

Avaliação de métodos para estimativa de desflorestamento na Amazônia sob cobertura de nuvens.

Maria Isabel Sobral Escada¹
Marisa da Motta¹
Camilo Daleles Rennó¹
Dalton de Morrison Valeriano¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{isabel, marisa, camilo}@dpi.inpe.br
dalton@dsr.inpe.br

Abstract. This paper aims to evaluate two different methods to estimate deforestation under clouds cover. The Prodes (Amazônia Deforestation Estimation Program) method and an alternative method based on distances from deforested areas were tested, evaluated and compared. In the alternative method five different criteria were established and tested to define distance slice width and maximum distance. The results showed that independently of the method adopted to estimate deforestation under clouds, the image selection is a very important step. Errors can be minimized if images can be chosen considering cloud cover position. In the distance method the error can be reduced when clouds is positioned over forest cover. In PRODES estimative the error is minimized when clouds cover is positioned over regions with forest and deforested areas in the same pattern of the rest of the image. The method based on distance slices reduced the uncertainties comparing to Prodes results, but it adds more steps in the estimative procedures, increasing the operational costs. This method is recommended for studies that require small number of images.

Palavras-chave: deforestation rate, taxa de desmatamento, cobertura de nuvens, clouds cover.

1. Introdução

O PRODES – Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (INPE, 2006) – desenvolvido e coordenado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais desde 1988, estima taxas anuais de desflorestamento na Amazônia, com importante repercussão no Brasil e no exterior. Devido à importância que estas estimativas passaram a ter ao longo dos anos, recentemente o conjunto de mapas digitais produzidos e utilizados no cálculo da taxa de desflorestamento passou a ser de domínio público podendo ser obtido sem restrições de acesso através da web. Além dos mapas digitais, vários documentos técnicos foram produzidos (Shimabukuro et al, 2000; Valeriano et al., 2004; INPE, 2005; Mota et al, 2004; Câmara et al., 2005) e disponibilizados na web, descrevendo os procedimentos e técnicas empregadas no mapeamento e no cálculo da taxa de desflorestamento. Esta política de disseminação de dados, além de dar maior transparência ao dado produzido, possibilita realizar avaliações dos procedimentos, além de explorar métodos alternativos visando aprimorar as estimativas.

Uma das principais fontes de incertezas no cálculo das taxas anuais de desflorestamento na Amazônia é a falta de dados em algumas regiões devido à presença de cobertura de nuvens. Nestas áreas, denominadas áreas não-observadas, o incremento do desflorestamento é estimado, supondo que a proporção de incremento de desmatamento na área não-observada é a mesma da área de floresta observada na imagem (Câmara et al, 2005).

Estudos sobre o desflorestamento na Amazônia mostram que o mesmo ocorre de forma concentrada no espaço (Fearnside, 1986; Skole e Tucker, 1993; Alves 2002), localizando-se ao longo das principais rodovias e em áreas pioneiras de desflorestamento (Alves, 2002).

Baseado neste padrão concentrado do desflorestamento foi estabelecido como objetivo deste trabalho avaliar e testar dois métodos para a estimativa do incremento do desflorestamento sob nuvens, o método do Prodes e um método alternativo baseado na distância dos incrementos observados em relação às áreas previamente desmatadas. Os resultados dos diferentes métodos são avaliados e comparados entre si.

Este trabalho está inserido no Programa Amazônia do INPE e busca contribuir com o Prodes no desenvolvimento de novos procedimentos e estimativas de incerteza.

2. Estimativa do incremento sob nuvem baseada em critérios de distância

Devido à alta cobertura de nuvens na Amazônia algumas regiões não são mapeadas sendo necessário estimar o incremento do desflorestamento. O procedimento utilizado é selecionar imagens com menor cobertura de nuvens e estimar o incremento nas áreas não observadas.

A premissa do Prodes para o cálculo do desflorestamento sob nuvens é de que a proporção do desflorestamento na área não-observada é a mesma da área observada na imagem (Câmara et al, 2005). Desta forma, o incremento estimado sob nuvens é calculado como a proporção do desmatamento observado multiplicado pela área de nuvens.

