

Monitoramento do desflorestamento em escala global: uma proposta baseada nos projetos PRODES Digital e DETER

Valdete Duarte¹
Paulo Roberto Martini¹
Yosio Edemir Shimabukuro¹
Ramon Morais de Freitas¹
Egidio Arai¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{valdete, martini, yosio, ramon, egidio}@dsr.inpe.br

Abstract. The purpose of this work is to propose a method to monitor deforestation areas in a global scale. It is based on the method used by PRODES Digital and DETER projects performed by INPE. The availability of MODIS sensor data with moderate spatial and high temporal resolutions is appropriate for this kind of study. The MODIS high accuracy of georeferencing is the other important characteristics to be considered in global monitoring. In this method, the Linear Spectral Mixture Model is used to generate the fraction images to reduce the data volume and also to enhance the specific ground targets. For example, vegetation fraction can be used for analyzing vegetation condition, soil fraction shows the non vegetated areas, and shade fraction highlights the water bodies, burned areas and also discriminates the forest and non forested areas. Currently, this method has been proposed for monitoring South American Amazonia (Panamazon project). The preliminary findings of Panamazon project are presented showing the feasibility of the proposed method for global monitoring. In addition, some MODIS acquired over Africa countries in 2001, 2002 and 2006 show the intra and inter annual variations of land cover that can be addressed by this proposed method.

Palavras-chave: Deforestation, MODIS, Spectral Linear Mixture Model, Panamazon, África, Desflorestamento, MODIS, Modelo Linear de Mistura Espectral, Panamazônia, Africa.

1. Introdução

Em uma escala global, o processo de desflorestamento e sua consequência no futuro tem sido investigado por diversos grupos de pesquisa nos últimos anos (McGuffie, 1995; Rudel e Roper, 1997; Kirby et al., 2006; Rudel, 2007). O monitoramento e avaliação de desflorestamento em florestas tropicais vem sendo realizado com sucesso pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 1978 através de imagens dos sensores MSS, TM e ETM+ da série Landsat. O PRODES (Projeto de Estimativa do Desflorestamento da Amazônia) realizado pelo INPE com apoio do Ministério do Meio Ambiente é utilizado oficialmente pelo governo Brasileiro para ações de prevenção e controle do desflorestamento (Duarte et al., 2003). A metodologia do PRODES Digital (Duarte et al., 1999; Shimabukuro et al., 1998) baseia-se no modelo linear de mistura espectral (Shimabukuro e Smith, 1991) e na classificação não supervisionada por regiões das imagens fração geradas por este modelo. Com o objetivo de fornecer informações para a atividade de fiscalização, ou seja, detectar áreas que estão sendo desflorestadas, em março de 2004 foi implantado oficialmente pelo INPE o Projeto de Detecção de Áreas Desflorestadas em Tempo Real (DETER) (Shimabukuro et al., 2005) como parte das atividades do Grupo Permanente de Trabalho Interministerial (GPTI), coordenado pela Casa Civil. Segundo Shimabukuro et al. (2005), a implementação do Projeto DETER foi uma consequência da experiência adquirida pela equipe envolvida nos Projetos PRODES Analógico e PRODES Digital, e pela disponibilidade de dados do sensor MODIS com alta resolução temporal (1 a 2 dias) e alta precisão de georeferenciamento. Para manter a consistência das metodologias do PRODES (Analógico e

Digital) (Shimabukuro et al., 1998; Duarte et al., 1999), o DETER utiliza imagens do MODIS com características espectrais semelhantes ao do sensor TM Landsat utilizadas por estes projetos, ou seja, com imagens obtidas nas faixas espectrais do visível (vermelho), infravermelho próximo e infravermelho médio. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar a potencialidade do método proposto para o monitoramento das áreas desflorestadas nas regiões tropicais em escala global. Nesse sentido, serão apresentados alguns resultados preliminares do monitoramento da região tropical da América do Sul e da África.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a região de floresta tropical nos continentes Africanos e Sul-Americanos (**Figura 1**).

