

## EFEITOS DIRECIONAIS NA RESPOSTA ESPECTRAL DE FLORESTAS TROPICAIS: ESTUDO DE CASO COM DADOS MODIS

Caio Arlanche Petri, Lênio Soares Galvão

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Avenida dos Astronautas, 1758. São José dos Campos – SP. {caio.petri, lenio.galvao}@inpe.br

### RESUMO

A utilização de sensores com largo campo de visada implica, em muitos casos, na necessidade de correção dos efeitos bidirecionais provindos da geometria de aquisição das imagens. Nesse sentido, este trabalho buscou avaliar a relação entre o ângulo azimutal relativo (AAR), a refletância ( $\rho$ ) do infravermelho próximo e o comportamento do *Enhanced Vegetation Index* (EVI) em florestas tropicais do sul da Amazônia. Para isso foram utilizadas imagens MODIS (MAIAC) da estação seca do ano de 2008, em uma área de estudo composta por 3 Unidades de Conservação (UCs). Os resultados mostraram a influência da direção principal de espalhamento, relacionada ao AAR, no brilho da imagem e no valor do EVI. Foi encontrada uma correlação significativa ( $r=0,858$ ) entre o AAR e a  $\rho$  do infravermelho próximo para 37 observações ao longo da estação seca de 2008, indicando que a variação positiva no ângulo (em direção ao retroespalhamento) leva a um aumento da resposta espectral e do EVI. De forma geral, o trabalho evidencia que o AAR e a direção de imageamento são fatores de grande importância na análise sazonal da resposta espectral de florestas tropicais, que devem ser compensados pela correção de efeitos bidirecionais.

**Palavras-chave** — Efeitos bidirecionais, BRDF, Amazônia, MODIS.

### ABSTRACT

*The use of large field-of-view sensors requires, in many cases, the correction for bidirectional effects to compensate for variable geometry of image acquisition. In this context, the objective of this work is to evaluate the relationship between the relative azimuth angle (RAA), the reflectance of the near infrared (NIR) interval and the Enhanced Vegetation Index (EVI). For this purpose, MODIS (MAIAC) images of the dry season of 2008 were used over three preserved areas in southern Amazon. Results showed the influence of the main scattering direction, related to the AAR, on the MODIS NIR reflectance and EVI. A significant correlation was found ( $r = 0.858$ ) between the AAR and the NIR reflectance for 37 observations during the 2008 dry season, indicating increasing reflectance (and EVI) toward the backscattering direction. Overall, results showed that the AAR and viewing direction are important factors in the*

*seasonal analysis of the spectral response of tropical forests to be further compensated by BRDF correction.*

**Key words** — Bidirectional effects, BRDF, Amazon, MODIS.

### 1. INTRODUÇÃO

Em estudos sistemáticos da vegetação com dados de sensores remotos com largo campo de visada, como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), diversos procedimentos de correção dos dados podem ser necessários para remover efeitos atmosféricos e bidirecionais. A finalidade é obter a informação sobre a superfície sem interferências associadas à aquisição de imagens orbitais. Por exemplo, a vegetação não exhibe comportamento Lambertiano [1]. Mesmo mantendo suas características biofísicas e bioquímicas constantes durante o imageamento, a vegetação pode refletir diferentes quantidades de energia para os satélites, dependendo da direção e ângulo em que é vista pelo sensor ou que é iluminada pelo Sol. Desta forma, algoritmos como o MAIAC (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*), proposto por Lyaspustin et al. [2], corrigem os dados para se obter a refletância de superfície ao nadir, eliminando o efeito de variação da informação pela geometria de iluminação comumente presente em sensores como o MODIS [3,4]. No Brasil, especificamente para a Amazônia, exemplos de estudos usando dados MODIS (MAIAC) foram publicados por Machado [5], Moura et al. [6], Hilker et al. [7] e Sousa et al. [8].