Neste trabalho, visando explorar métodos alternativos, a premissa formulada é de que a proporção do desflorestamento nas faixas de distância na área não-observada é a mesma para as faixas de distância correspondentes das áreas observadas na imagem. O método proposto neste trabalho para estimar incremento sob nuvem baseia-se em critérios de distância, nos quais o incremento observado é calculado em faixas de distância em relação ao desflorestamento acumulado até o ano anterior.

O alcance (distância máxima) é definido baseado na análise do desflorestamento em algumas cenas. Áreas de floresta e incrementos que se encontram fora deste alcance não são consideradas na estimativa. Visando a operacionalização deste método, são testados diferentes critérios de fatiamento de distâncias e alcances para estimar o incremento. Os resultados obtidos são comparados entre si e com os resultados das estimativas do Prodes.

Os procedimentos para cálculo das estimativas e análise de erros compreenderam quatro etapas que são descritas a seguir: 1) Seleção de cenas TM/Landsat sem cobertura de nuvens, com diferentes padrões de ocupação e tamanhos de incremento; 2) Análise do Incremento em relação à distância do desmatamento e estabelecimento de faixas de distância; 3) Estimativa do Incremento; 4) Simulações para estimativa do incremento e da distribuição espacial do erro.

2.1. Seleção de Cenas TM/Landsat

Foram escolhidas três cenas representando três diferentes padrões de desflorestamento (**Figura 2**), predominando: 1) pequenos incrementos (2003-2004), cena 227/63, região da rodovia Transamazônica no Pará; 2) Grandes incrementos (2002-2003), cena 226/69, localizada na porção central do estado do Mato Grosso e; 3) Incrementos de tamanhos pequeno e grande (2000-2001), cena 225/64, porção sudeste do estado do Pará.

As classes representadas nos mapas da **Figura 2** são: 1) Floresta, representa a cobertura de floresta primária; 2) Desmatamento total, representa o desmatamento acumulado até o ano anterior ao ano de mapeamento; 3) Incremento, é o desmatamento observado no período de um ano e; 4) Não-Floresta, representa todas as coberturas de vegetação que não pertencem originalmente à classe de floresta primária. As imagens selecionadas não apresentam cobertura de nuvens, possibilitando calcular incremento real e utilizá-lo como referência para estimar erros e avaliar os métodos e critérios de distância utilizados.

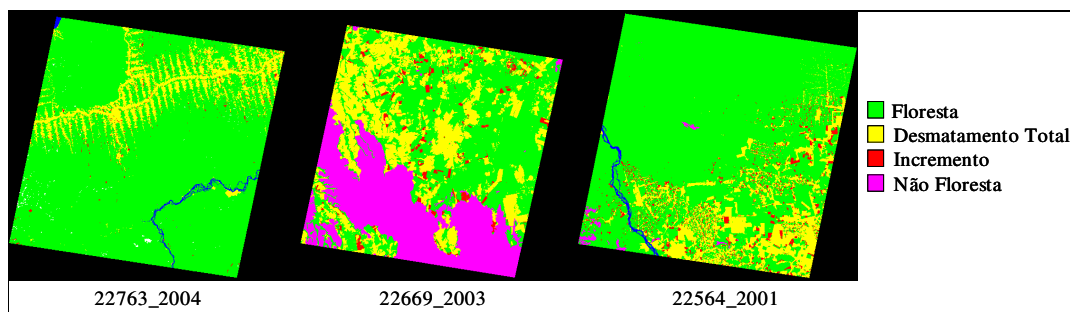


Figura 2: Mapas de desflorestamento do Prodes. Da esquerda para a direita, cenas com predominância de incrementos de tamanhos pequeno, grande e misto, respectivamente.

2.2. Análise do Incremento em relação à distância: Definição de faixas de distâncias

A análise dos incrementos foi realizada em função da distância das áreas desflorestadas. A **Figura 3** mostra que para os três padrões analisados o incremento concentra-se próximo das áreas desflorestadas. Mais de 90% do incremento nas três cenas ocorreu a uma distância inferior a 3.000 metros das áreas desflorestadas. Porém, algumas diferenças podem ser observadas, no que diz respeito ao alcance e a inclinação destas curvas.

