



ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X

www.agro.unitau.br/ambi-agua

E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br

Tel.: (12) 3625-4116

Avaliação de índices de vegetação MODIS para detecção de desmatamentos na Amazônia (doi:10.4136/ambi-agua.12)

**Antonio Henrique Correia; Antonio Roberto Formaggio;
Yosio Edemir Shimabukuro; Valdete Duarte**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Coordenação de Observação da Terra / Divisão de Sensoriamento Remoto
Av. dos Astronautas, 1758; 12227-010 São José dos Campos (SP), Brasil
E-mail: {correia, formag, yosio, valdete}@dsr.inpe.br.

RESUMO

Os índices de vegetação NDVI e EVI obtidos a partir de dados MODIS (25m e 50m, reflectância de superfície) foram avaliados com relação à possibilidade de detectar e monitorar áreas de desmatamentos na Amazônia. Além disso, foi também proposto o índice DNRG [Diferença Normalizada entre as bandas do Vermelho (Red) e do Verde (Green)], com o mesmo objetivo. Avaliou-se a qualidade radiométrica dos dados multidatas MODIS, com o objetivo de verificar a possibilidade de usar índices de vegetação para gerar mapas de desmatamento. A acurácia interna das composições multidatas MODIS foi avaliada, tendo fornecido um valor de erro de localização menor que 1 pixel (< 25m) e, portanto, não são necessárias correções geométricas. A potencialidade dos produtos MODIS reflectância de superfície foi avaliada na região da Terra do Meio (Estado do Pará, Brasil, entre as latitudes 06°00'S a 08°00'S e as longitudes 51°00'W a 54°00'W), utilizando-se o classificador supervisionado de mínima distância euclidiana. Exatidões globais superiores a 87% foram obtidas, demonstrando uma boa potencialidade dos produtos MODIS, quando utilizados em sistemas de detecção de desmatamentos em tempo quase real

Palavras-chave: desmatamento; Terra do Meio (Brasil); índices de vegetação; sensor MODIS.

Evaluation of MODIS vegetation indices for detecting deforestation in Amazonia

ABSTRACT

Vegetation indices (NDVI and EVI) obtained from MODIS products (25m and 50m, surface reflectance) were evaluated in relation to the possibility of detecting and monitoring deforestation areas in Amazonia. A new vegetation index, the DNRG (Normalized Difference between Red and Green spectral bands), was proposed with the same objective. The radiometric quality of the multi-date MODIS products was evaluated to verify the possibility of using vegetation index to generate deforestation maps. The internal accuracy of multi-date composites were evaluated providing a value of positional error less than 1 pixel (< 25m) and, consequently geometric corrections were not necessary. The potential of surface reflectance MODIS products was evaluated in the region of Terra do Meio (Pará State, Brazil, between latitudes 06°00'S to 08°00'S and longitudes 51°00'W to 54°00'W), using the Euclidian minimum distance supervised algorithm of classification. Global accuracies above 87% were

obtained demonstrating a good potential for using these products in systems for deforestation detection in near real time.

Keywords: deforestation; Terra do Meio (Brazil); vegetation indices; MODIS sensor.

1. INTRODUÇÃO

As transformações na cobertura e uso da terra estão ocorrendo de forma acelerada, principalmente na região dos trópicos. Nas últimas duas décadas, porções significativas de florestas tropicais foram desmatadas como resultado da expansão das fronteiras agrícolas e da exploração madeireira, atingindo taxas anuais da ordem de 25.000km², como, por exemplo, em 2003 (INPE, 2005a).

Até recentemente, os dados de satélites de sensoriamento remoto proporcionavam apenas duas opções para análises de áreas consideradas grandes (ou seja, da ordem de milhares de km²), como as da Amazônia: (a) porções de imagens de resolução espacial grosseira, adquiridas por satélites/sensores como o NOAA/AVHRR ou o SPOT/Vegetation, que se caracterizam por alta repetitividade temporal; ou (b) mosaicos de imagens de média resolução espacial obtidas por sistemas como o Landsat/TM, o SPOT/HRV ou o CBERS/CCD, cuja repetitividade temporal é baixa (16 dias para o Landsat e 26 dias para os outros dois sistemas).

Os sensores de resolução mais detalhada, como os citados em (b), acima, são considerados de grande utilidade para mapeamento e monitoramento em regiões onde os tamanhos dos talhões de interesse são médios ou pequenos. Porém, a limitada abrangência espacial das imagens desses sensores, a baixa repetitividade temporal contraposta à alta susceptibilidade à cobertura de nuvens, o elevado custo e a quantidade elevada de dados acabam tornando esses sensores menos viáveis para empreendimentos nacionais ou, até mesmo, regionais.

Com o lançamento dos satélites Terra (dezembro/1999) e Aqua (maio/2002), ambos portando o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), passa a ser disponibilizada uma nova perspectiva, com resoluções espaciais de 25m / 50m / 100m e repetitividade temporal quase diária para praticamente toda a superfície terrestre.

Os instrumentos dos satélites Terra e Aqua dão suporte aos objetivos do programa de medições sistemáticas da NASA/ESE (National Aeronautic and Space Administration / Earth Science Enterprise), cujo objetivo é avaliar como o Planeta está mudando e quais as conseqüências dessas mudanças para a vida na Terra (NASA, 2005).