É comum a aplicação de índices de vegetação (IVs) do MODIS no estudo de florestas tropicais. Na análise do índice EVI (*Enhanced Vegetation Index*) com dados MODIS, Saleska et al. [9] encontraram uma variação positiva em verdejamento durante a seca severa na Amazônia no ano de 2005, comparada com anos regulares, indicando lógica contrária ao senso comum sobre a reação da vegetação ao estresse hídrico. Entretanto, a mesma lógica foi testada por Xu et al. [10] para o ano de 2010, outro ano de seca severa, obtendo resultados contrários. Huete et al. [11] e Galvão et al. [12], por sua vez, verificaram um efeito sazonal de incremento do índice EVI, sugerindo significados distintos para este comportamento (biofísico e bidirecional, respectivamente). Do início para o final da estação seca na Amazônia, observa-se em geral um incremento inesperado do EVI com o estresse hídrico. A necessidade de correção

bidirecional, portanto, trouxe para a literatura um importante questionamento sobre a existência ou não de informação biofísica associada à variação intra- e interanual do EVI. A relevância deste questionamento é sobre o real grau de resiliência das florestas tropicais para um cenário previsto de secas mais frequentes e severas associadas às mudanças climáticas.

O objetivo do presente estudo foi verificar o impacto de um dos fatores-chaves para os efeitos bidirecionais no MODIS (MAIAC), o ângulo azimutal relativo (AAR), através do relacionamento da direção de imageamento com a reflectância ( $\rho$ ) do infravermelho próximo e o índice EVI para a estação seca do ano de 2008.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo selecionada está localizada no sul do estado do Amazonas, e é composta por 3 unidades de conservação (UCs): Reserva de Desenvolvimento Sustentável Aripuanã, Floresta Nacional do Aripuanã e Reserva Extrativista Guariba. Como sua cobertura vegetal não difere em aspectos gerais, as UCs foram tratadas como um conjunto contíguo representando a área de estudo. Cerca de 94% da área total é coberta por Floresta Ombrófila Densa [13]. O MAIAC, em resolução espacial de 1 km e composições agregadas de 16 dias, foi utilizado para a obtenção do AAR, do EVI e da  $\rho$  do infravermelho próximo para o ano de 2008. Apesar de se caracterizar como um algoritmo de correção atmosférica e de efeitos bidirecionais, os dados do MAIAC utilizados neste trabalho contém apenas a correção atmosférica, uma vez que o AAR seria normalizado com a aplicação completa do algoritmo. O EVI foi obtido pelas bandas 1, 2 e 3 do produto, equivalentes às bandas respectivas do sensor MODIS [14]. O cálculo do EVI está descrito na Equação 1:

$$EVI = 2,5 \frac{[NIR - Vermelho]}{[NIR + 6(Vermelho) - 7,5(Azul) + 1]} \quad (1)$$

Onde “NIR” equivale a  $\rho$  do infravermelho próximo (banda 2), “Vermelho” representa a  $\rho$  da banda 1 e “Azul” a  $\rho$  da banda 3. O fator de ajuste do solo ( $L = 1$ ) é o utilizado nos produtos IVs do MODIS. O AAR varia de 0 até 180 graus, e por ser um produto derivado da combinação do posicionamento do sensor e do Sol em relação ao alvo, sua variação acaba por representar a direção principal de espalhamento da radiação eletromagnética (entre espalhamento frontal e retroespalhamento). Em termos gerais, devido à posição da passagem da plataforma Terra (sensor MODIS), valores mais baixos de AAR representam uma direção principal de espalhamento frontal, enquanto que valores altos de AAR representam retroespalhamento (Figura 1). Vale lembrar que o AAR é apenas uma das componentes bidirecionais passíveis de análise para o MODIS. O ângulo zenital solar e o ângulo zenital de visada não foram analisados neste trabalho.

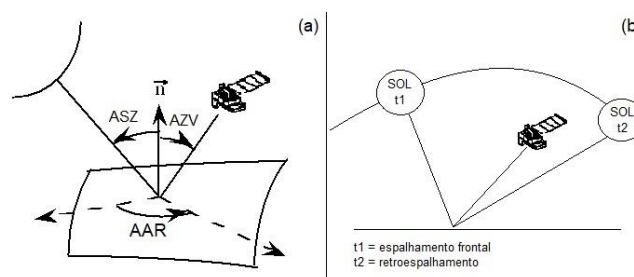
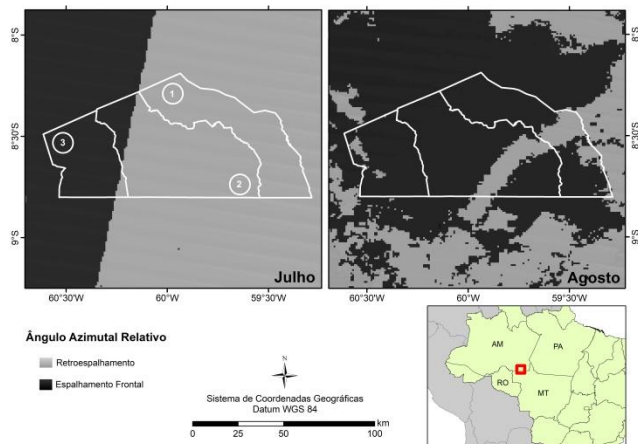