Na cena 227/63, onde predominam incrementos de tamanho pequeno, cerca de 80% deles localizam-se a uma distância inferior a 500 m das áreas desflorestada, mostrando um padrão bastante concentrado. Apesar deste padrão, observa-se que, até 5.000m de distância, 9% do incremento total não foi incluído. Este comportamento pode estar associado a um novo foco de desflorestamento nesta cena, distante das áreas desflorestadas anteriormente.

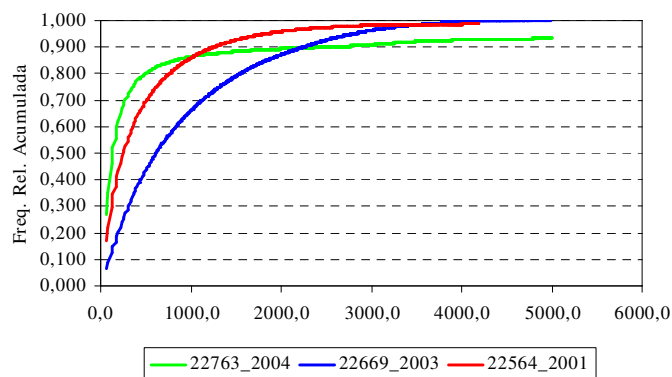


Figura 3: Freqüência relativa acumulada dos incrementos em relação à distância do desflorestamento total.

Na cena 225/64, que possui padrão de desmatamento misto, mais de 85% do incremento encontra-se a uma distância menor que 1.000 m das áreas desmatadas e, a partir de 3.000 m, o incremento passa a representar menos de 1% do incremento total.

A cena 226/69 apresenta incrementos grandes e possui cerca de 85% do desmatamento localizado a uma distância inferior a 2.000 m. Nesta cena, embora o desmatamento também seja concentrado, sua distribuição mostrou-se mais uniforme até a distância de 3.000 m. Além desta distância, como na cena 225/64, o incremento é bastante reduzido.

Tendo como base os padrões e o alcance do incremento observado nas diferentes imagens analisadas, foram estabelecidos cinco critérios de fatiamento das distâncias para as estimativas do incremento sob nuvem. A discretização das distâncias em faixas foi proposta

visando à operacionalização deste procedimento, com a perspectiva de aplicá-lo a mais de 200 cenas. Os critérios de fatiamento são os que seguem:

- A – Sem fatiamento (método do PRODES);
- B – Faixas com largura de 250m até a distância de 5000m, totalizando 20 faixas;
- C – Faixas com largura de 250m até a distância de 2500m, totalizando 10 faixas;
- D – Faixas com largura de 60m até 180m, de 120m até 900m, 300m até 2100m e 400m até a distância de 2500m, totalizando 14 faixas;
- E – Faixas com largura de 60m até a distância de 5040m, totalizando 84 faixas;
- F – Faixas com largura de 250m até a maior distância, considerando a dimensão e o padrão de desmatamento, de cada imagem. Foram geradas 300 faixas de distância, para a cena 227/63, o alcance foi de 74.859m, para a cena 226/69, o alcance foi de 53.696m e, para a cena 225/64, foi de 63.987m.

2.3 Estimativa do Incremento

Os cinco critérios de fatiamento e o método utilizado no Prodes foram testados utilizando a equação descrita a seguir. Nesta formulação considera-se que:

I_i é a área de incremento (fora da nuvem) na faixa i ($i = 1, \dots, n$; onde n é o número de faixas);

F_i é área de floresta (fora da nuvem) na faixa i ; e

N_i é a área de nuvem na faixa i , mapeada como floresta no ano anterior.

