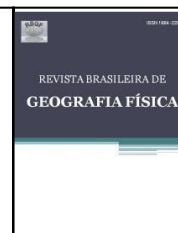




ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Aplicação dos produtos MODIS Coleção 6 na análise da Profundidade Ótica do Aerossol sobre regiões de Floresta e Cerrado na Amazonia Legal

Augusto Gabriel da Costa Pereira¹, Lucas Rangel Coringa Barros², Valeria Taakondjo Nakale³, Tamires Fernandes de Oliveira⁴, Igor Antonio Kuhnen⁵, Anísio Alfredo da Silva Junior⁶, Danielle Christine Stenner Nassarden⁷, Glauber Guimarães Cirino da Silva⁸, Rafael da Silva Palácios⁹

¹ Graduando em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Faculdade de Meteorologia (FAMET), Instituto de Geociências (IG), CEP: 66075-110, Belém (PA), Brasil, Tel.: (+55 91) 99908-8462, augustogabrielpereira62@gmail.com.

² Graduando em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Faculdade de Meteorologia (FAMET), Instituto de Geociências (IG), CEP: 66075-110, Belém (PA), Brasil, Tel.: (+55 91) 98945-6377, lucasrangelcoringa@gmail.com.

³ Graduada em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Faculdade de Meteorologia (FAMET), Instituto de Geociências (IG), CEP: 66075-110, Belém (PA), Brasil, Tel.: (+55 91) 99836-8092, ndapewanakale96@gmail.com.

⁴ Mestre em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Programa de Pós-graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia (PPGGRD), Instituto de Geociências (IG), CEP: 66075-110, Belém (PA), Brasil, Tel.: (+55 91) 98218-6054, tamiresoliveira.eca@gmail.com.

⁵ Doutor em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Instituto de Físicas (IF), CEP: 78060-900, Cuiabá (MT), Brasil, Tel.: (+55 65) 99604-7614, igkuhnen@gmail.com.

⁶ Doutorando em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Instituto de Físicas (IF), CEP: 78060-900, Cuiabá (MT), Brasil, Tel.: (+55 65) 9235-5501, anisio.silva@fisica.ufmt.br.

⁷ Doutora em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Instituto de Físicas (IF), CEP: 78060-900, Cuiabá (MT), Brasil, Tel.: (+55 65) 99680-3118, dany.nassarden93@gmail.com.

⁸ Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Clima e Meio Ambiente do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Professor da Universidade Federal do Pará (UFPA), Faculdade de Meteorologia (UFPA), Instituto Geociências (IG), CEP: 66075-110, Belém (PA), Brasil, Tel.: (+55 91) 98148-2153, glaubercirino@ufpa.br.

⁹ Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA) pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Professor da Universidade Federal do Pará (UFPA), Faculdade de Meteorologia (UFPA), Instituto Geociências (IG), CEP: 66075-110, Belém (PA), Brasil, Tel.: (+55 11) 99848-8650, rafael.pgfa@gmail.com (autor correspondente).

(FUP), CEP: 73.345-010, Planaltina (DF), Brasil, Tel.: (+55 61) 98363-7041, lfsalemi@unb.br. * Part of the master's thesis of the first author.

Artigo recebido em 12/08/2021 e aceito em 04/04/2022

RESUMO

As estimativas de sensoriamento remoto por meio dos espectrômetros de resolução moderada como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) têm mostrado capacidade de fornecer importantes informações globais e regionais das propriedades óticas dos aerossóis atmosféricos. O monitoramento dessas informações, tais como a profundidade ótica do aerossol (AOD), pode auxiliar o entendimento do efeito dessas partículas sobre o clima. Nesse sentido o objetivo desse estudo foi aplicar os produtos da coleção 6 do MODIS na análise da AOD sobre regiões de Floresta e Cerrado na Amazonia Legal. Esse trabalho tem como hipótese principal que diferentes produtos MODIS podem explicar as variações temporais e espaciais da AOD sobre sites da Amazonia. Estimativas dos produtos MODIS de resoluções espaciais de 3km (3k) e 10 km (10k) foram comparadas e analisadas de 2002 a 2017 para os sites de Alta Floresta e Cuiabá. Em comparação com medidas de referência da AERONET, as estimativas totais dos produtos MODIS 3k e 10k subestimaram a AOD em torno de 13% em Alta Floresta e 22% em Cuiabá. A comparação entre os sites mostrou que as estimativas de AOD para ambos produtos são mais elevadas sobre o site de Alta Floresta, em torno de 50% para o produto 3k e 40% para o 10k. Esse estudo quantificou as médias sazonais para ambos produtos nos sites de Alta Floresta e Cuiabá evidenciando as principais diferenças entre os sites. Foi verificado que durante a estação chuvosa os valores de AOD são similares entre os sites e durante a estação seca o site de Alta Floresta é mais impactado pela alta carga de aerossóis emitidos pelas queimas regionais.

Palavras-chave: Aerossol, sensoriamento remoto, satélite Terra, satélite Aqua, MOD04_L2.

Application of the Collection 6 MODIS products in the analysis of the Aerosol Optical Depth over Forest and Cerrado regions in the Legal Amazon

ABSTRACT

Estimates from remote sensing done by using moderate resolution spectrometers such as the MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) have shown the ability to provide important global and regional information on the optical properties of atmospheric aerosols. Monitoring information such as the aerosol optical depth (AOD), can help

to understand the effect of these particles on the climate. In this sense, the objective of this study was to apply the collection 6 of the MODIS products in the analysis of the AOD on the Forest and Cerrado regions in the Legal Amazon. This work has the main hypothesis that different MODIS products can explain the temporal and spatial variations of AOD over Amazon sites. Estimates of the MODIS products for the 3km (3k) and 10 km (10k) spatial resolutions were compared and analyzed from 2002 to 2017 for both sites. In comparison to AERONET benchmark measurements, the total estimates for MODIS 3k and 10k products underestimated AOD by around 13% in Alta Floresta and 22% in Cuiabá. The comparison between the sites showed that the AOD estimates for both products are higher over the Alta Floresta site, with around 50% for the 3k product and 40% for the 10k product. The seasonal averages for both products analyzed at the Alta Floresta and Cuiabá sites were quantified, and the main differences between them were highlighted. It was verified that during the rainy season the AOD values are similar between the sites, and during the dry season, the Alta Floresta site is more impacted by the high aerosol load emitted by regional fires.

Keywords: Aerosol, remote sensing, Terra satellite, Aqua satellite, MOD04_L2.

Introdução

Os aerossóis, ou material particulado, são partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera (Seinfeld e Pandis, 2006). O monitoramento e análise das propriedades óticas destas partículas são essenciais para verificação dos impactos ocasionados por estas no clima (Dayou et al., 2014; Malavelle et al., 2019; Dickinson et al., 2019). Os aerossóis podem influenciar o clima de forma direta, alterando os fluxos radiativos e indiretamente atuando como núcleo de condensação de nuvens e modificando suas propriedades microfísicas e consequentemente suas propriedades radiativas e regimes de precipitação (IPCC, 2013; Opálková et al., 2019; Neto et al., 2019).