Os satélites Terra e Aqua carregam o instrumento MODIS, que imageia uma faixa da ordem de 2.330km ("swath width") e, a cada dia, recobre praticamente a superfície terrestre inteira. Esse instrumento é um sistema radiômetro-imageador com resoluções geométricas de 250, 500 e 10m, atuando em 36 bandas espectrais desde o visível até o infravermelho termal (Tabela 1). As primeiras sete bandas destinam-se prioritariamente ao sensoriamento remoto da superfície terrestre com resolução de 25m para as bandas 1 (620-670nm) e 2 (841-876nm) e 5m para as bandas de 3 a 7 (459-479, 545-565, 1230-1250, 1628-1652, 2105-2155nm, respectivamente). As outras bandas destinam-se preferencialmente a estudos sobre áreas oceânicas e sobre atmosfera (Running et al., 1994; Zhan et al., 2002).

Os dados MODIS propiciam a geração de 44 diferentes tipos de produtos que os pesquisadores de várias disciplinas das geociências estão usando para estudos relacionados com mudanças globais, incluindo oceanografia, biologia e ciências atmosféricas. Dentre estes tipos de produtos MODIS, podem ser citados, por exemplo, as imagens: reflectância de

superfície, temperatura de superfície, índices de vegetação e outros, com disponibilidade diária e em composições de 8, 16 e 30 dias, composições essas que se constituem em mosaicos, visando minimizar o problema de nuvens (NASA, 2005).

Com relação às resoluções espaciais intermediárias, análises de Strahler et al. (1999) mostraram que muitas das mudanças de uso e cobertura da terra ocasionadas por ações antrópicas possuem escalas espaciais próximas de 25m e que as bandas mais apropriadas para a detecção dessas mudanças estão localizadas na região do visível e do infravermelho próximo. São, portanto, requisições que podem ser amplamente atendidas pelas imagens MODIS.

Tabela 1. Características gerais do instrumento MODIS.

Órbita	705km, sol-síncrona, quase-polar, cruzando o Equador às 10:30 h (Terra) e às 13:30 h (Aqua)
Faixa de imageamento	2330km \pm 55° cross-track
Bandas espectrais	36 bandas, entre 405 e 14.385nm, com calibração a bordo
Taxa de dados	11mbps (pico)
Resolução radiométrica	12 bits
Resolução espacial (a nadir)	25m (bandas 1 e 2) 5m (bandas 3 a 7) 10m (bandas 8 a 36)
Repetitividade	Diária (para latitudes norte acima de 30°) 2 dias (para latitudes abaixo de 30°)
Precisão de geolocalização	< 15m (1 sigma) a nadir
Registro entre bandas para as bandas 1 a 7	< 5m na direção transversal < 1m na direção da linha de voo

Fonte: Zhan et al. (2002).

Desta forma, é de grande interesse que os dados e produtos MODIS sejam avaliados quanto à aplicabilidade para análises em escalas regionais, principalmente, na forma de composições multitemporais que possuem um grande potencial de aplicação para regiões com alta probabilidade de cobertura de nuvens, como é o caso da região Amazônica.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi o de avaliar a aplicabilidade de dois índices de vegetação amplamente conhecidos (NDVI e EVI) e um proposto neste trabalho [DNRG, Diferença Normalizada entre as bandas do Vermelho (Red) e do Verde (Green)] obtidos a partir de composições MODIS de 8 dias (ou seja, reflectância da superfície com correção atmosférica nas resoluções de 250 e 5m), quanto à possibilidade de seu emprego no monitoramento e na detecção de desmatamentos na região Amazônica em tempo quase-real. As qualidades radiométrica e geométrica dessas composições também foram analisadas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo, na região denominada Terra do Meio, abrange um território de 330 x 221 km² e localiza-se aproximadamente nas latitudes 06°00'S a 08°00'S e longitudes 51°00'W a 54°00'W, e a imagem MODIS que a recobre pertence à quadrícula ("tile") h12v09 (Figura 1).

A Terra do Meio estende-se por cerca de oito milhões de hectares entre os rios Xingu e Tapajós. Ali estão as últimas áreas ainda relativamente intactas de floresta Amazônica ao sul do rio Amazonas. A atuação antrópica na região originou-se com a invasão por garimpeiros na década de 70 e por madeireiros no final dos anos 80, motivados pela existência das maiores concentrações remanescentes de mogno no Brasil, as quais estão localizadas na Terra do Meio e nas terras indígenas dos arredores. A exploração madeireira e a pecuária são, atualmente, as principais forças motivadoras da apropriação ilegal de terras nessas localidades, justificando os estudos desenvolvidos para monitorar os desmatamentos que vêm ocorrendo na região.