Então, área estimada de incremento sob nuvem na faixa i (\hat{I}_i) será dada por:

$$\hat{I}_i = \frac{I_i}{I_i + F_i} N_i$$

O incremento estimado para toda a cena (\hat{I}_T) é dado pela soma do incremento observado (I_T) e a soma dos incrementos estimados para cada faixa (\hat{I}_i), ou seja:

$$\hat{I}_T = I_T + \sum_{i=1}^n \hat{I}_i$$

2.4 Simulações para estimativa do Incremento

Para cada imagem, foram sorteados 500 pontos que definiram o centro de uma nuvem hipotética, definida como uma elipse de cerca de 800.000 pixels. A área coberta pela elipse representa cerca de 10% da área total da imagem, porém, quando o centro da elipse aproxima-se da borda esta proporção torna-se menor. A **Figura 4** mostra a nuvem hipotética sob uma das imagens analisadas.

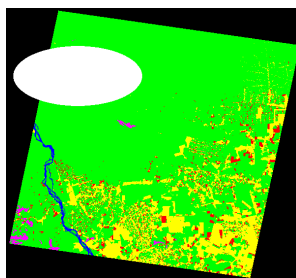


Figura 4. Elipse representando nuvem simulada.

O incremento total para a cena é conhecido (I_{Treal}) e corresponde a todos os pixels de incremento observado. Para cada simulação, é feita uma estimativa do incremento sob a

nuvem hipotética e calculado o incremento estimado para toda a cena (\hat{I}_T). Em seguida é calculado o erro de estimativa, dado por:

$$erro = \frac{\hat{I}_T}{I_{T\text{real}}} - 1$$

A distribuição espacial dos erros foi feita para os critérios de fatiamento A, B, E e F, através de processo de simulação que foi repetido para uma grade regular, selecionando-se um ponto a cada 20 pixels, ao longo das linhas e colunas. Os valores dos erros nos pixels não utilizados na simulação foram estimados por interpolação linear.

3. Avaliação das estimativas e de seu impacto no cálculo do incremento

A **Tabela 1** apresenta o resultado das estimativas para os métodos testados. Com exceção da cena 226/69, para os critérios de fatiamento C e D, que tinham alcance definido em 2.500 m, observa-se que a método baseado em distância apresentou, em média, resultados melhores.

Observa-se uma tendência de subestimação, devido ao estabelecimento de uma distância máxima (alcance), a partir da qual o incremento não é computado. Em termos gerais, os melhores desempenhos foram os obtidos utilizando as faixas de distância segundo os critérios B, E e F. O pior resultado utilizando estes critérios foi obtido com a imagem 226/69, que apresenta grandes incrementos e, em média, os métodos subestimaram em 1,21% em relação ao incremento real. Entretanto, este resultado foi melhor do que o obtido com o método A, o erro médio e o desvio padrão foram menores, indicando uma menor discrepância entre as estimativas realizadas durante a simulação das nuvens. As estimativas realizadas nas outras duas imagens utilizando os critérios B, E e F apresentaram também resultados melhores do que as estimativas realizadas pelo método A, com erro médio e desvio padrão menores.

Tabela 1. Erro na estimativa do incremento por cena.

	22763/2004		22669/2003		22564/2001	
	Média	desvpad	média	desvpad	média	desvpad
A (Prodes)	0,0105	0,0937	-0,0133	0,0625	0,0144	0,1214
B	-0,0026	0,0299	-0,0121	0,0505	-0,0009	0,0306
C	-0,0058	0,0301	-0,0193	0,0461	-0,0026	0,0300
D	-0,0058	0,0307	-0,0193	0,0461	-0,0024	0,0292
E	-0,0026	0,0306	-0,0121	0,0505	-0,0006	0,0297
F	0,0027	0,0301	-0,0121	0,0505	0,0002	0,0311

Valores negativos indicam uma subestimação e valores positivos uma superestimação.

O gráfico Box Plot da **Figura 5** apresenta o resultado da análise dos erros mostrando o posicionamento da mediana, valores mínimos e máximos das estimativas realizadas para cada cena de acordo com os métodos e critérios utilizados. Como pode ser observado, com exceção da cena 226/69, a análise da mediana dos erros mostra que o método A superestimou o incremento na maioria das simulações, enquanto o método baseado em faixas de distância apresentou tendência de subestimar. Para todos os fatiamento testados (B, C, D, E e F), a distribuição dos erros apresentou maior simetria do que no método A, com médias e medianas mais próximas de zero e com medianas mais próximas dos valores das médias, apresentando menor variação e maior coerência nos resultados.