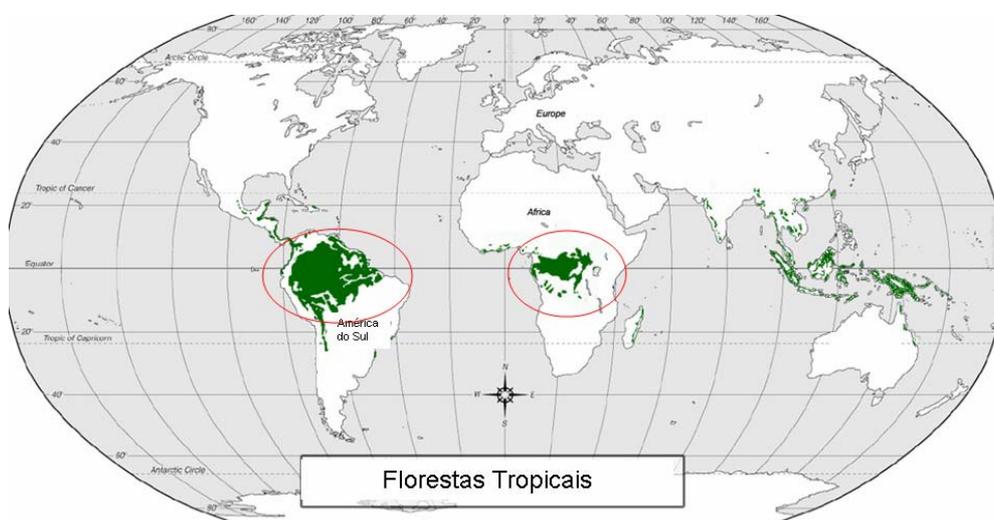


Figura 1. Localização da área de estudo.

Adaptado de (<http://www.mongabay.com/images/rainforests/>).

Os países do continente africano cobertos na área de estudo são: Togo, Berien, Níger, Nigéria, Camarões, República Centro Africana, Chade, Sudão, Guiné Equatorial, São Tomé e Príncipe, Gabão, República Democrática do Gongo, República do Congo, Angola, Burendi e Ruanda. Para a região sul americana os países panamazônicos são: Bolívia, Equador, Colômbia, Peru, Venezuela, Guiana, Suriname, Brasil e Guiana Francesa.

2.2 Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas as imagens MODIS composição 16 dias (produto MOD13, vegetation indices) adquiridas nas estações chuvosa (Fevereiro) e seca (agosto), para os anos de 2001 a 2006. Foram utilizadas as imagens composições das bandas RED, NIR e MIR.

2.3. Metodologia

A metodologia consiste em um primeiro momento obter um mapa contendo a distribuição espacial de toda floresta tropical úmida da América do Sul e África, além da rede de drenagem. Para a obtenção desses dois mapas iniciais, foram utilizados os mosaicos

GEOCOVER (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>), pelo fato deles estarem ortorretificados, apresentando, assim, alta qualidade na geometria dos temas mapeados. O tamanho de pixel do GEOCOVER é reamostrado para 100 metros, e as imagens que compõem estes mosaicos são referentes aos anos de 1999 e 2000.

O processamento destes mosaicos consiste na geração das imagens frações derivadas do modelo linear de mistura espectral, com o objetivo de realçar feições de interesse e ao mesmo tempo reduzir a dimensionalidade dos dados a serem processados. A seguir, o procedimento consiste em fatiar as imagens frações, seguida da tarefa de edição matricial feita na tela do PC pelo fotointérprete que corrige o mapa obtido automaticamente pelo computador.