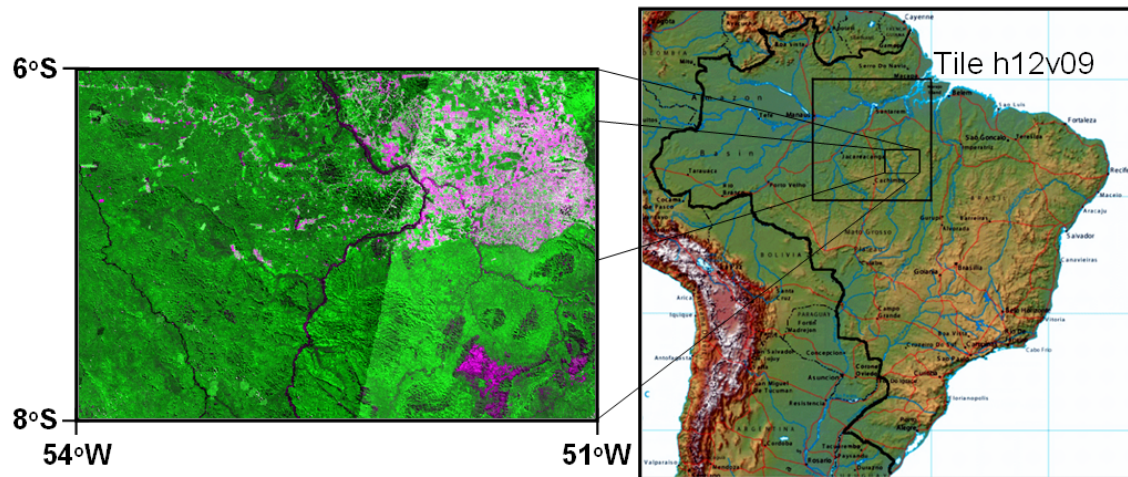


Figura 1. Área de estudo, localizada na Terra do Meio, no Estado do Pará.

2.1. Composições MODIS

Os dados “MODIS Surface-Reflectance Product (MOD09)” são computados como MODIS nível 1B nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 (centradas em 648nm, 858nm, 470nm, 555nm, 1240nm, 1640nm, e 2130nm, respectivamente), correspondendo à reflectância espectral de superfície para cada banda como se tivesse sido medida no nível de terreno (ou seja, sem a interferência dos efeitos de espalhamento e de absorção atmosférica) (NASA, 2005).

Por outro lado, os produtos “MODIS Vegetation-Index (VI)”, representados pela sigla MOD13, destinam-se a avaliações das condições globais da vegetação da superfície terrestre, permitindo o monitoramento da atividade fotossintética da vegetação em suporte a detecções de mudanças e a interpretações fenológicas e biofísicas. Esses produtos são oferecidos na forma de mapas de índices de vegetação, que mostram variações espaciais e temporais do vigor da vegetação, sendo derivados em intervalos de 8 ou 16 dias ou, ainda, mensalmente, para o monitoramento sazonal e interanual da vegetação terrestre (NASA, 2005). As referidas composições são obtidas pela seleção dos *pixels* com o máximo valor de NDVI (Anderson, 2004) dentro dos intervalos considerados (8, 16 ou 32 dias).

No presente trabalho, objetiva-se contribuir para os esforços de monitoramento da vegetação amazônica em tempo quase-real e, assim, busca-se auxiliar no alerta de novos desmatamentos ocorridos durante o menor intervalo de tempo possível. Desta forma, optou-se pelo uso dos produtos MOD09, que representam a reflectância da superfície com correção atmosférica, o MOD09A1 (bandas de 1 a 7 com 5m) e o MOD09Q1 (bandas 1 e 2 com 25m), que são processados como composições de 8 dias dos produtos diários MOD09GHK (5m) e MOD09GQK (25m), respectivamente.

Duas composições de 8 dias foram selecionadas (produtos MOD09A1 e MOD09Q1), a primeira correspondendo ao período de 9 a 16/junho/2004 (denominada no presente trabalho como “**composição 1**”), e a segunda, correspondendo ao período de 25/junho a 2/julho/2004 (aqui denominada “**composição 2**”). Esses dois períodos foram selecionados, em função da disponibilidade de mapas de desmatamentos produzidos pelo projeto DETER do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, também com imagens MODIS (INPE, 2005b), em 8/junho/2004 e em 22/junho/2004, que aqui foram usados como referência.

As composições MODIS foram convertidas da projeção Sinusoidal, em que são fornecidas, para as seguintes projeções: (1) UTM (*datum* SAD69), visando à comparação geométrica com as cartas topográficas; e (2) Policônica (*datum* SAD69), com a finalidade de confrontar os mapas de desmatamento produzidos pelo PRODES/INPE (a partir de imagens Landsat) e os obtidos aqui com as composições temporais do MODIS.

2.2. Base Cartográfica

Para a análise da qualidade geométrica das composições MODIS, foram utilizadas as cartas topográficas na escala de 1:250.000 produzidas pelo IBGE (1983), com os seguintes índices de nomenclatura: SB22-Y-A (MIR 196), SB22-Y-B (MIR 197), SB22-Y-C (MIR 223) e SB22-Y-D (MIR 224), convertidas para o meio digital via processo de alta qualidade geométrica e radiométrica.

Para garantir a confiabilidade geométrica das cartas digitais, todas as coordenadas planas (quadriculado UTM) e geográficas (cruzetas e cantos), disponíveis nas cartas topográficas, foram verificadas, uma vez que, são facilmente identificadas e as coordenadas teóricas são conhecidas. Desta forma, foram avaliados 802 pontos referentes às quatro cartas topográficas utilizadas, por meio de um aplicativo semi-automático desenvolvido na linguagem de programação *IDL* (*Interactive Data Language*). O valor máximo para o erro médio quadrático foi igual a 44,4m. Do total de pontos verificados, apenas três apresentaram erro local acima de 125m (máximo valor igual a 141,98m). Com isso, mais de 90% dos pontos apresentaram erros locais menores que 0,5mm na escala de 1:250.000. Desta forma, os erros encontrados foram menores que o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) planimétrico de cartas classe A, que estabelece um erro máximo aceitável de 0,5mm na escala da carta, em 90% dos pontos de controle utilizados (Brasil, 1986). Portanto, concluiu-se que as cartas digitais 1:250.000 são uma base confiável para obtenção de pontos de controle necessários para a avaliação geométrica das composições MODIS.