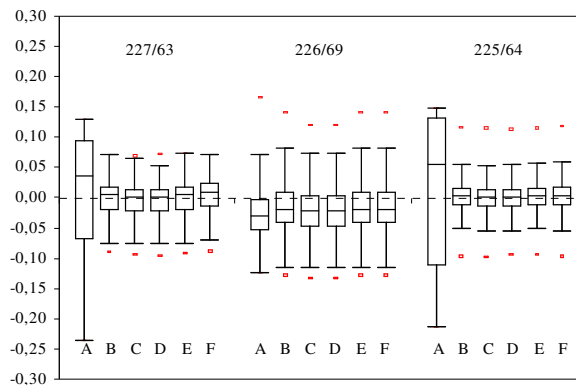


Figura 5. Análise do método A e do método baseado em distância segundo critérios B, C, D, E e F.

Na cena 226/69, a média dos erros do método A foi maior do que a média dos erros de B, E e F (**Tabela 1**), e a mediana estava mais afastada da média e de zero, tendendo a superestimar o incremento. Esta análise mostra que o posicionamento das nuvens tem uma importância grande na estimativa de incrementos, e que o impacto é maior quando se utiliza o método A. A seção que segue apresenta a distribuição espacial dos erros das estimativas, apontando para regiões de maior e menor impacto de acordo com métodos e critérios utilizados.

4. Distribuição espacial dos erros das estimativas de incremento

A análise da distribuição dos erros possibilitou comparar espacialmente o resultado das estimativas e identificar situações em que o posicionamento das nuvens pode produzir erros maiores ou menores, possibilitando orientar o processo de escolha de imagens.

A avaliação das nuvens foi realizada para os métodos A, B, E e F. Como os resultados obtidos utilizando os critérios B, E e F são similares, são apresentados apenas os resultados do método de distância utilizando o critério B, que obteve melhores desempenhos dentre os critérios testados e o de mais fácil implementação, pois utiliza 20 faixas de distâncias, contra as 84 e 300 dos métodos E e F, respectivamente.

A **Figura 6** mostra a distribuição espacial dos erros, onde a escala varia de -0.25 a $+0.20$, representando subestimação de 25% e superestimação de 20%, respectivamente. Nos mapas produzidos, a cor azul indica regiões de subestimação, a cor vermelha indica regiões de superestimação e a verde indica valores cujo erro é próximo de zero. Quando o centro da nuvem hipotética aproxima-se do limite da imagem, o tamanho da nuvem é reduzido, gerando erros menores devido ao efeito da borda. Assim, as análises sobre os erros se restringiram a porção central das imagens apenas.

Observa-se na **Figura 6** que em todas as cenas, em que o incremento foi estimado pelo método A, as regiões com valores extremos são maiores do que as do método B. No método A há uma superestimação do incremento quando a nuvem está posicionada sobre as áreas onde predomina cobertura florestal, devido à suposição de que o incremento nas áreas sob nuvem ocorre na mesma proporção do incremento nas áreas observadas. Quando a nuvem está posicionada em áreas desflorestadas e com dinâmica acentuada, pode ocorrer subestimação do incremento. As áreas que apresentam estimativas com erros próximos de zero são menores, quando comparadas com o método B.

O método B produziu resultados melhores do que o método A em todas as cenas, entretanto, os resultados foram menos satisfatórios na cena 226/69. Isso se deve a distribuição espacial do desmatamento na imagem. Na região que apresentou superestimação a quantidade

de incremento era menor do que no restante da imagem. Os melhores resultados foram produzidos quando a nuvem estava posicionada em áreas com grandes extensões de cobertura florestal. Este é um requisito importante e deve ser observado durante a escolha de imagens.