Após a elaboração deste mapa inicial, contendo a distribuição da floresta tropical úmida, referente ao período de 1999 e 2000, são utilizadas as imagens MODIS do ano de 2005 para avaliar, em cada um dos países que compõem as regiões panamazônicas e panafricanas, a perda da floresta tropical úmida ocorrida durante o período.

O monitoramento global anual de toda a floresta tropical úmida da América do Sul e da África tem, portanto, como mapa base original o produto obtido com as imagens MODIS de 2005. O controle anual do desmatamento em toda região será feito com novas imagens MODIS a serem inseridas na base de dados.

A legenda do mapa base inicial é composta dos seguintes temas: Floresta, Floresta_Alterada, Cerrado, Vegetação_Secundária, Área_Queimada, Desmatamento_Total, Hidrografia, Nuvem, Cidade, Estrada, Porto e Outros.

As imagens MODIS utilizadas foram georeferenciadas e re-amostradas no software MRT – MODIS Reprojection Tool, desenvolvido especificamente para a manipulação de imagens voltadas para as áreas continentais (LAND). Este software é capaz de geo-referenciar, mosaicar, re-amostrar e recortar as imagens pré-processadas, (Manual MRT, 2001), sendo que primeiro passo consiste em registrar as bandas RED, NIR e MIR do produto MOD13 com 250m de resolução espacial. Todas as bandas são, então, georeferenciadas para projeção Lat/Long, devida à grande extensão longitudinal da área em estudo e para facilitar a integração com SIGs. A projeção Lat/Long impõe fornecer a resolução espacial do pixel em graus. Efetuando a simples conversão, tem-se que 250 metros equivalem aproximadamente a $0,0022496^\circ$, considerando a distância de cada grau como 60 milhas náuticas. As imagens assim processadas são salvas no formato geoTIFF em 16bits. O modelo da terra adotado é o WGS84.

A conversão para 8 bits utiliza o programa ConvGeoTiff (Arai et al., 2005) que foi desenvolvido no INPE com a finalidade de converter os dados MODIS de 16 bits para 8 bits. Este procedimento permite que sejam processados pelo software SPRING. O programa restaura o valor de reflectância de cada pixel através da equação $\text{Pixel} = \text{pixel} / 10.000$ e converte a reflectância para números digitais (ND), utilizando o intervalo -0.01 a 1.0 .

2.3.1 Modelo linear de mistura espectral

O modelo linear de mistura espectral é aplicado à 3 bandas MODIS (RED, NIR e MIR) visando estimar a proporção dos componentes, tais como solo, vegetação e sombra, para cada pixel. A partir da resposta espectral nas diversas bandas do MODIS, geram-se as imagens fração solo, vegetação e sombra (Shimabukuro e Smith, 1991). O modelo linear de mistura pode ser descrito por:

$$\begin{aligned}r_1 &= a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n + e_1 \\r_2 &= a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n + e_2 \\&\dots \\r_i &= a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{2n} x_n + e_m\end{aligned}$$

onde:

r_i : reflectância espectral na $i^{\text{ésima}}$ banda espectral de um pixel;
 a_{ij} : reflectância espectral conhecida do $j^{\text{ésimo}}$ componente na $i^{\text{ésima}}$ banda espectral;
 x_j : valor a ser estimado de proporção do $j^{\text{ésimo}}$ componente dentro do pixel;
 e_i : erro de estimação para a $i^{\text{ésima}}$ banda espectral.

Os componentes puros de solo, sombra e vegetação foram selecionados para cada data através da interpretação visual.

2.3.2 Segmentação e classificação

A segmentação de imagem é uma técnica de agrupamento de dados, na qual as regiões espacialmente adjacentes podem ser agrupadas. Para realizar a segmentação é necessário definir dois limiares: a) o limiar de similaridade, valor que define a distância máxima em nível de cinza para agrupamento b) o limiar de área, valor de área mínima, dado em número de pixels, para que uma região seja individualizada (Bins et al., 1993). No presente trabalho o limiar de similaridade utilizado é igual a 8, definido após vários testes. O limiar de área foi definido como 4, o que significa que a área mínima considerada na segmentação equivale a 25 ha no terreno.