2.3. Dados de Desmatamento da Amazônia

A atividade anual de monitorar o desmatamento da Amazônia vem sendo realizada, sistematicamente, pelo Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia-PRODES e pelo Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real – DETER (INPE, 2005a, 2005b) com o uso de dados orbitais.

No presente trabalho, os dados históricos do PRODES digital, obtidos pela análise de imagens Landsat, foram complementados e registrados com dados de alerta de desmatamentos (DETER) para duas datas de referência (9 a 16/junho/2004 e 25/junho a 2/julho/2004), visando à obtenção de mapas temáticos atualizados com resolução espacial de 25m. Para maiores detalhamentos sobre a metodologia DETER, pode ser consultado Shimabukuro et al. (2005). Desta forma, a metodologia aqui proposta de avaliação dos mapas de desmatamento obtidos via composições MODIS foi referida aos mapas produzidos pelo INPE, dada a sua confiabilidade.

2.4. Avaliação da Qualidade Geométrica das Composições MODIS

No momento do lançamento, o sensor MODIS apresentava uma precisão de geolocalização de 1.7metros, e com os ajustes realizados posteriormente, em maio de 2000, a precisão já era de 15metros. Em dezembro de 2000, a precisão atingiu 5metros, conforme havia sido projetado (Anderson, 2004). Essa precisão deve ser verificada, principalmente, para composições multitemporais, que poderão ser utilizadas como fonte primária de dados de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) de desmatamento, cuja finalidade é a integração de diferentes bases de dados.

Para realizar a quantificação do erro interno e global das composições MODIS de 8 dias, foram selecionados pontos de controle nas cartas topográficas digitais, (*Seção 2.2*) que possuíam homólogos nas composições MODIS, com os seguintes requisitos: (1) mínima variância temporal; (2) qualidade (boa identificação nas cartas e nas imagens); (3) distribuição espacial, a mais uniforme possível, sobre toda a área de estudo; e (4) quantidade adequada de pontos para a obtenção de resultados representativos.

A avaliação da geometria interna das imagens foi realizada por meio da transformação de similaridade (Vergara et al., 2001). O erro global de posicionamento foi obtido por meio do erro médio quadrático total das coordenadas planas E e N, que correspondem aos pontos de controle (diferença entre a imagem e a carta).

2.5. Qualidade Radiométrica das Composições MODIS

Considerando que as imagens MOD09, ao serem produzidas, passam por um processo de correção atmosférica, é esperado que os dados obtidos para diferentes datas sejam altamente correlacionados, o que garante a homogeneização das respostas espectrais. Desta forma, é possível realizar análises quantitativas multitemporais, sem a necessidade de retificações radiométricas entre as imagens.

Essa suposição de homogeneização radiométrica deve ser avaliada, quando composições de imagens multitemporais são produzidas e, assim, foi realizada a avaliação radiométrica dessas composições, tendo sido empregada a transformação linear *Tasseled Cap* (Kauth; Thomas, 1976; Crist; Cicone, 1984; Huang et al., 2002).

2.6. Classificação das Composições MODIS

Segundo Cihlar (2000), estudos preliminares mostraram que as variações na geometria de visada de composições multitemporais para os casos de sensores de largos “swaths”, como é o caso dos produtos MODIS, causam diferenças radiométricas em *pixels* adjacentes ainda que correspondam ao mesmo tipo de cobertura, o que pode conduzir a erros de classificação. A variabilidade na reflectância é uma consequência das propriedades de BRDF de dosséis com textura rugosa. Para aquisições obtidas durante a manhã, em um pixel de floresta localizado na extremidade oeste da varredura, as sombras das árvores serão menores do que nos pixels captados na extremidade leste. A porcentagem de sombra afeta a reflectância bidirecional do pixel e os pixels obtidos das duas extremidades podem ficar adjacentes no mosaico temporal, criando manchas artificiais.

Para contornar esse problema, foram utilizados índices de vegetação, que visam amenizar diferenças sazonais relativas a ângulo solar e a efeitos da atenuação atmosférica observados para dados multitemporais. Dentre esses índices, usou-se o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), já amplamente conhecido, para a banda MODIS 2 [infravermelho próximo (NIR), em 841-876nm] e MODIS 1 [vermelho (R), em 620-670nm].

Outro índice utilizado foi o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), que melhora a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, produzindo uma saturação

mais lenta quando comparado com o NDVI (Anderson, 2004). O EVI foi calculado pela seguinte equação (Justice et al., 1998):

$$EVI = G * (NIR - R) / (L + NIR + C1 * R - C2 * B) \quad [1]$$

em que: **R** é a reflectância bidirecional na banda do vermelho (banda MODIS 1: 620-670nm); **NIR** é a reflectância bidirecional na banda do infravermelho próximo (banda MODIS 2: 841-876nm); e **B** é a reflectância bidirecional na banda do azul (banda 3: 459-479nm); **G=2,5** é o fator de ganho; **L=1** é o fator de ajuste para o solo, sendo o valor adequado em pixels com pequena fração de solo; e **C1=6** e **C2=7,5** são coeficientes de ajuste para efeitos de aerossóis da atmosfera.