Figura 1: (a) ângulo solar zenital (ASZ), ângulo zenital de visada (AZV) e ângulo azimutal relativo (AAR), e (b) direções de espalhamento de acordo com variação da geometria sol-sensor.

A sazonalidade do AAR está estreitamente relacionada com o posicionamento do Sol ao longo do ano, o que causa a tendência de incremento acentuado do ângulo para os extremos (0 ou 180 graus, a depender da observação) de março a outubro. A estação seca na Amazônia aqui assumida é, portanto, um período de aumento do AAR rumo às direções de espalhamento frontal e retroespalhamento mais extremas. A fim de testar a influência do AAR no brilho de uma imagem, um teste de correlação de Pearson foi aplicado em 37 observações (dias julianos 145-245, variando de 24 de maio até 1 de setembro) do infravermelho próximo, para o ano de 2008, com boa qualidade de observação atmosférica pelo MAIAC para a área de estudo.

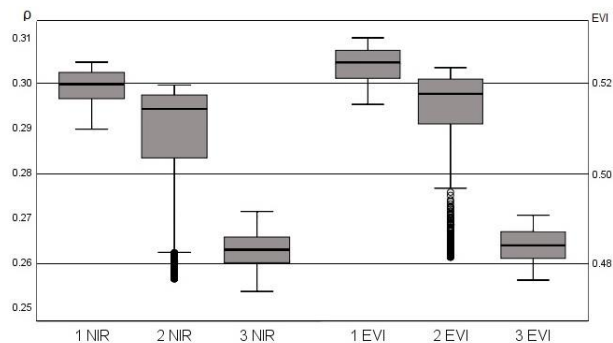
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da representação das imagens ao longo da estação seca de 2008, fica evidente que a distribuição espacial da variável AAR é dependente, no caso de composições de 16 dias, das condições de observação no momento do imageamento. Como o MAIAC é um algoritmo que estabelece classificação de qualidade do pixel de acordo com a cobertura de nuvens e ângulos de visada extremos, apenas quando há condições atmosféricas ideais o AAR se distribuirá de forma constante ao longo da faixa de imageamento, o que não permite, no entanto, que a imagem esteja livre de variações causadas por esta variável. Na Figura 2, é possível observar a diferença de distribuição do sentido majoritário do espalhamento para uma composição do mês de Julho e outra em Agosto. No segundo mês, a deterioração das condições de imageamento levou a uma composição não uniforme dos pixels, e a atribuição de diferentes sentidos de espalhamento dentro de uma mesma faixa de passagem do sensor. Ao adotar uma amostragem de pontos, porém, ainda é possível observar a tendência temporal de aumento das direções de espalhamento do AAR rumo ao final da estação seca.



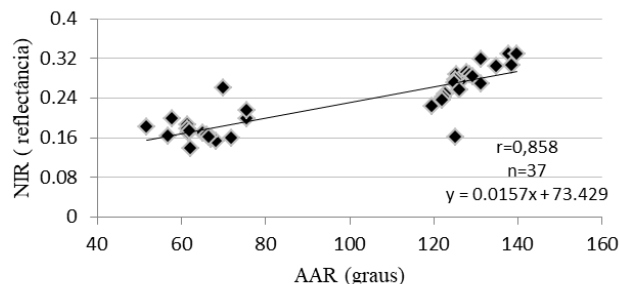
**Figura 2: Localização da área de estudo e AAR representado em direção principal de espalhamento.**