A caracterização dos aerossóis tem sido um desafio cada vez maior devido as variações espaço-temporais em termos de concentração, propriedades químicas, físicas e óticas (Palácios et al., 2020; Nascimento et al., 2021), o que exigem um esforço conjunto de medições destas propriedades no espaço e no tempo em várias regiões do mundo (Kang et al., 2016; Wei et al., 2019). Tendo em vista a necessidade de medições globais, o monitoramento das propriedades dos aerossóis é realizado com medidas em superfície (ou terrestre) por uma ampla rede, a AERONET (*Aerosol Robotic Network*), adquirindo um conjunto de dados contínuos para uma variedade de parâmetros dos aerossóis sobre o globo terrestre (Holben et al., 1998).

Embora a AERONET forneça informações contínuas sobre as propriedades dos aerossóis e tenha vários sítios de monitoramento espalhados em diversos pontos do globo, ainda é necessário avaliar outras formas de observações que contemplem as variações espaço-temporais das propriedades dos aerossóis. Nesse sentido, o sensoriamento remoto por satélites oferece uma oportunidade sem precedentes para avançar na compreensão das relações aerossol-clima, assim como auxiliar no entendimento da dinâmica

espaço-temporal dos aerossóis sobre o planeta como um todo (Kang et al., 2016; Kumar et al., 2014; Wei et al., 2019).

A aplicação de sensoriamento remoto por meio dos espectrômetros de resolução moderada (MODIS, *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) abordo nos satélites Terra e Aqua tem mostrado capacidade de fornecer importantes propriedades físicas sobre os aerossóis em escala global (Cao et al., 2014; Mansour, 2019; Gliß et al., 2021). No recém produto lançado do MODIS, Coleção 6 (C6) a variável AOD (profundidade ótica do aerossol) vai além dos dados tradicionais de resolução 10 km do nível 2, essa coleção inclui um novo produto global com resolução de 3 km (Remer et al., 2013). Embora o novo produto de AOD siga os mesmos princípios da AOD de 10 km recuperado pelo algoritmo *Dark Target* (DT), espera-se que este possa auxiliar na construção de novos produtos que avaliem plumas de fumaça e gradientes de aerossol (Munchak et al., 2013; He et al., 2017; Eibedingil et al., 2021).

No Brasil ainda são modestos os trabalhos que envolvem a aplicação dos produtos MODIS C6 para análise de propriedades óticas dos aerossóis. Wei et al. (2019) realizaram comparações e avaliações dos algoritmos *Dark Target* (DT) e *Deep Blue* (DB) e da combinação entre eles (DTB) sobre o Brasil e vários locais do globo, entretanto, estas análises se concentraram no desempenho de tais algoritmos e não na aplicabilidade local de um destes produtos. Nesse sentido o objetivo deste trabalho é aplicar os produtos do algoritmo *Dark Target* (DT), coleção 6 (C6) para análise da profundidade ótica do aerossol (AOD) sobre regiões de Floresta e Cerrado na Amazonia Legal. Esse estudo parte da hipótese que diferentes produtos MODIS, resoluções de 3k e 10k, expliquem as variações temporais e espaciais da AOD sobre sites da Amazonia. Parte-se do pressuposto que os produtos também avaliem possíveis diferenças entre as estimativas da AOD para diferentes biomas sobre a Amazônia Legal.

Material e métodos

Descrição da área de estudo

Nesse estudo foram analisadas as estimativas da profundidade ótica do aerossol (AOD) para duas regiões com características distintas sobre a Amazonia Legal. As estimativas da AOD foram analisadas para uma região pertencente ao bioma Amazônico, sobre o site de Alta Floresta, no norte do Estado de Mato Grosso e sobre um bioma de Cerrado, site de Cuiabá, Capital do Estado de Mato Grosso e localizada na região Centro Sul. A Figura 1 mostra a localização dos dois sites analisados nesse estudo.

O site de Alta Floresta está localizado em uma região conhecida como arco do desmatamento, região de fronteira entre a floresta com a frente agrícola. O radiômetro da AERONET nesse site encontra-se em uma região de transição entre floresta e pastagem (Palácios et al., 2020). Já o site de Cuiabá, denominado Cuiaba-MIRANDA pela rede AERONET, está localizado na zona de transição entre os biomas Cerrado e Pantanal. O radiômetro deste local está localizado a

aproximadamente 20 km do perímetro urbano de Cuiabá, em uma região com pequenas árvores e galhos retorcidos, em meio a uma mistura de pastagens e superfícies inundadas (Palácios et al., 2020).

Os dois sites analisados são influenciados continuamente pelas emissões de queima de biomassa durante a estação seca (Sena et al., 2013; Palácios et al., 2020), desta forma a avaliação dos produtos MODIS também foram realizadas distinguindo as estações seca e chuvosa. A classificação das estações seca e chuvosa não foi realizada com base nos registros climatológicos de precipitação, ao invés disso, foi realizada uma separação com base nas mudanças bruscas das propriedades óticas dos aerossóis, que ocorrem devido a emissão provocada por intensas atividades de queimas nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil. Uma classificação semelhante foi realizada por Rizzo et al. (2013). Nesse trabalho foi considerado como estação seca os meses de julho a outubro e estação chuvosa o restante do ano. As medidas de AOD, explicadas na próxima seção, foram extraídas para o período que compreende do ano 2000 a 2017 da AERONET e de 2002 a 2017 do MODIS.

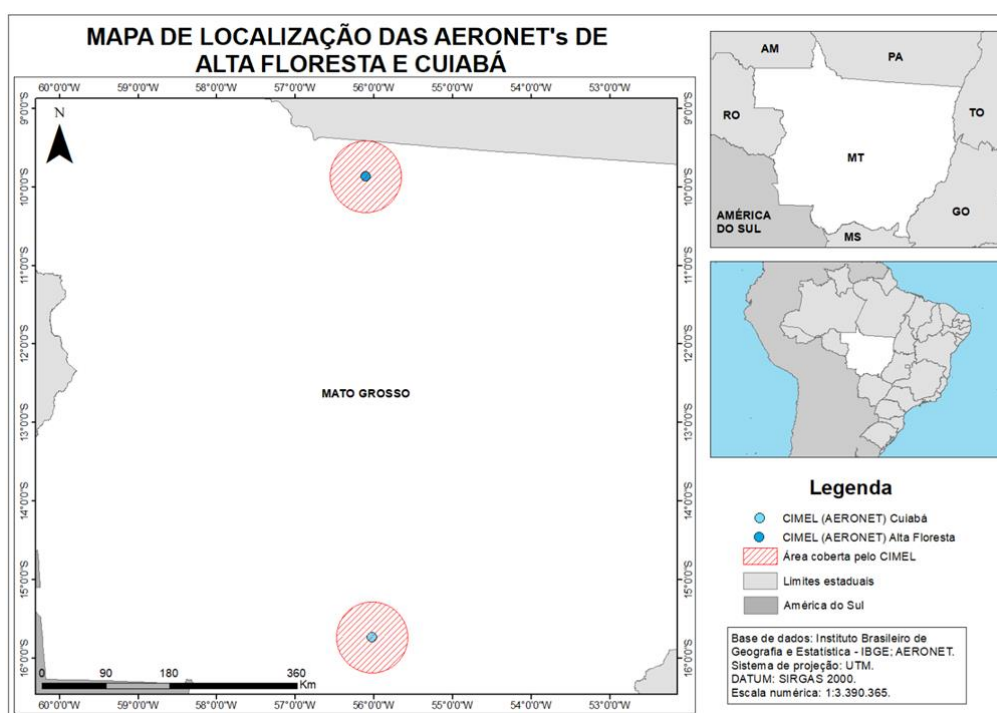


Figura 1. Localização dos sites da AERONET, Cuiabá e Alta Floresta, sobre os quais foram analisados os produtos MODIS para a profundidade ótica do aerossol.