Considerando que a reflectância do solo é, em geral, maior que a da vegetação nas faixas do vermelho e do verde, foi utilizado também o índice **DNRG** [Diferença Normalizada entre as bandas do Vermelho (**Red**) e do Verde (**Green**)], proposto no presente trabalho, para ampliar o realce entre as áreas desmatadas e as áreas com cobertura vegetal, pela expressão:

$$DNRG = (R - G) / (R + G) \quad [2]$$

em que: **R** é a reflectância bidirecional na banda do vermelho (banda MODIS1: 620-670nm) e **G** é a reflectância bidirecional na banda do verde (banda MODIS 4: 545-565nm).

É importante destacar que as bandas do azul e do verde, originalmente com resolução de 5m, foram reamostradas para 25m, pelo método bilinear (Mather 1999).

Para detecção das áreas desmatadas, foi utilizado o classificador supervisionado de mínima distância euclidiana (INPE, 2006), utilizando-se como dados de entrada as três imagens obtidas pelos índices **NDVI**, **EVI** e **DNRG**, além das amostras de treinamento referentes às classes: *floresta*, *não-floresta*, *água e desmatamento*, que foram baseadas em dados do PRODES digital.

2.7. Avaliação da Acurácia das Classificações MODIS

Para quantificar os resultados obtidos entre a verdade considerada [mapa temático do PRODES digital (Duarte et al., 1999, 2002)] e os resultados obtidos para as classificações MODIS, as estimativas de erro e acurácia, extraídas das matrizes de confusão, foram baseadas na metodologia descrita em Zhan et al. (2002).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Qualidade Geométrica das Composições MODIS

Para esta análise foram selecionados 30 pontos de controle bem distribuídos sobre a **composição 2** (que abrange o período entre 25/junho e 2/julho/2004), para obtenção dos parâmetros que descrevem a transformação de similaridade, por meio de ajustamento pelo método dos mínimos quadrados. Em seguida, esse modelo de transformação foi aplicado sobre 19 pontos de teste diferentes dos pontos de controle, visando à quantificação do erro médio quadrático (EMQ) referente à geometria interna das composições MODIS. Todos os 49 pontos foram utilizados para quantificar o erro global de posicionamento das imagens MODIS.

Na Tabela 2, são apresentados os resultados obtidos para o erro interno e global das composições avaliadas, podendo-se afirmar que a composição MODIS de 8 dias apresentou uma boa geometria interna, fato esse comprovado pelo erro médio quadrático total (erro interno) não ter ultrapassado 1 *pixel*.

Tabela 2. Avaliação do Erro Interno e Global das Composições MODIS.

ERRO	Nº DE PONTOS	EMQ Mínimo		EMQ Máximo		EMQ Total	
		(metros)	(pixel)	(metros)	(pixel)	(metros)	(pixel)
Interno	19	19,43	0,070	170,61	0,68	122,23	0,49
Global	49	0,34	0,001	325,23	1,30	157,84	0,63

Além da boa geometria interna, o erro global de posicionamento é compatível com a exatidão geodésica esperada para esse produto (ou seja, erro menor que 1 *pixel*, conforme o padrão cartográfico brasileiro), apesar da variabilidade da geometria de visada existente nessa composição de oito dias de dados MODIS, conforme apresentado na imagem da Figura 2, que representa a variação do ângulo zenital de visada para cada *pixel* da **composição 2** (25/junho a 2/julho/2004, para o produto MOD09A1 de 5m de resolução).

3.2. Qualidade Radiométrica das Composições MODIS

Para a análise da qualidade radiométrica das composições MODIS, os produtos MOD09A1 (bandas de 1 a 7 com resolução de 5m) foram convertidos para o formato *TIFF*, e, então, foram importados para o programa ENVI, onde foi realizada a transformação de *Tasseled Cap*, para as duas composições MODIS.

As análises das relações entre as imagens *Brightness* e *Greenness* para as duas composições MODIS mostraram-se ajustadas, o que indica uma boa homogeneização das respostas espectrais.

Com isso, pode-se dizer que os dados estão radiometricamente retificados, possibilitando a comparação das respostas espectrais das duas composições MODIS. Esse resultado comprova a boa qualidade do processo de correção atmosférica realizada para as duas composições MODIS utilizadas na presente pesquisa.

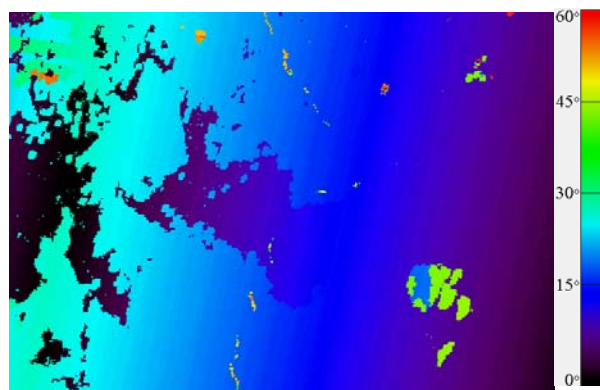


Figura 2. Variação do ângulo zenital de visada da “composição 2” (oito dias de dados MODIS).