A partir da plotagem do EVI e da  $\rho$  do infravermelho próximo do mês de Julho de 2008 em boxplots (Figura 3), é possível observar com clareza a semelhança de distribuição do valor do índice e de  $\rho$  para as três UCs. A Reserva de Desenvolvimento Sustentável Aripuanã (1) apresenta os menores valores do EVI e de  $\rho$  para o infravermelho próximo, com variabilidade relativamente baixa. O mesmo comportamento se repete para a Reserva Extrativista Guariba (3), mas desta vez com os maiores valores nas duas variáveis. A princípio, este comportamento reflete diretamente a posição das UCs em relação à direção de espalhamento majoritária imposta pelo AAR na data correspondente: enquanto 1 se posiciona na região de retroespalhamento, 3 está quase inteiramente disposta na região de espalhamento frontal. Fortalecendo o mesmo argumento, a Floresta Nacional do Aripuanã (2), contida entre as duas faixas de direção de espalhamento principal, apresenta uma distribuição heterogênea do EVI e do infravermelho próximo, aparentando estar diversificada exatamente pela presença de diferentes AARs. A presença de outliers concentrados nos valores mais baixos da distribuição também está em consonância com as observações citadas, uma vez que os dois grupos demonstram grande separabilidade e a maior parte dos valores de 2 estão na região de retroespalhamento, que concentra os maiores valores e determina a média e outras medidas centrais em sua direção. É importante lembrar que a mudança abrupta de AAR indica, nesse caso, que datas distintas de composição foram utilizadas na imagem, fator que também implica em variabilidade dos dados por efeitos não abordados no trabalho. Portanto, esta não deve ser tratada como uma relação causa-efeito, exclusivamente causadora de impacto entre diferentes observações.



**Figura 3: Boxplots do EVI e da  $\rho$  do infravermelho próximo (NIR) para as três UCs da área de estudo.**

O teste de correlação de Pearson entre a  $\rho$  do infravermelho próximo e o AAR, para 37 observações das 3 UCs de alta qualidade de pixel na estação seca do ano de 2008, apresentou um valor  $r$  de 0.858 em um nível de confiança de 0.01. Com este resultado, é possível afirmar que existe uma correlação significativa entre as duas variáveis, o que significa, em termos gerais, que o infravermelho próximo sofre uma influência real pelas variações da direção de imageamento no contexto estudado. Este é um resultado particularmente importante na discussão da necessidade de correção dos efeitos bidirecionais para sensores com largo campo de visada, fator este que introduz variação no AAR de acordo com a posição do alvo na relação sol-alvo-sensor. A Figura 4 apresenta a dispersão do AAR e do infravermelho próximo considerando as observações válidas no período dos dias julianos 145-155 (24 de Maio até 1 de Setembro), onde é possível observar a tendência de agrupamento dos valores de AAR com os valores de  $\rho$  do infravermelho próximo. As condições gerais da atmosfera, a cobertura da terra, relevo e outros fatores bidirecionais como o ângulo solar zenital e o ângulo zenital de visada são sabidamente fatores de influência de significativa relevância. Porém, ao se obter um valor de correlação significativo em um teste estatístico e observar a influência do AAR com facilidade nos gráficos, é possível afirmar que este é um fator de importância para o estudo dos efeitos bidirecionais e, conseqüentemente, para a discussão sobre a sua correção e sua dinâmica sazonal em florestas tropicais – particularmente na Amazônia.



**Figura 4: Dispersão do AAR (graus) e do infravermelho próximo (NIR, em % de reflectância) para 37 observações entre 24 de Maio e 1 de Setembro de 2008.**

## 5. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos por este trabalho, podemos afirmar que a direção de imageamento apresenta uma significativa influência sobre a  $\rho$  do infravermelho próximo ( $r=0,858$ ) e, conseqüentemente, sobre o EVI, um IV altamente dependente desta faixa de comprimento de onda [11, 12]. Ambas as variáveis utilizadas possuem alta sensibilidade a mudanças na geometria de visada e foram, portanto, um ponto de partida importante para que o impacto do AAR fosse diagnosticado com facilidade [12]. Entretanto, não se pode afirmar que o AAR é o único ou mesmo o principal fator causador das mudanças nas variáveis selecionadas. Uma vez que diferentes dias de composição foram utilizados, outras mudanças em fatores bidirecionais e do próprio alvo podem exercer influência nos resultados. Permanece, assim, a necessidade de estudos com maior abrangência de comprimentos de onda e com outros IVs – principalmente os normalizados – para um diagnóstico mais preciso da extensão dos efeitos causados pela variação do AAR. Além disso, para que a dinâmica sazonal do AAR seja completamente compreendida, uma análise de seu grau de influência no brilho ao longo do ano (principalmente ao longo de todas as observações na estação seca) é importante.