O classificador ISOSEG (Bins et al., op.cit.) é um algoritmo disponível no SPRING para classificar regiões de uma imagem segmentada. É um algoritmo de agrupamento de dados não-supervisionado, aplicado sobre o conjunto de regiões, que por sua vez são caracterizadas por seus atributos estatísticos de média e matriz de covariância. O limiar para a aceitação de cada classe foi de 75%.

2.3.3 Mapeamento e edição de imagens

Com a obtenção de todas as classificações, uma por fração e por data, segue-se para a análise de qual classe é melhor identificada por classificação. As classes identificadas são mapeadas para planos de informação diferentes. O passo subsequente é a edição matricial destes planos de informação, utilizando-se como base as imagens 6(R)2(G)1(B) do MODIS; assegurando-se, assim, a acurácia da classificação.

Na seqüência é composto um mosaico com as classes mapeadas para a obtenção do mapa de uso da terra. Exemplos destes mosaicos aparecem nas figuras do próximo ítem.

3. Resultados

Os procedimentos metodológicos descritos permitiram alcançar resultados muito interessantes que podem ser utilizados pelos pesquisadores envolvidos com os temas do projeto. O primeiro trata-se do Mapa da Cobertura Vegetal da Amazônia Sul Americana e o segundo apresenta o Mapa da Hidrografia da mesma região. Os mapas trazem diferenças significativas com aqueles disponíveis no contexto cartográfico. O primeiro atributo é que se trata de um mapa pioneiro. Os limites da assinatura do domínio tropical panamazônico estão apresentados segundo uma base cartográfica de reconhecida e alta categoria tanto na escala regional (3.000.000), quanto em escala de mais detalhe (250.000 e 100.000). O segundo atributo importante trata de fidelidade temática, ou seja, os temas dispostos foram extraídos a partir de um procedimento bem definido, descrito anteriormente, podendo ser comparado ou repetido conforme recomenda a metodologia científica. Diferem assim, fundamentalmente, de outros mapas publicados que foram frutos de trabalhos de compilação, a partir de vários métodos e de diferentes fontes de dados. O principal atributo talvez seja o fato de terem sido desenvolvidos, editados e disponibilizado em nível digital mas com o suporte dos intérpretes, o que lhes garante um maior índice de valor científico agregado. Pode-se afirmar que bases

temáticas panamazônicas tanto para hidrografia quanto para vegetação estão verdadeiramente disponíveis a partir destes primeiros resultados do projeto. As **Figura 2 e Figura 3**, mostram exemplos, em baixa resolução, dos mapas mencionados, editados em bancos de dados com ferramenta SPRING. Estas figuras mostram em primeiro plano os mapas regionais e, em destaque, um setor ampliado realçando a qualidade do mapeamento final.