3.3. Classificação das Composições MODIS

A partir de amostras de treinamento selecionadas sobre a **composição 1**, foram obtidos o vetor de médias amostrais de cada classe de cobertura presente na área e a respectiva classificação por mínima distância euclidiana. Esses vetores foram utilizados para obter a classificação da **composição 2**.

Após a classificação, foi utilizado o filtro da moda (janela 3x3) para eliminar *pixels* isolados e, em seguida, foram eliminadas áreas menores que 250.00m² (4 *pixels* de 25m), seguindo a metodologia do sistema DETER (Detecção de Desmatamento em Tempo Real) (INPE, 2005b).

Na Figura 3(a), é apresentada a imagem-referência, que mostra a realidade terrestre para a data da imagem ETM+/Landsat do dia 8 de junho de 2004 utilizada, onde os desmatamentos até agosto/2003 são mostrados em amarelo e os desmatamentos no ano seguinte, até a data da imagem usada, são mostrados em cor rosa. Nas Figuras 3(b) e 3(c), são apresentados os resultados finais de classificação obtidos para as duas composições MODIS usadas no presente trabalho.

Com base nas duas composições MODIS classificadas e nos mapas temáticos da imagem-referência, para as datas de 8/junho/2004 [Figura 3(a)] e 22/junho/2004, foram obtidas as matrizes de confusão apresentadas na Tabela 3. O mapa temático de referência do dia 22/junho/2004 não foi apresentado aqui devido à similaridade com o mapa do dia 8/junho/2004.

Para a **composição 1**, a acurácia de detecção para a classe *desmatamento* (AD=75,82%) não foi maior devido ao fato de que algumas áreas de desmatamento que apresentavam alguns tipos de cobertura vegetal (vegetação secundária) não foram melhor discriminadas pelo classificador, ocorrendo uma maior confusão com a classe *floresta* (21,85%). As áreas desmatadas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal (praticamente solos expostos), independente da dimensão espacial, foram bem classificadas.

Essa baixa discriminação se deve ao fato de que, nos mapas do PRODES, essas subclasses de desmatamentos são consideradas como uma única classe, além da segmentação utilizada e edição dos mapas, que produz áreas homogêneas, diferentemente da classificação obtida. A classe *não-floresta* (AD=28,22%) não foi bem classificada, em função de variações espectrais similares às respostas espectrais da classe *desmatamento* (25,26%) e *floresta* (46,38%). Uma das causas desse problema é a existência de uma região na imagem, que pertence à classe *não-floresta* [ver Figura 3(a)] e apresenta uma resposta espectral semelhante ao solo exposto. Apesar da acurácia de detecção para a classe *desmatamento* não ter sido alta, os erros de inclusão (24,18%) e omissão (20,78%) foram baixos.

Analisando os resultados obtidos para a **composição 2**, observa-se que a acurácia de detecção, para a classe *desmatamento*, foi maior (AD=84,94%) que o valor obtido para a **composição 1**, em função da melhor discriminação das áreas desmatadas que possuíam cobertura vegetal, provavelmente pelas diferenças de ângulos de visada entre uma composição e outra, que foram obtidas em diferentes datas de passagens do MODIS.

Em contrapartida, houve uma maior confusão dessa subclasse de desmatamento com a classe *floresta*, conforme pode ser visto no aumento da confusão ocorrida entre essas classes (de 2,30% para 4,92%). Da mesma forma que ocorreu com a **composição 1**, a classe *não-floresta* não foi bem classificada, em função, novamente, de alguma confusão com a classe *floresta* (28,02%) e *desmatamento* (40,91%). Para a **composição 2**, os erros de omissão (15,06%) e inclusão (29,41%) ficaram bem próximos aos obtidos para a **composição 1**.

Os valores da acurácia global obtidos para as duas composições foram bem próximos (89,44% e 87,62%), demonstrando a boa adequação do vetor de médias amostrais para as composições analisadas. É importante destacar que, de modo análogo ao ocorrido com a **composição 1**, as áreas de desmatamento com pouca ou nenhuma cobertura vegetal foram bem classificadas na **composição 2**, mesmo utilizando-se as médias amostrais da **composição 1**. Esse resultado pode ser visto na Figura 3(d), onde os polígonos de desmatamento estão destacados em vermelho.