Aquisição de dados AERONET

A AERONET (*AErosol RObotic NETwork*) é uma rede global de monitoramento de

aerossóis por sensoriamento remoto em superfície, instalada e mantida pelo EOS (*Earth Observing System*) da NASA (Holben et al., 1998). Suas medições permitem o monitoramento quase em

tempo real da profundidade ótica do aerossol em várias faixas do espectro, além de outras propriedades físicas e óticas dos aerossóis. Os produtos fornecidos pela AERONET estão disponíveis gratuitamente on-line em <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, que contém todas as informações sobre o sistema de monitoramento.

Essa rede segue um protocolo para garantia da qualidade dos dados, dividido de acordo com o nível de processamento, que varia entre 1,0, 1,5 e 2,0. Os dados do nível 1,0 representam medições brutas, o nível 1,5 apresenta medidas processadas que eliminam a contaminação por nuvens e chuva. No nível 2,0 os dados passam por uma calibração final com correções de fatores locais e ganham uma certificação da rede.

Nesse trabalho as medidas da AERONET foram utilizadas para uma comparação prévia com os produtos de AOD do MODIS. Foram adquiridas as medidas pontuais da AOD em 500 nm (AOD 500 nm) de nível 2,0 para os sites de Alta Floresta e Cuiabá entre os anos de 2000 a 2017. Também foram utilizadas as medidas do Expoente Angstrom de Extinção para faixa espectral de 440-870 nm (EA). O EA fornece a dependência espectral da AOD e permite a conversão da AOD 500 nm para outras faixas espectrais.

Produtos AOD MODIS C6

O MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um sensor abordo dos satélites Terra e Aqua. Esse sensor possui 36 bandas espectrais, que variam de 0,4 a 41,2 μm e possui três diferentes resoluções espaciais. As bandas 1 e 2 possuem resolução espacial de 250 m, as bandas 3 a 7 possuem resolução de 500 m e as demais possuem resolução de 1 km. Sua órbita polar a 700 km do nível do mar, varre uma área de imagem com 2300 km proporcionando uma cobertura praticamente diária da superfície e atmosfera da Terra (Cheng et al., 2012).

O algoritmo de recuperação de aerossóis utilizado nessa pesquisa foi o *Dark-Target* (DT), que é aplicado aos dados do sensor multiespectral do satélite e deriva propriedades do aerossol, incluindo profundidade ótica do aerossol (AOD) sobre os continentes e oceanos. Os produtos da recuperação do DT são usados para desenvolver a climatologia global e regional de aerossóis, estudar a interação de aerossóis com nuvens e para avaliações e previsões da qualidade do ar (NASA, 2019). Os produtos DT 10 km foram avaliados sobre as escalas globais (Levy et al., 2013) e regionais (Bilal et al., 2015; He et al., 2017), com um erro esperado (EE) nos continentes de $\pm 0,05+15\%$ (Levy et al., 2013). Os produtos de DT 3 km foram avaliados tanto nas escalas globais (Remer et al., 2013) e regionais (Nichol e Bilal, 2016; He et al., 2017), com um erro esperado reportado (EE) sobre o continente de $\pm 0,05+20\%$ (Remer et al., 2013).

Nesse trabalho foram utilizadas as medidas obtidas nas passagens do satélite Terra, que passa sobre a área de estudo as 10:30 horas (local) e do Aqua, que passa as 13:30 horas (local). Os produtos MODIS C6 MOD04_L2 (Terra) e MYD04_L2 (Aqua) para a AOD 550 nm nas resoluções de 3 km (3k) e 10 km (10k) foram adquiridos com base nas localizações dos sensores físicos (radiômetros) da AERONET. Foram adquiridos os produtos MODIS C6 de maio de 2002 a dezembro de 2017. Os recortes das imagens fornecidas pelo MODIS levaram em consideração uma área radial de 25 km entorno do radiômetro da AERONET. Para Cuiabá as coordenadas do radiômetro são 56,62 W e 16,39 S e a área recortada do MODIS foi 55,85-56,30 W e 15,48-16,00 S. Já para Alta Floresta as coordenadas do radiômetro são 56,10 W e 9,87 S e o recorte MODIS abrangeu 56,35-55,85 W e 9,62-10,12 S. A descrição completa dos produtos utilizados em ambos os sites é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos produtos AERONET e MODIS utilizados nesse trabalho. DT representa o algoritmo "Dark Target" utilizado na recuperação da AOD pelas medidas do MODIS. QA é o nível de qualidade assegurada máxima do produto.

	Produto	Descrição
AERONET	AOD 500 nm	Produto direto Algoritmo V3, nível 2,0.
	EA 440-870 nm	Produto direto Algoritmo V3, nível 2,0.
MODIS C6	AOD 550 nm MOD04_L2 10k	Algoritmo DT, QA=3.
	AOD 550 nm MOD04_L2 3k	Algoritmo DT, QA=3.
	AOD 550 nm MYD04_L2 10k	Algoritmo DT, QA=3.
	AOD 550 nm MYD04_L2 3k	Algoritmo DT, QA=3.

Tratamento dos dados

As medidas pontuais de AOD 500 nm e EA da AERONET foram utilizadas para o cálculo de média diária. Para mostrar a relação entre as médias diárias da AOD da AERONET com as medidas de AOD dos produtos MODIS o EA foi utilizado para interpolar a AOD da AERONET em 550 nm de acordo com a Equação 01 (Kang et al., 2016; Wei et al., 2019).

$$AOD\ 550\ nm = AOD\ 500\ nm \left(\frac{550}{500}\right)^{-EA} \quad (01)$$

Os produtos AOD MODIS foram compilados em um único arquivo denominado AOD MODIS. Essa compilação foi realizada para as medidas dos satélites Terra e Aqua, MOD e MYD, foi então calculado um valor médio de acordo com a Equação 02. Esse mesmo procedimento foi realizado tanto para as estimativas 3k como 10k.

$$AOD\ MODIS = \frac{AOD\ MOD + AOD\ MYD}{2} \quad (02)$$

Após a compilação dos dados AOD MODIS foi realizada uma análise de regressão com os dados da AERONET para fins comparativos de validação. Os dados de AOD MODIS 3k e 10k foram então utilizados para na análise das séries temporais sobre os sites de Cuiabá e Alta Floresta. Na análise das séries temporais ainda foram quantificados os valores médios, medianas e desvios para os valores anuais da AOD dos produtos 3k e 10k e verificado as possíveis diferenças entre os distintos biomas. Após a análise da série temporal, o conjunto de dados ainda foi dividido em estação seca e chuvosa para avaliar as possíveis diferenças sazonais entre os produtos e os biomas de Floresta e Cerrado.

Resultados e discussão

Comparação AERONET x MODIS

As estimativas da AOD MODIS permitiram observar as cargas de aerossóis atmosféricos de duas regiões geográficas com características muito diferentes. Enquanto o site de Alta Floresta é fortemente impactado pelas

emissões de queimadas na região do arco do desmatamento (Sena et al., 2013; Palácios et al., 2020) o site de Cuiabá é influenciado pela queima de vegetação típica de Cerrado com contribuições advindas do transporte regional (Palácios et al., 2018; Romera et al., 2019). A série temporal completa com as medidas da AOD AERONET e as estimativas da AOD MODIS são mostradas na Figura 2.