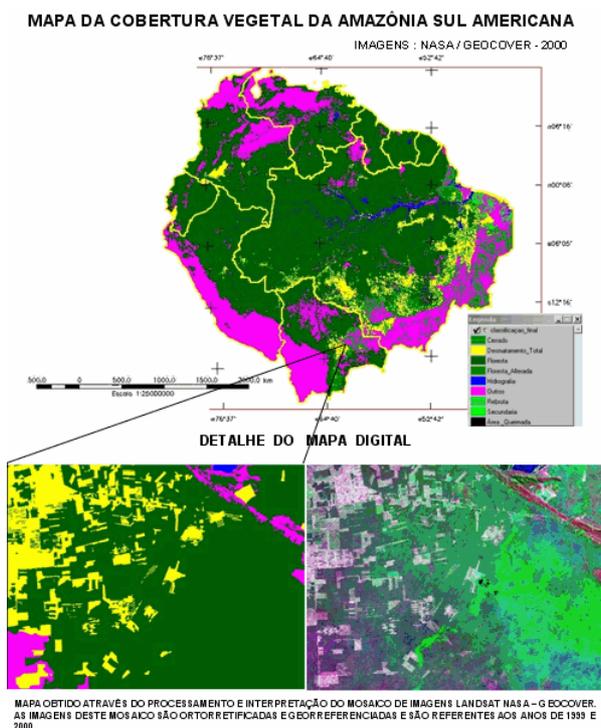


Figura 2. Mapa da Cobertura Vegetal da Amazônia Sul Americana editado a partir do Mosaico NASA/GEOCOVER do ano 2000.

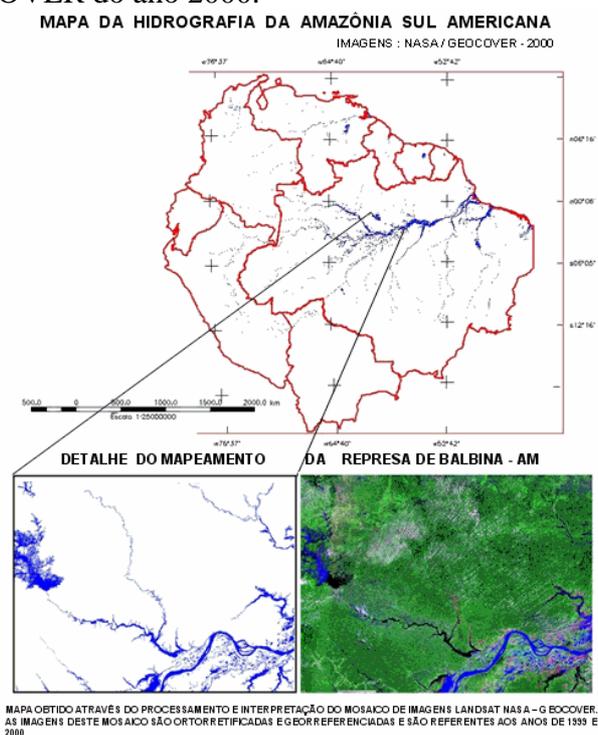


Figura 3. Mapa da Hidrografia Sul Americana editado a partir de Mosaico NASA-GEOCOVER do ano 2000.

Em domínio africano os mesmos procedimentos foram adotados porém a edição matricial dos temas da legenda estão em andamento. Mesmo assim algumas observações podem ser antecipadas a partir da leitura das imagens. A **figura 4** mostra imagens MODIS gravadas sobre a região da África equatorial e do seu entorno incluindo o sul do Deserto do Sahara e da grande região savânica ao sul do Equador africano. As imagens demonstram que os procedimentos metodológicos aplicados às imagens africanas realçam os mesmos atributos reconhecidos nas imagens da América do Sul. As áreas com predomínio de florestas tropicais mostram intenso brilho de verde enquanto que as áreas de savanas tanto ao norte quanto ao sul do domínio tropical apresentam cores mais avermelhadas indicando menos verdura. O domínio do deserto pelo albedo mais alto mostra continuamente assinaturas muito claras.

