n.4, p.482-493, Nov. 2003.