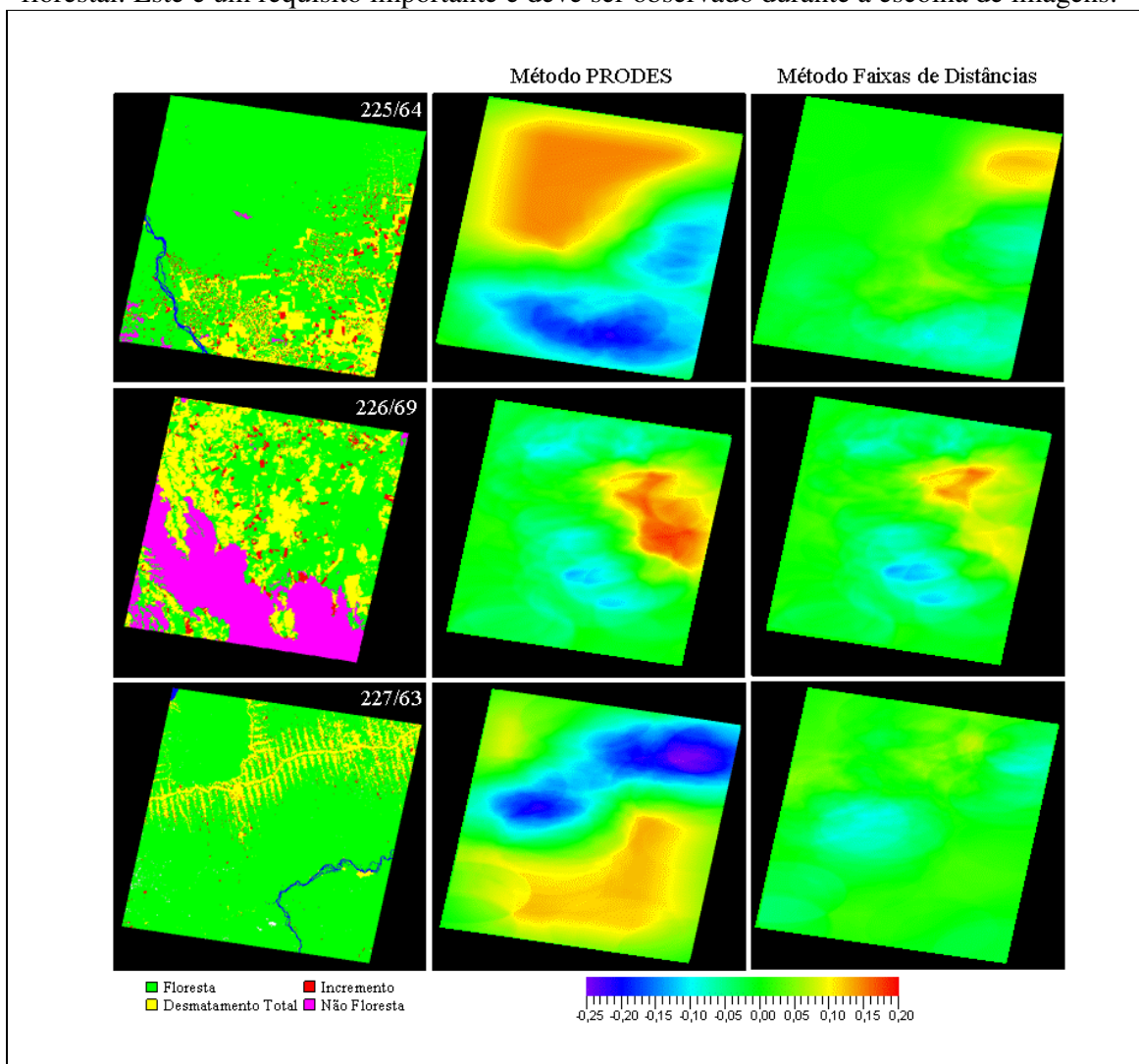


Figura 6. Distribuição espacial dos erros das estimativas de incremento segundo métodos A e B nas cenas 225/64, 226/69 e 227/63, respectivamente.

Devido à ponderação baseada na proporção do incremento observado em cada faixa de distância, a estimativa do método B se ajusta ao padrão de cada cena possibilitando capturar diferentes dinâmicas dentro das faixas de desmatamento e do alcance estabelecido.