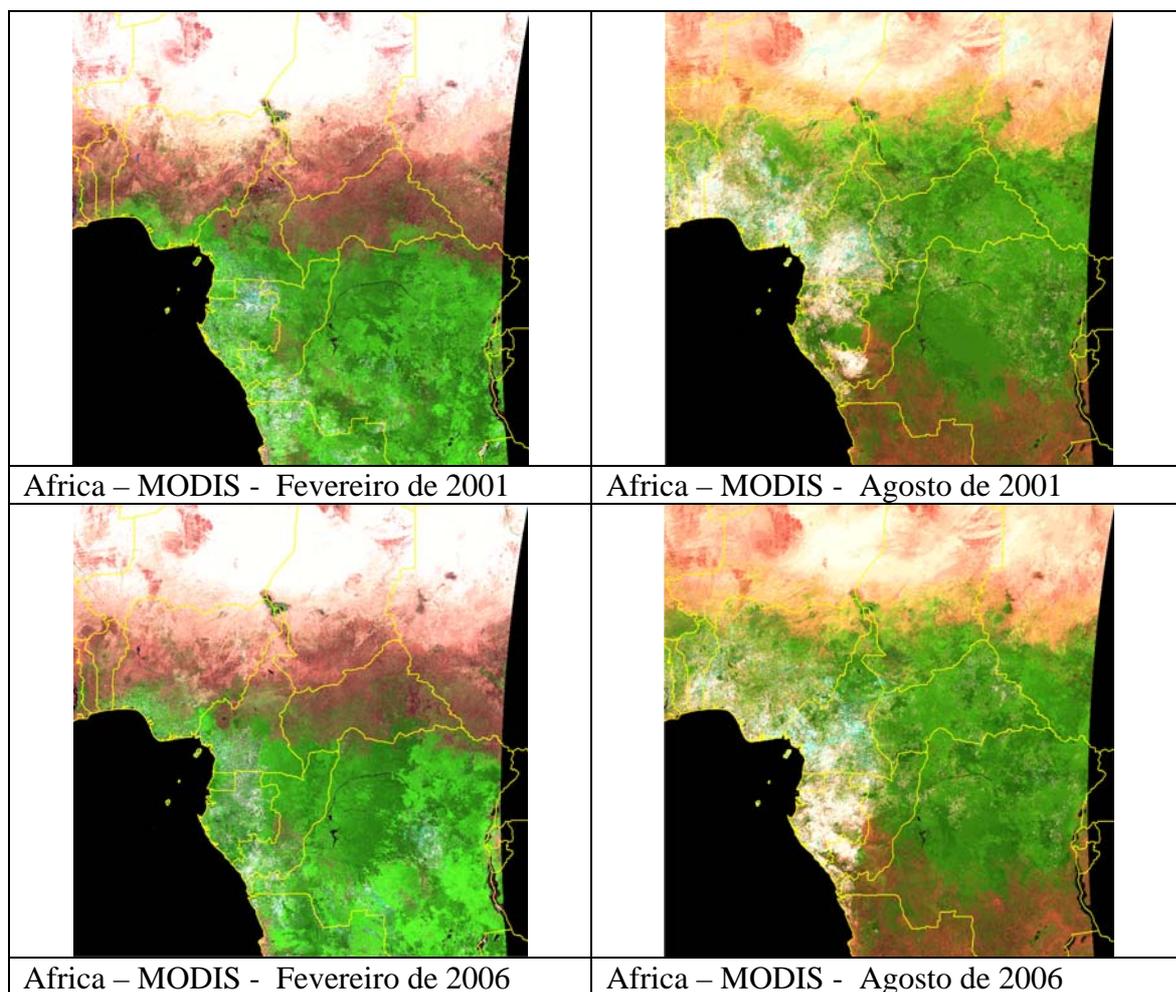


Figura 4. Imagens MODIS tomadas da África Equatorial incluindo a Região do Sahel.

As imagens da **figura 5** mostram como o comportamento sazonal entre os domínios tropicais panamazônico e panafricano aparecem nas imagens do sensor MODIS. O período seco com assinaturas mais extensivas das savanas e o recuo das feições típicas de florestas pertencem ao mês de agosto tanto na América do Sul quanto na África sul-equatorial. A assinatura das folhas verdes na região sul do Deserto do Sahara, entretanto, mostra um comportamento diferenciado: ela é mais regional e extensa no mês de fevereiro do que no mês de agosto em função da mudanças do período das chuvas. Pode-se afirmar que a variação fenológica da vegetação nas estações chuvosa e seca do cerrado (América) e Savana (África) tem o mesmo

comportamento fora da zona de influência do Deserto do Sahara. A assinatura do entorno do Sahel nas imagens da **figura 5** mostra que sua cobertura vegetal é mais brilhante e vigorosa em agosto do que em fevereiro.