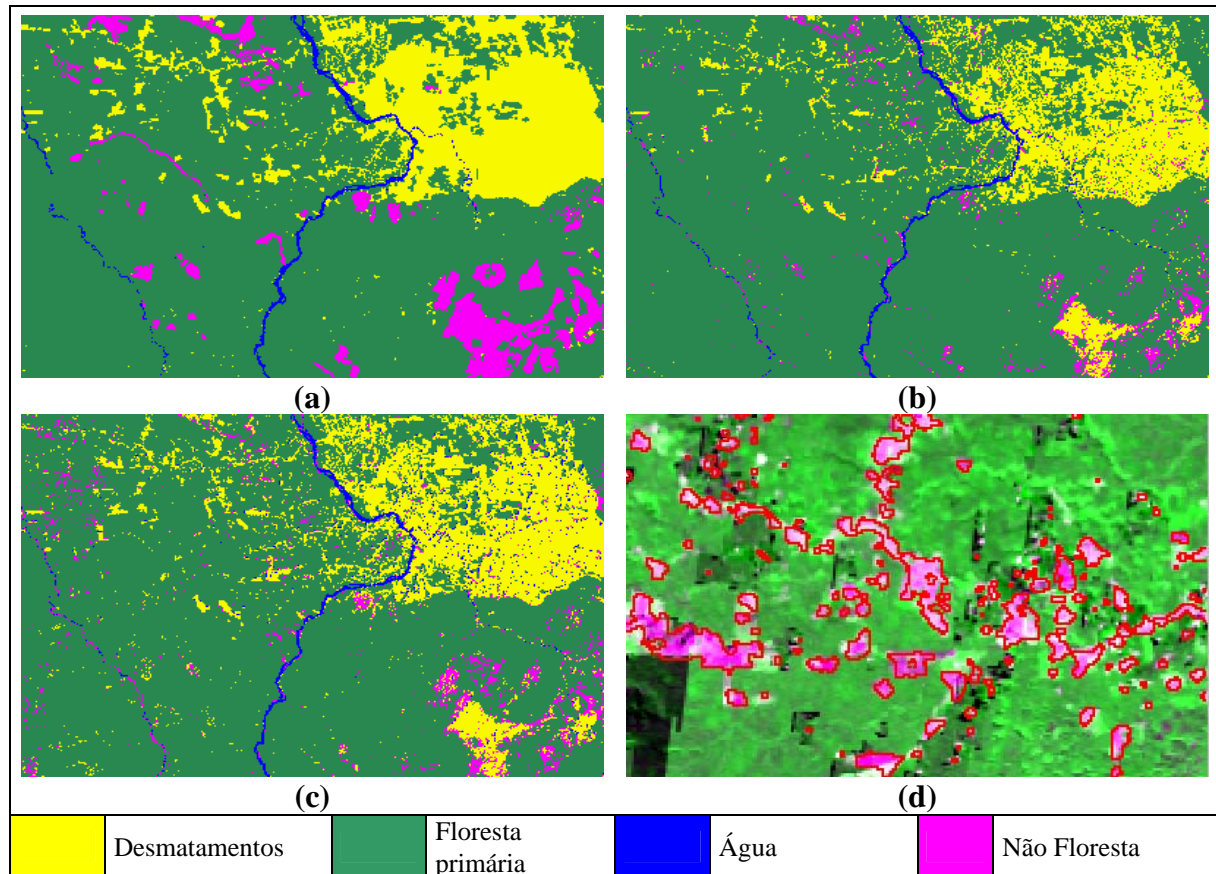


Figura 3. Imagem-referência da realidade terrestre (8/junho/2004) (a); classificação da composição 1 (b); classificação da composição 2 (c); e polígonos de desmatamento (composição 2) (d).

Tabela 3. Matrizes de confusão (em %) para a composição1 (9/6/2004) (a); e para a composição2 (25/6/2004) (b).

		Imagem-referência						Imagem-referência							
		Des	Flr	Água	NFlr	EC	AD			Des	Flr	Água	NFlr	EC	AD
Classificação	Des	75,82	2,30	8,67	25,26	20,78	75,82	Classificação	Des	84,94	4,92	4,65	40,91	29,41	84,94
	Flr	21,85	96,24	9,34	46,38	7,20	96,24		Flr	9,94	91,38	3,65	28,02	3,81	91,38
	Água	0,68	0,41	76,42	0,14	41,97	76,42		Água	3,74	0,91	86,80	1,02	73,99	86,80
	NFlr	1,65	1,05	5,52	28,22	44,27	28,22		NFlr	1,38	2,79	4,90	30,06	65,00	30,06
	EO	24,18	3,76	23,58	71,78	100,0	100,0		EO	15,06	8,62	13,20	69,94	100,0	100,0
	Acurácia Global = 89,44%								Acurácia Global = 87,62%						
(a)							(b)								

Legenda:

Des: Desmatamento
Flr: Floresta Primária
EC: Erro de Inclusão

NFlr: Não-Floresta
EO: Erro de Omissão
AD: Acurácia de Detecção

Finalmente, é importante ressaltar que quanto menor o tamanho do pixel das imagens utilizadas, melhores resultados deverão ser obtidos, uma vez que para pixels grandes ocorrem efeitos de bordas, além de maiores taxas de misturas intra-pixels. Futuros sensores com resoluções geométricas melhores que as do MODIS, porém com resoluções temporais semelhantes, poderão propiciar resultados ainda melhores que os encontrados no presente trabalho.

4. CONCLUSÕES

Com relação à geometria interna, o resultado de 122m para o erro interno obtido pela transformação de similaridade mostrou que as composições MODIS avaliadas são compatíveis com a planimetria de cartas topográficas em escalas iguais ou menores que 1:250.000. A diferença entre a geometria de obtenção das composições (perspectiva cônica) e das cartas (perspectiva ortogonal) reforça a qualidade geométrica desse produto MODIS. Apesar do erro global (157m) não ter atingido o erro teórico de posicionamento (5m), o que é difícil de ser obtido com uma imagem de 25m, o resultado apresentado confirma a qualidade geodésica das composições MODIS ($< 1 \text{ pixel}$), possibilitando a incorporação desses dados em um SIG, suprimindo a fase de georreferenciamento.