Assim como esperado, os resultados mostrados na Figura 2 evidenciam a sazonalidade para AOD que foi constatada tanto com as medidas da AERONET quanto pelas estimativas do MODIS 3k e MODIS 10k. Os valores máximos da AOD para ambos sites estão relacionados diretamente com os eventos de queimadas que ocorrem regionalmente. As altas cargas de aerossóis emitidos pela queima de biomassa regional que ocorrem na região Central e Norte do Brasil cobrem extensas áreas sobre a América do Sul e podem impactar locais relativamente distantes de sua emissão de origem (Artaxo et al., 2002; Procopio et al., 2004; Martin et al., 2010; Davidson et al., 2012, Cirino et al., 2014; Pope et al., 2020). A sazonalidade da AOD ainda é justificada pelo trabalho de Hoelzemann et al. (2009) que afirma que praticamente toda região pertencente a bacia Amazônica, assim como boa parte do continente Sul Americano apresenta uma significativa mudança das propriedades óticas dos aerossóis na estação seca.

As mudanças sobre as propriedades óticas dos aerossóis sobre a região Sul da Amazônia na estação seca são devido a queima de biomassa na região do arco do desmatamento, fato completamente relacionado a variabilidade da AOD sobre essa região (Fuzzi et al., 2007). Em particular os anos de 2005 e 2010 são reportados pelos trabalhos de Marengo et al. (2008) e Marengo et al. (2011) respectivamente, assim como a grande quantidade de carbono lançado na atmosfera nesses dois registros de grande seca. A relação entre os registros de queimadas no Brasil e os valores da AOD evidenciam que tanto a região de Floresta Amazônica quanto a região de Cerrado são impactadas diretamente pela queima de biomassa (Palácios et al., 2022).

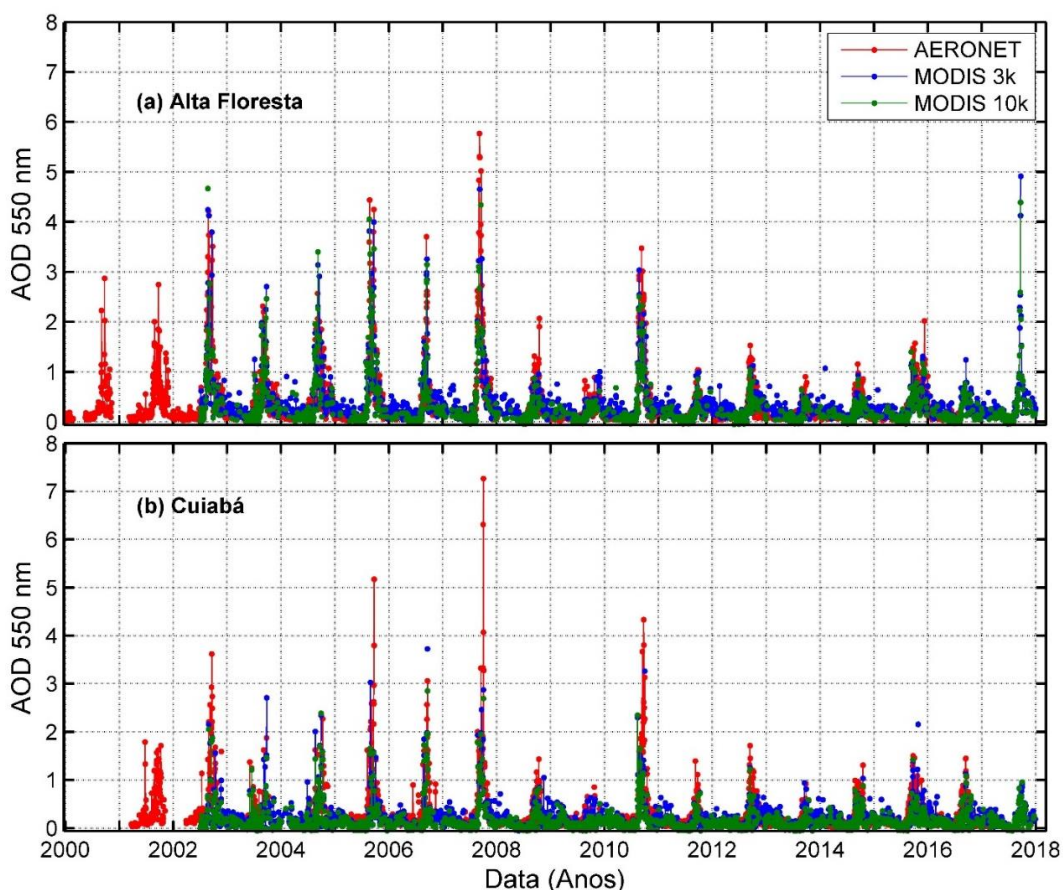


Figura 1. Série temporal com as medidas diárias da AOD 550 nm da AERONET e das estimativas MODIS 3k e MODIS 10k para a) Site de Alta Floresta e b) Site de Cuiabá.

Antes de discutir as possíveis diferenças entre a AOD dos produtos MODIS para os sites de Alta Floresta e Cuiabá foi realizada uma análise de regressão com os valores da AERONET. As regressões lineares AERONET x MODIS são mostradas na Figura 3. Os resultados mostram que para Alta Floresta (Figura 3(a) e (b)) os produtos MODIS 3k e 10k subestimaram a AOD em torno de 13%. Já para o site de Cuiabá (Figura 3(c) e (d)) os produtos MODIS 3k e 10k subestimaram a AOD em torno de 24% e 20% respectivamente. De forma geral a Figura 3 mostra que para ambos os sites analisados neste estudo, os valores de AOD MODIS e AERONET concordam muito bem, com valores de R^2 que são estatisticamente significativos no nível de confiança de 95%.

Ainda sobre a Figura 3, é possível observar para o site de Alta Floresta que para valores de AOD (AERONET) acima de 2,0 ocorre uma inversão dos pontos, com maior dispersão acima da linha tracejada $x=y$. Esse resultado concorda com os registros de Cirino et al. (2014) na avaliação do produto AOD MODIS 10k para regiões Sul e Central da Amazônia, afirmando que para altas cargas de aerossóis os valores MODIS tendem a ser em torno de 5-10% maiores que os

valores da AERONET. Essa mesma tendência foi encontrada para o MODIS 3k em Cuiabá, entretanto, não foi verificado o mesmo para o produto MODIS 10k. Na análise comparativa entre os dois sites, percebe-se um melhor ajuste para Alta Floresta. Esta diferença pode ser justificada com os resultados de Sena et al. (2013), que com análises sobre as áreas florestais e de Cerrado, constatou que o albedo de superfície é geralmente mais homogêneo sobre a Floresta, ou seja, a variabilidade do albedo de superfície dentro de uma única célula induz uma maior dispersão de dados para sítios de Cerrado em comparação com os sítios florestais. De acordo com a afirmação de Levy et al. (2013), o algoritmo utilizado (*Dark Target*) tem baixa eficácia de recuperar AOD sobre vegetações secas e brilhantes, o que pode ser constatado na Figura 3(c) e (d).