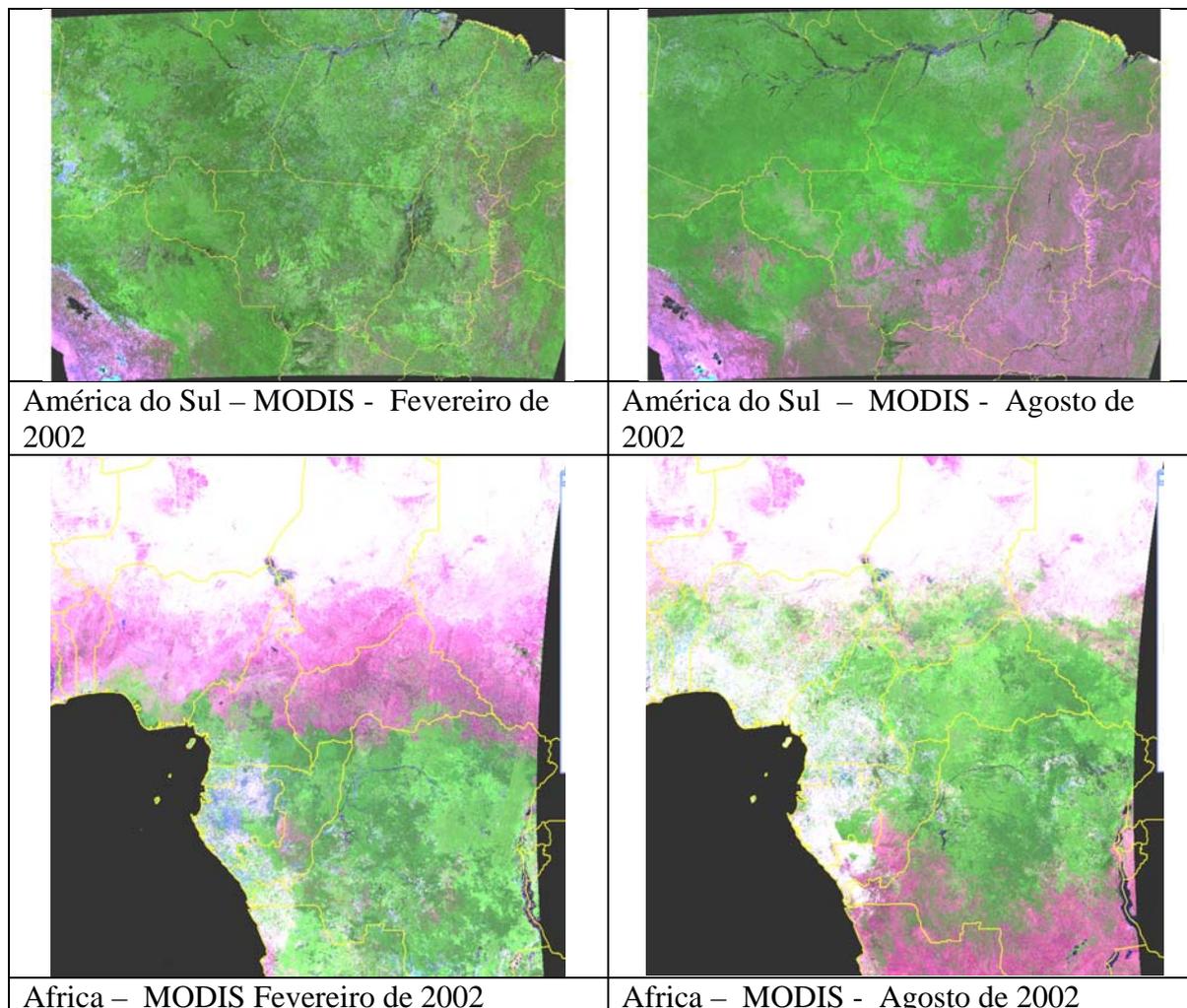


Figura 5. Imagens MODIS da América do Sul e da Africa tomadas nos períodos de chuvas e de secas para cada domínio equatorial.