A análise radiométrica mostrou que as duas composições MODIS possuem uma correção atmosférica similar, garantindo a homogeneização das respostas espectrais de diferentes datas, porém, é importante que essa análise seja extrapolada para diferentes estações climáticas. Apesar das diferenças radiométricas existentes para uma mesma classe de cobertura, o que inviabiliza a utilização das bandas originais sem algum tipo de razão entre elas, foi possível obter bons resultados de classificação, utilizando índices de vegetação. A utilização desses índices, especialmente o NDVI, minimizou o efeito da variação radiométrica das composições multitemporais, mais expressivos sobre as áreas de floresta. Esse resultado pode ser explicado pela saturação do NDVI, proporcionando uma atenuação dessa variação radiométrica. A combinação das imagens de 25m com as de 5m permitiu uma melhor discriminação das classes de interesse.

Considerando o objetivo principal do presente trabalho, ou seja, detectar novos desmatamentos por meio do uso de imagens MODIS, a metodologia mostrou-se adequada para a área de estudo analisada.

As amostras de treinamento devem ser avaliadas para outras imagens (diferentes regiões, diferentes padrões de desmatamentos e maior sazonalidade); porém, devido à semelhança entre os resultados obtidos para duas datas distintas, há a indicação de que as perspectivas são boas.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que novos desmatamentos serão bem discriminados, o que é de vital importância para um sistema de alerta de desmatamentos. Além disso, os erros de inclusão e omissão foram baixos, o que reforça as perspectivas de bons resultados para outras composições MODIS.

Os resultados obtidos pelo classificador (mínima distância euclidiana) foram satisfatórios. Recomenda-se a realização de testes e avaliações de outros classificadores, como, por exemplo, árvore de decisão, para melhorar os resultados, pela definição de métricas que possibilitem uma melhor discriminação entre as classes de interesse.

5. REFERÊNCIAS

- ANDERSON, L. O. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS**. 231f. 2004. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Inclusão de Cartografia (COCAR). **Cartografia e Aerolevanteamento**: legislação. Brasília, Ministério da Ciência e Tecnologia, 1986.
- _____. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cartas Topográficas**: SB22-Y-A (MIR 196), SB22-Y-B (MIR 197), SB22-Y-C (MIR 223) e SB22-Y-D (MIR 224). Rio de Janeiro: IBGE, 1983. Escala 1:250.000.
- CIHLAR, J. Land cover mapping from satellites: Status and research priorities. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 21, n. 3, p. 1093–1114, 2000.
- CRIST, E. P.; CICONE, R. C. A physically-based transformation of Thematic Mapper Data: The TM Tasseled Cap. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 22, n. 3, p. 256-263, 1984.
- DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y. E.; AULICINO, L. C. M. **Metodologia para corrigir as distorções observadas entre os mapeamentos temporais do projeto PRODES Digital**. São José dos Campos: INPE, 2002. 21p.
- DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J.R.; MELLO, E. M. K.; MOREIRA, J. C. et al. **Metodologia para criação do PRODES Digital e do banco de dados digitais da Amazônia**: Projeto BADDAM. São José dos Campos: INPE, 1999. 33p.
- HUANG, C.; WYLIE, B.; YANG, L.; HOMER, C.; ZYLSTRA, G. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, n. 8, p. 1741–1748, 2002.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite**: projeto PRODES. São José dos Campos: INPE, 2005a. Disponível em: <www.obt.inpe.br/prodes/index.html>. Acesso 13 abr. 2005.
- _____. **Sistema DETER** (Detecção de Desmatamento em Tempo Real). São José dos Campos: INPE, 2005b. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/deter/>>. Acesso 13 abr. 2005.
- _____. **Tutorial SPRING**. 2006. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/classific.html>>. Acesso 14mar. 2006.
- JUSTICE, C.O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, P. D. et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 36, n. 4, p. 1228-1247, 1998.

CORREIA, A. H.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V. Avaliação de índices de vegetação MODIS para detecção de desmatamentos na Amazônia. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 1, n. 2, p. 52-64, 2006. ([doi:10.4136/ambi-agua.12](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.12))

KAUTH, R. J.; THOMAS, G. S. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landsat. In: SYMPOSIUM ON MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, jun. 1976, West Lafayette. **Proceedings...** West Lafayette: [S.n.], 1976. p.41-51.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely sensed images: an introduction.** Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 365p.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Modis Home Page.** 2005. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso 12 abr. 2005.

RUNNING, S. W.; JUSTICE, C. O.; SALOMONSON, V. V.; HALL, D.; BARKER, J. et al. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n. 17, p. 3587– 3620, 1994.

SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; MOREIRA, M. A.; ARAI, E.; RUDORFF, B. F. T. et al. **Detecção de áreas desflorestadas em tempo real: conceitos básicos, desenvolvimento e aplicação do Projeto DETER.** São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/deter/metodologia.pdf>>. Acesso 15 mar. 2006.

STRAHLER, A.; MUCHONEY, D.; BORAK, J.; FRIEDL, M.; GOPAL, S. **MODIS land cover and land-cover change products algorithm theoretical basis document (ATBD).** Vs. 5.0. Boston: Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston University, 1999. 72p.

VERGARA, O. R.; CINTRA, J. P.; D'ALGE, J. C. L. Avaliação da exatidão cartográfica de documentos atualizados com imagens orbitais e sistemas de informação geográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 20., 2001, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBC. 10p. 1 CD-ROM.

ZHAN, X.; SOHLBERG, R. A.; TOWNSHEND, J. R. G.; DIMICELI, C.; CARROLL, M. L. et al. Detection of land cover changes using MODIS 25m data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, n. 1/2, p. 336-350, 2002.