Em geral as diferenças encontradas são consideradas aceitáveis, comparações semelhantes AERONET x MODIS foram realizadas Chu et al. (2002) e Cirino et al. (2014). Os maiores erros ocorrem para valores AOD maiores que 1,0, onde em alguns casos os valores MODIS são maiores do que as medições AERONET. A análise de regressão apresentada na Figura 3 mostra que o

MODIS pode ser usado para derivar AOD, tomando os valores AERONET como referência (Remer et al., 2013). Os resultados aqui mostrados ainda são compatíveis com os trabalhos de Jin et al.

(2019) e Xiaojing et al. (2018) que fizeram análises semelhantes de comparação com os produtos MODIS e AERONET.

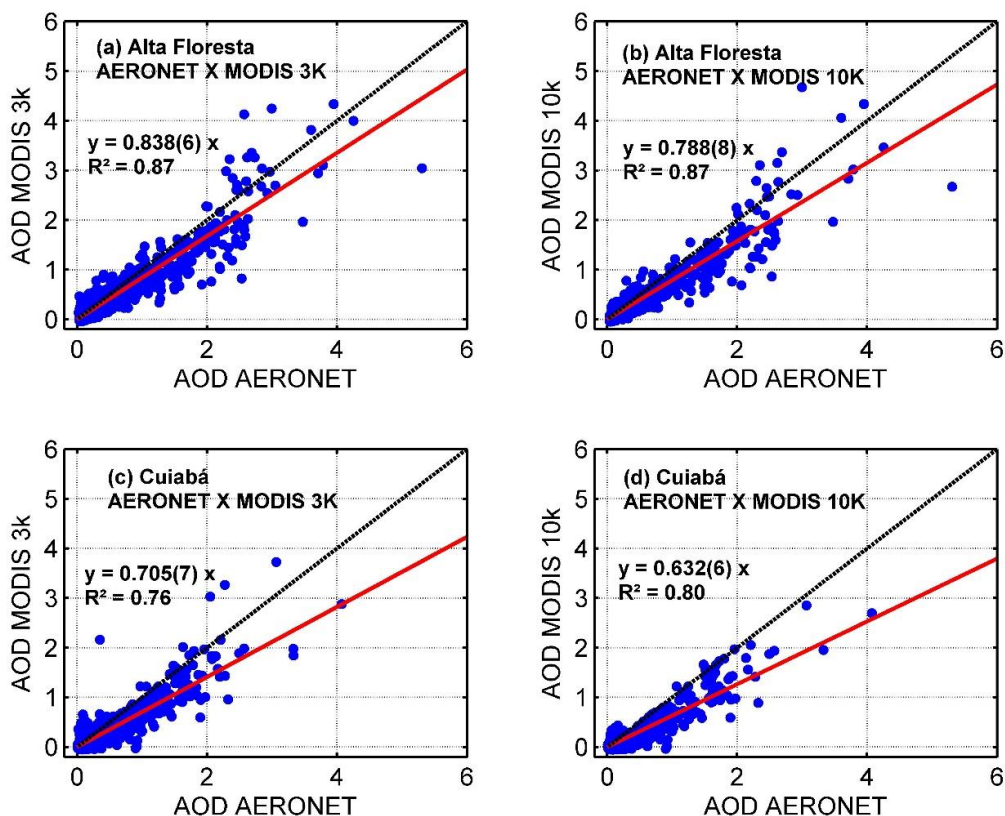


Figura 2. Análise de regressão linear entre a AOD da AERONET com a) AOD MODIS 3k para Alta Floresta, b) AOD MODIS 10k para Alta Floresta, c) AOD MODIS 3k para Cuiabá e d) AOD MODIS 10k para Cuiabá.

Variação interanual dos produtos AOD MODIS

Neste tópico de resultados são apresentadas quantificações para os valores de AOD (AOD 550 nm) obtidas pelos produtos MODIS 3k e 10k para os biomas de Floresta e Cerrado. Além da quantificação das médias, desvios e medianas da AOD MODIS 3k e 10k, também são apresentadas as respectivas diferenças percentuais entre os produtos. A Tabela 2 mostra os valores médios, desvios e medianas anuais da AOD MODIS 3k e 10k para o site de Alta Floresta. Em acordo com a Figura 2(a) é possível quantificar as diferenças anuais para a AOD.

A análise dos valores anuais médios da AOD MODIS 3k e 10k para Alta Floresta mostraram consideráveis diferenças interanuais. As diferenças entre os produtos 3k e 10k variaram de aproximadamente 2% nos anos de 2002 e 2015 a 34% nos anos de 2008 e 2009. Particularmente o ano de 2002 não deve ser levado em consideração nas estatísticas anuais, pois como as medidas AOD MODIS foram analisadas a partir de maio desse ano, acredita-se que os altos valores de média e mediana sejam influenciados pelo maior número

de medidas no período crítico da emissão de queimadas.

As diferenças relativas entre a AOD MODIS 3k e 10k seguem um padrão inverso aos valores médios e medianos da série, quanto maior a carga de aerossóis maiores os valores da AOD MODIS, menor é a diferença relativa entre os produtos. Através da Tabela 2 ainda é possível quantificar os maiores valores anuais da AOD MODIS 3k e 10k e compara-los com medidas AOD MODIS realizadas por outros estudos na Amazônia. Devido à escassez de trabalhos que avaliem os produtos MODIS 3k e 10k para Amazônia os resultados aqui apresentados foram comparados aos resultados de Sena et al. (2013), Cirino et al. (2014) que utilizaram os produtos AOD MODIS 10k e com os trabalhos de Prado et al. (2017) e Costa et al. (2018) que utilizaram o produto MOD08, para AOD com resolução espacial aproximada de 100 km.

O trabalho de Cirino et al. (2014) utilizou as estimativas da AOD MODIS 10k para alimentar um modelo de irradiância no período de 2000 a 2012, embora não tenha quantificado os valores

médios anuais para AOD, é possível observar em sua série temporal que os valores médios de AOD não chegaram a 0,40. Para os anos mais influenciados pela queima de biomassa, 2005 e 2010 encontraram aproximadamente AOD em torno de 0,30. Esses valores são ligeiramente inferiores aos resultados aqui mostrados, médias de 0,52 e 0,42 para AOD MODIS 10k nos anos de

2005 e 2010, respectivamente. A justificativa para essas diferenças pode estar associada a posição geográfica das áreas selecionadas, já que a análise de Cirino et al. (2014) foi sobre uma região da Amazônia Central enquanto os resultados aqui mostrados são representativos da região Sul da Bacia Amazônica.

Tabela 2. Estatística descritiva para os valores anuais da AOD MODIS 3k e 10k e suas respectivas diferenças relativas para o site de Alta Floresta.