4. Considerações Finais.

Os trabalhos realizados no contexto do Projeto Panamazônia II mostraram que as metodologias desenvolvidas para monitorar e detectar desflorestamentos no Brasil podem, com grande eficiência, serem aplicadas nos domínios amazônicos de todo o contexto sul americano. Este trabalho mostra que estas metodologias tem vigor suficiente para também serem utilizadas em domínios tropicais panafricanos.

Diante do conjunto destes resultados pode-se afirmar que os procedimentos desenvolvidos nos projetos PRODES e DETER têm demonstrado competências para ser aplicados em todas as regiões florestais que demandam monitoramento sistemático. Cabe então a recomendação para que tais metodologias sejam estendidas para todo o domínio tropical do planeta.

Referências

- Arai, E.; Freitas, R. M.; Anderson, L. O.; Shimabukuro, Y. E. Análise Radiométrica de Imagens MOD09 em 16bits e 8bits. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 16-21 abr. 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3983-3990. CD-ROM, On-line.
- Duarte, V.; Shimabukuro, Y.E.; Santos, J.R.; Mello, E.M.K.; Moreira, J.C.; Moreira, M.A.;Souza, R.C.M.;Shimabukuro, R.M.K.; Freitas, U.M. **Metodologia para criação do PRODES Digital e do banco de dados digitais da Amazônia – Projeto BADDAM**. São José dos Campos: INPE, 1999. 33p. (INPE-7032-PUD/035).
- Duarte, V.; Shimabukuro, Y. E.; Aulicino, L. C. M. Metodologia para padronizar e atualizar o banco de dados do projeto "Prodes Digital". In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 5-10 abr. 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2705 - 2712. CD-ROM, Online.
- Kirby, K.R.; Laurance F.W.; Albernaz K.K.; Schroth G.; Fearnside, M. P.; Bergen S.; Venticinque, M.E.; Costa, C.. **The future of deforestation in the Brazilian Amazon** *Futures, Volume 38, Issue 4, P. 432-453, May 2006.*
- McGuffie K., Henderson-Sellers A., Zhang H., Durbidge T. B., Pitman A. J.. **Global climate sensitivity to tropical deforestation** *Global and Planetary Change, Volume 10, Issues 1-4 P. 97-128, April 1995*
- Rudel, T. K. **Changing agents of deforestation: From state-initiated to enterprise driven processes, 1970–2000** *Land Use Policy, Volume 24, Issue 1, January, P. 35-41 2007*
- Rudel, T.K.; Roper, J. **The paths to rain forest destruction: Crossnational patterns of tropical deforestation, 1975–1990** *World Development, Volume 25, Issue 1, January Pages 53-65, 1997.*
- Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.
- Shimabukuro, Y. E.; Batista, G. T.; Moreira, J. C.; Mello, E. M. K.; Duarte, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat thematic mapper images of the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 3, p. 535-541, Feb. 1998. Publicado como: INPE-7126-PRE/3056.
- Shimabukuro, Y.E.; Duarte, V.; Moreira, M.A.; Arai, E.; Rudorff, B.F.T.;Anderson, L.O.; Espírito Santo, F.D.B.; Freitas, R.M.; Aulicino, L.C.M.; Maurano, L.E.P.; Aragão, J.R.L. **Detecção de áreas desflorestadas em tempo real: conceitos básicos, desenvolvimento e aplicação do Projeto**. São José dos Campos. INPE 2005 63p. (INPE-12288-RPQ/769/A)