5. Conclusões e Recomendações

A estimativa dos incrementos baseada em faixas de distância apresentou em média menor erro do que o método utilizado no Prodes, ajustando-se melhor ao padrão de cada cena. Dentre os critérios testados, o critério B, com faixas de distância com largura de 250m e alcance de 5.000m mostrou um desempenho superior ou equivalente aos outros critérios testados, com a vantagem de ser mais simples de ser implementado. A melhor condição para a aplicação deste método é quando a cobertura de nuvem está sobre áreas de floresta. Incrementos em regiões distantes de áreas desflorestadas, situadas fora do alcance estabelecido, não são estimados.

Uma desvantagem deste método em relação ao utilizado no Prodes é o custo operacional, pois acrescenta um maior número de procedimentos devido ao estabelecimento das faixas de distância. Este procedimento pode ser utilizado em estudos menos abrangentes que o Prodes, que envolvam um número menor de imagens.

Uma mudança importante no Prodes em relação às estimativas de incremento em áreas sob nuvem foi a inclusão de informações parciais de outros sensores para as cenas com nuvens, desta forma, os erros são minimizados.

Uma forma de minimizar erros decorrentes das estimativas no Prodes é considerar durante a seleção de imagens que apresentam nuvens que as estimativas podem ser afetadas pelo posicionamento da cobertura de nuvens, da seguinte forma:

- Cobertura de nuvem sobre grandes extensões de floresta – Ocorre superestimativa do incremento, principalmente quando a área observada apresenta muitos incrementos, pois é feita uma extrapolação do incremento para a área não-observada.
- Cobertura de nuvem sobre área com desflorestamento – Ocorre subestimativa do incremento, principalmente quando a área observada apresenta poucos incrementos em relação à área não-observada.
- Cobertura de nuvem sobre regiões com distribuição espacial uniforme de floresta e desmatamento - Nesta condição, as estimativas podem se aproximar mais da realidade, principalmente se o incremento sob nuvens apresentar um padrão similar ao incremento observado e ao da imagem como um todo.

Embora os resultados apresentados neste trabalho tenham indicado procedimentos importantes para a minimização de erros na estimativa do incremento em áreas não-observadas, outros testes devem ser realizados para explorar diferentes distribuições e padrões espaciais de cobertura de nuvens e de desflorestamento.

Referências

Alves, D. S.; **An analysis of the geographical patterns of deforestation in Brazilian Amazon in the 1991-1996 period. In: Process of land Use and Forest Change in the Amazon.** University of Florida Press, 2002, Cap. 3, p. 95-106.

Câmara, G.; Valeriano, D.; Vianei, J. V. **Metodologia para o cálculo da taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal.** São José dos Campos, INPE, 2005. INPE. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/prodes>>.

Fearnside, P. M. Spatial concentration of deforestation in the Brazilian Amazon. **AMBIO**. v.15, n. 2, p.72-79, 1986.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Estimativas anuais do desflorestamento desde 1988. Projeto PRODES: Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite. 2006. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2005.htm> Acesso em: 15 nov. 2006.

Motta, M.; Cordeiro, J.P.C.; Valeriano, D.M. Using LEGAL - Map Algebra - as a tool to support estimation of Amazonian Deforestation. **SELPER - XI Simposio Latinoamericano sobre percepción remota y sistemas de informacion espacial**, 2004, Santiago. CD-ROM, 2004.

Shimabukuro, Y.E., Duarte, V., Mello, E.M.K., Moreira, J.C. **Apresentação da metodologia de criação do PRODES digital.** 2000 (INPE-7520-PUD/41). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2000.

Skole, D.L.; Tucker, C.J., Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science**, p. 1905-1910, 1993.

Valeriano, D.M.; Mello, E. M. K.; Moreira, J.C.; Shimabukuro Y. E.; Duarte V., Souza, M.I.; Santos J. R. dos; Barbosa C.C.; Souza R. C. M. de.; 2004, Monitoring Tropical Forest from Space: The Prodes Digital. Project. XXth Congress International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Istanbul:ISPRS), **ISPRS Proceedings**, volume XXXV, part B, commission-7, p.272 ff