Alta Floresta							
Ano	MODIS 3k			MODIS 10k			Dif. Média
	Média	Desvio	Mediana	Média	Desvio	Mediana	%
2002	0,76	0,88	0,47	0,75	0,84	0,43	01,97
2003	0,36	0,45	0,22	0,42	0,52	0,23	14,27
2004	0,46	0,52	0,26	0,51	0,62	0,25	09,71
2005	0,52	0,74	0,23	0,62	0,85	0,24	15,77
2006	0,36	0,53	0,21	0,34	0,60	0,15	06,94
2007	0,49	0,75	0,22	0,47	0,77	0,13	02,19
2008	0,23	0,21	0,18	0,15	0,20	0,07	34,15
2009	0,22	0,20	0,17	0,14	0,13	0,09	34,11
2010	0,42	0,56	0,19	0,42	0,59	0,13	00,05
2011	0,19	0,19	0,15	0,14	0,17	0,08	27,69
2012	0,24	0,22	0,18	0,20	0,24	0,12	19,15
2013	0,18	0,15	0,14	0,12	0,14	0,07	32,00
2014	0,20	0,16	0,16	0,15	0,16	0,10	21,98
2015	0,29	0,28	0,20	0,28	0,33	0,12	02,21
2016	0,22	0,21	0,15	0,14	0,17	0,08	33,99
2017	0,32	0,60	0,16	0,30	0,62	0,09	07,03
Média	0,34	0,42	0,21	0,32	0,43	0,15	16,45

De outra forma, o trabalho de Sena et al. (2013) quantificou os valores médios da AOD MODIS 10k de 2000 a 2009 para sites de Floresta e Cerrado na Amazônia Legal, utilizando esses valores para estimar a forçante radiativa do aerossol sobre esses biomas. Em comparação aos resultados já mencionados Sena et al. (2013) encontrou AOD média de 0,50 para o ano de 2005, valor praticamente igual aos registros aqui mostrados. As médias para os demais anos também foram consistentes com as médias observadas na Tabela 2.

Já os trabalhos de Prado et al. (2017) e Costa et al. (2018), analisaram a série temporal da AOD MODIS com os produtos MOD08 para os períodos de 2000 a 2012 e 2010 a 2014, respectivamente. O trabalho de Prado et al. (2017) utilizou um recorte que cobriu praticamente todo Estado de Mato Grosso e resultou em valores médios de AOD, que assim como o trabalho de Cirino et al. (2014), não ultrapassaram 0,40 em nenhum dos anos analisados. Por outro lado, o trabalho de Costa et al. (2018) utilizou vários

recortes sobre vários sites da Amazonia Legal, resultando em valores médios de AOD variando entre 0,40 a 0,75 sobre os diferentes sites analisados.

Para realizar uma comparação prévia entre os resultados dos diferentes biomas, este trabalho também quantificou os valores médios, desvios e medianas para o site de Cuiabá. As estatísticas descritivas anuais para os produtos AOD MODIS 3k, 10k e a diferença média entre estes é mostrada na Tabela 3.

Ao comparar os valores médios de todo período (2002-2017), nas últimas linhas das Tabelas 2 e 3, foi encontrada uma diferença em torno de 40% para AOD MODIS 10k e em torno de 50% para AOD MODIS 3k entre os biomas. Calculando essa mesma diferença para os valores médios da AOD MODIS 10k (2000-2009) no trabalho de Sena et al. (2013) foi encontrada uma diferença de aproximadamente 48% entre os biomas de Floresta e Cerrado. Para fins de comparação entre os sites de Alta Floresta e Cuiabá, trabalhos realizados com a AERONET

como Romera et al. (2019) e Palácios et al. (2020) também reforçam que as cargas sobre a região Norte do Mato Grosso são fortemente influenciadas pelas emissões de queima que ocorrem no arco do desmatamento.

Como sugerido anteriormente, maiores cargas de aerossóis resultam em menores diferenças entre os produtos 3k e 10k, desta forma foi verificado que essa diferença é maior para o site de Cuiabá, em torno de 23% enquanto que para Alta Floresta essa diferença foi de aproximadamente 17%. Para investigar as possíveis alterações de proporção entre os produtos MODIS 3k e MODIS 10k foi calculada a razão

para as médias anuais (10k/3k). Essa razão permitiu avaliar o quanto essas estimativas estão próximas e também o quanto uma estimativa por ser superior ou inferior a outra. A razão MODIS 10k por MODIS 3k é mostrada junto com os registros de queimadas para o Estado de Mato Grosso (INPE, 2020) na Figura 4. Quando a razão (10k/3k) se aproxima de 1 significa que as medidas do MODIS 3k são próximas as medidas do MODIS 10k, caso essa razão seja superior a 1 significa que as medidas do MODIS 10k são superiores e caso a razão seja menor que 1 significa que as medidas do MODIS 3k é que são superiores.

Tabela 3. Estatística descritiva para os valores anuais da AOD MODIS 3k e 10k e suas respectivas diferenças relativas para o site de Cuiabá.

Cuiabá							
Ano	MODIS 3k			MODIS 10k			Dif. Média
	Média	Desvio	Mediana	Média	Desvio	Mediana	%
2002	0,37	0,46	0,19	0,34	0,44	0,18	07,54
2003	0,19	0,31	0,12	0,14	0,23	0,06	28,20
2004	0,24	0,37	0,13	0,22	0,40	0,08	04,40
2005	0,21	0,35	0,11	0,15	0,29	0,07	27,77
2006	0,22	0,43	0,12	0,23	0,49	0,05	01,52
2007	0,26	0,43	0,11	0,23	0,42	0,07	13,07
2008	0,14	0,18	0,08	0,09	0,15	0,04	36,75
2009	0,13	0,13	0,10	0,08	0,10	0,06	38,97
2010	0,25	0,42	0,09	0,21	0,36	0,07	12,75
2011	0,12	0,14	0,07	0,07	0,13	0,04	34,25
2012	0,14	0,18	0,08	0,09	0,17	0,04	31,43
2013	0,13	0,15	0,10	0,07	0,11	0,03	46,55
2014	0,17	0,17	0,13	0,14	0,18	0,08	18,37
2015	0,20	0,26	0,15	0,14	0,20	0,09	28,19
2016	0,17	0,19	0,12	0,12	0,19	0,08	24,71
2017	0,16	0,18	0,11	0,14	0,19	0,07	15,50
Média	0,20	0,28	0,12	0,16	0,26	0,07	23,13