Uma reflexão acerca dos resultados permite inferir que a correção de efeitos bidirecionais promovida em imagens providas de sensores de largo campo de visada, como o MODIS, é de fundamental importância para que tais efeitos não afetem estudos sobre processos e dinâmicas ambientais na superfície da terra. Atualmente como um algoritmo disponível de correção atmosférica e de efeitos bidirecionais do MODIS, o MAIAC tem sido fonte de diversos trabalhos publicados acerca deste propósito.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## 6. REFERÊNCIAS

[1] Jensen, J.R. "Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres". Parêntese, São José dos Campos, 598 p., 2009.

[2] Lyapustin, A. I.; Martonchik, J.; Wang, Y.; Laszlo, I.; e Korkin, S. "Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables." *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, v. 116, n. D3, 2011.

[3] Breunig, F.M.; Galvão, L.S.; Formaggio, A.R.; e Epiphanyo, J.C.N. "Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 13, n. 1, p. 34-42, 2011.

[4] Sims, D.A.; Rahman, A.F.; Vermonte, E.F.; e Jiang, Z. "Seasonal and inter-annual variation in view angle effects on MODIS vegetation indices at 46 three forest sites". *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 1, p. 3112-3120, 2011.

[5] Machado, C.B. "Análise fenológica do dossel da floresta nacional do tapajós utilizando dados orbitais do sensor MODIS e hiperespectrais locais". Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 143 p., 2017.

[6] Moura, Y.M.; Galvão, L.S.; Hilker, T.; Wu, J.; Saleska, S.; Amaral, C.H.; Nelson, B.W.; Lopes, A.P.; Wiedeman, K.K.; Prohaska, N.; Oliveira, R.C.; Machado, C. B.; e Aragão, L.E.O.C. "Spectral analysis of amazon canopy phenology during the dry season using a tower hyperspectral camera and modis observations". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 131, p. 52-64, 2017.

[7] Hilker, T.; Galvão, L.S.; Aragão, L.E.O.C.; Moura, Y.M.; Amaral, C.H.; Lyapustin, A.I.; Wu, J.; Albert, L.P.; Ferreira, M.J.; Anderson, L.O.; Santos, V.A.H.F.; Prohaska, N.; Tribuzy, E.; Ceron, J.V.B.; Saleska, S.R.; Wang, Y.; Gonçalves, J.F.C.; Oliveira-Junior, R.C.; Rodrigues, J.V.F. C.; e Garcia, M.N. "Vegetation chlorophyll estimates in the Amazon from multi-angle MODIS observations and canopy reflectance model". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 58, p. 278-287, 2017.

[8] Sousa, C.H.R.; Hilker, T.; Waring, R.; Moura, Y.M.; Lyapustin, A.I. "Progress in remote sensing of photosynthetic activity over the amazon basin". *Remote Sensing*, v. 9, n. 48, 2017.

[9] Saleska, S.R., Didan, K.; Huete, A.R.; e da Rocha, H.R.. "Amazon forests green-up during 2005 drought." *Science*, v. 318, n. 5850, p. 612, 2007.

[10] Xu, L.; Samanta, A.; Costa, M.H.; Ganguly, S.; Nemani, R.R.; e Myneni, R.B. "Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought". *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 7, 2011.

[11] Huete, A.R.; Didan, K.; Shimabukuro, Y.E.; Ratana, P.; Saleska, S.R.; Hutyrá, L.R.; Yang, W.; Nemani, R.R.; e Myneni, R. "Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season". *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 6, 2006.

[12] Galvão, L.S., dos Santos, J.R.; Roberts, D.; Breunig, F.M.; Toomey, M.; e Moura, Y.M. "On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: a case study with MODIS and hyperspectral data". *Remote Sensing of Environment*, v. 115, p. 2350-2359, 2011.

[13] Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. "Unidades de Conservação". Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomas-brasileiros>. Acesso em Setembro de 2018.

[14] Huete, A.R.; Liu, H.Q.; Batchily, K.; Van Leeuwen, W. "A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS". *Remote Sensing of Environment*, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.