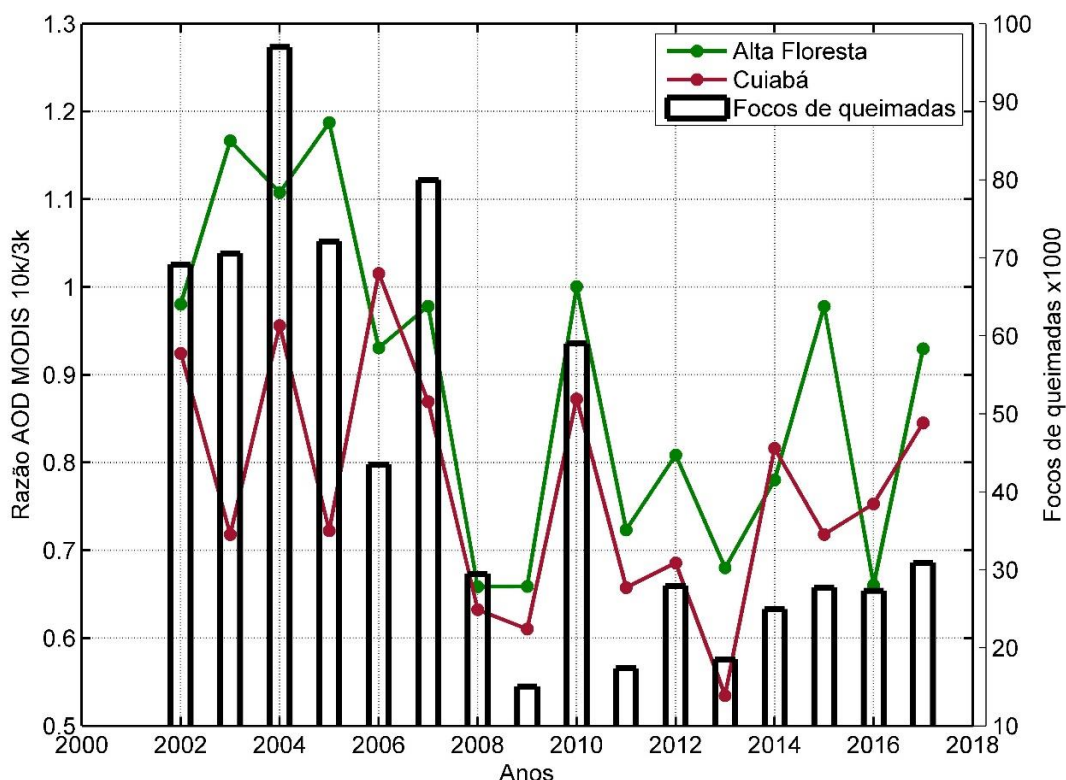


Figura 4. Razão entre os produtos AOD MODIS 10k por AOD MODIS 3k para os sites de Alta Floresta e Cuiabá e os registros de queimadas para o estado do Mato Grosso fornecidos pelo INPE.

Para Alta Floresta é possível observar que no início da série, com elevados registros de queimadas a razão 10k/3k se mantém próximo ou acima de 1, enquanto que para Cuiabá a razão fica próximo ou abaixo de 1. Essas diferenças podem estar relacionadas as formas distintas de como as emissões das queimadas podem afetar os diferentes sites. Esse trabalho sugere que no início dos anos 2000 as altas taxas de queimadas associadas ao desmatamento no Norte do Estado de Mato Grosso, sejam responsáveis pelos diferentes impactos ocasionados sobre os sites aqui estudados, com um agravante para Alta Floresta que se encontra imerso nessa região de desmatamento. O ano de 2010 representa uma característica distinta, onde ambos sites seriam fortemente impactados pelas queimadas (Palácios et al., 2020), para esse caso além de razões 10k/3k similares para os sites, os produtos também possuem relativa proximidade.

Variações sazonais

Os histogramas de frequências relativas mostrados na Figura 5, e as linhas de frequências normalizadas mostradas na Figura 6 evidenciam e quantificam as diferenças sazonais das estimativas da AOD MODIS 3k e 10k para os sites de Alta

Floresta e Cuiabá. Como discutido anteriormente a influência das queimadas regionais na estação seca mudam consideravelmente as propriedades óticas dos aerossóis (Sena et al., 2013; Prado et al., 2017; Costa et al., 2018; Romera et al., 2019; Palácios et al., 2020), fato observado para ambos sites analisados.

Os histogramas de frequência relativa (Figura 5 (a) e (b)) mostram as distribuições da AOD MODIS 3k e 10k para os sites de Alta Floresta e Cuiabá durante a estação seca. A comparação entre os produtos 3k e 10k, para estação seca, mostra um padrão similar para ambos sites, parte significativa das estimativas de AOD estão concentradas em valores próximos a zero, em média 45% para o site de Alta Floresta e 62% para o site de Cuiabá. Entretanto, a comparação entre os sites mostra uma inversão para valores de AOD acima de 0,30, sendo os maiores percentuais para o site de Alta Floresta. Para estação chuvosa (Figura 5 (c) e (d)) o comportamento é similar, entretanto, é possível observar que a distribuição de valores de AOD próximos a zero é ainda maior, em torno de 70% e 82% para os sites de Alta Floresta e Cuiabá, respectivamente.

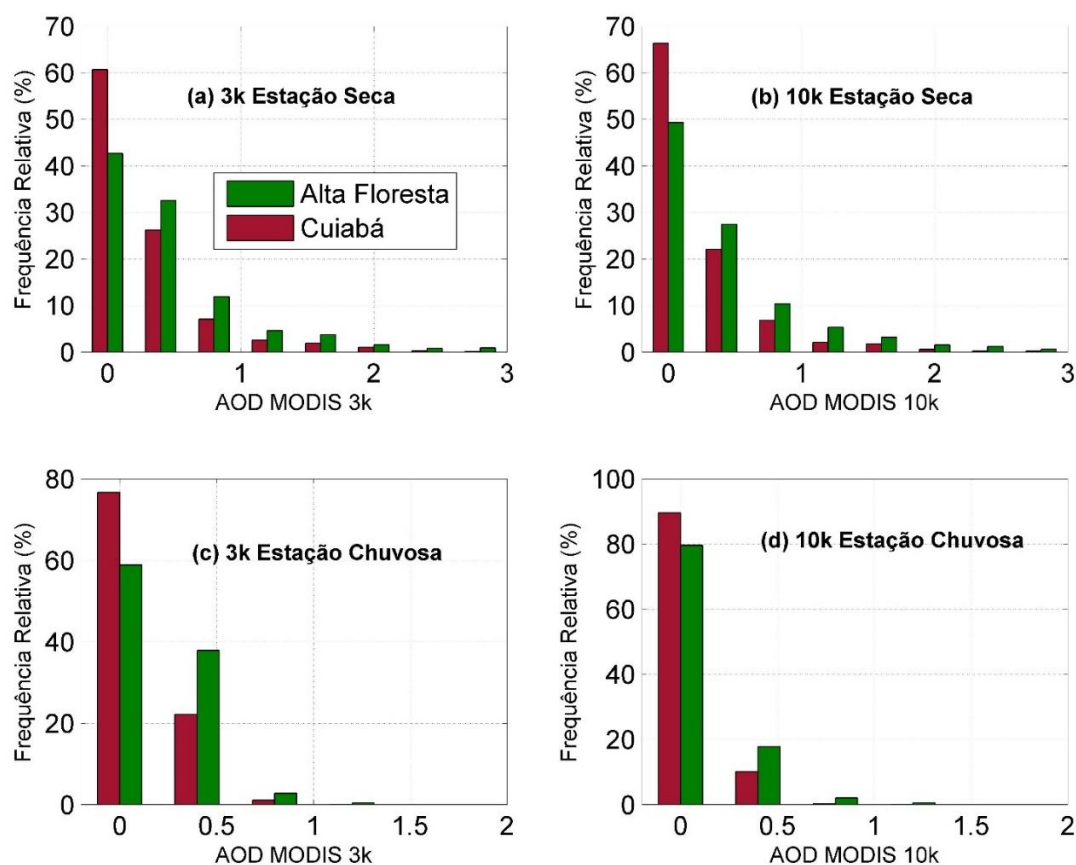


Figura 5. Histogramas de frequência relativa para AOD MODIS sobre os sites de Alta Floresta e Cuiabá separando os produtos: (a) AOD MODIS 3k para a estação seca, (b) AOD MODIS 10k para a estação seca, (c) AOD MODIS 3k para a estação chuvosa, (d) AOD MODIS 10k para a estação chuvosa.

A variação sazonal da AOD MODIS para os produtos 3k e 10k sobre os sites analisados ainda é evidenciada na Figura 6 e quantificada na Tabela 4. As curvas de frequência acumulada normalizada mostram o comportamento similar para a distribuição da AOD MODIS em ambos sites. As linhas que representam a frequência acumulada normalizada para os sites praticamente se sobrepõem para baixos valores de AOD, entretanto, para Alta Floresta a inclinação para os maiores valores de AOD é mais evidente. Esse comportamento é similar para ambos produtos (3k e 10k) e para ambas estações, seca e chuvosa.

Os valores da Tabela 4 permitem avaliar as possíveis diferenças entre a AOD MODIS entre os produtos 3k e 10k, entre as estações seca e chuvosa e entre os sites de Alta Floresta e Cuiabá. Para Alta Floresta foi verificado que praticamente

não existe diferença entre os produtos 3k e 10k (em torno de 6%) na estação seca. Já para a estação chuvosa foi encontrada uma diferença aproximada de 44%, sendo as estimativas 3k superiores. Ainda sobre o site de Alta Floresta foram encontradas diferenças sazonais de 65% e 78% para os produtos 3k e 10k, respectivamente. Para o site de Cuiabá o resultado da comparação entre os produtos 3k e 10k foram semelhantes ao site de Alta Floresta, foram encontradas diferenças aproximadas de 2% e 34% para as estações seca e chuvosa, respectivamente. Já para as variações sazonais foram encontradas diferenças de 48% e 62% para os produtos 3k e 10k, respectivamente. Estes resultados indicam que as diferenças entre os produtos 3k e 10k são mais evidentes na estação chuvosa e que o produto 10k apresenta maior variabilidade entre as estações seca e chuvosa.

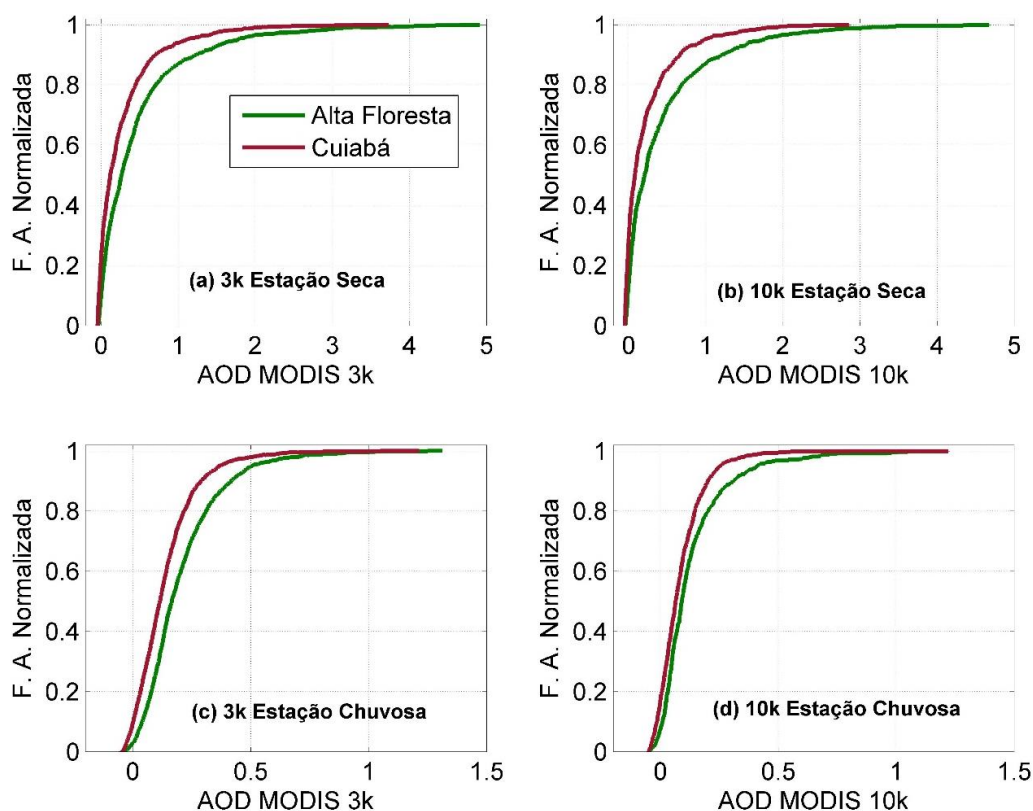


Figura 6. Frequência Acumulada (F. A) Normalizada: (a) AOD MODIS 3k para a estação seca, (b) AOD MODIS 10k para a estação seca, (c) AOD MODIS 3k para a estação chuvosa, (d) AOD MODIS 10k para a estação chuvosa.

Com relação as diferenças entre os valores médios de AOD MODIS 3k e 10k dos sites analisados, foi observado que não existe diferença entre as estimativas na estação chuvosa. Já para estação seca foram encontradas diferenças aproximadas de 44% e 50% para os produtos 3k e 10k, respectivamente, sendo os maiores valores registrados para Alta Floresta. De forma geral, ambos produtos evidenciaram que os valores de AOD são similares para Alta Floresta e Cuiabá na estação chuvosa e que durante a estação seca o site de Alta Floresta é mais impactado pela alta carga de aerossóis emitidos pelas queimas regionais.

Por falta de trabalhos que avaliem e quantifiquem sazonalmente os produtos AOD MODIS para os sites aqui analisados, a comparação dos valores médios da AOD foi realizada considerando as estimativas do produto MOD08 (AOD MODIS 550nm, resolução espacial de 100km x100km) realizada por Costa et al. (2018) e com medidas da AERONET (AOD 675nm) analisada por Rothmund et al. (2018). O trabalho de Costa et al. (2018) quantificou a AOD sazonalmente sobre vários sites da Amazônia Legal encontrando médias de 0,32 e 0,17 para as estações seca e chuvosa, respectivamente, para o site de Porto Velho, que também se encontra localizado no arco do desmatamento. Esse mesmo

trabalho ainda encontrou médias de 0,30 e 0,06 para as estações seca e chuvosa no site de Cuiabá. Em comparação aos resultados aqui apresentados os valores de Costa et al. (2018) são inferiores as médias dos produtos 10k e 3k. A justificativa para essa diferença pode ser relacionada a resolução espacial do produto utilizado, já que a utilização do produto MOD08 pode perder informações espaciais e subestimar as estimativas da AOD.

O trabalho de Rothmund et al. (2018) também quantificou as médias sazonais para a AOD em alguns sites sobre a Amazônia Legal, entre os sites também se encontram Alta Floresta e Cuiabá. Estes autores utilizaram medidas da AERONET (AOD 675nm) entre os anos 2000 a 2014. Para Alta Floresta encontraram valores médios de AOD em torno de 0,37 e 0,47 para as estações chuvosa e seca, respectivamente. Já para o site de Cuiabá os valores médios foram 0,12 e 0,30 para as estações chuvosa e seca. Embora essas médias sejam levemente superiores aos resultados aqui apresentados, deve ser levado em consideração que as estimativas MODIS subestimam os valores de AOD. De forma geral foi constatado que os resultados aqui apresentados se relacionam relativamente bem com os resultados de Costa et al. (2018) e Rothmund et al. (2018) que utilizaram estimativas diferentes para a AOD.

Tabela 4. Valores de média, desvio e mediana da AOD MODIS 3k e 10k para as estações seca e chuvosa dos sites de Alta Floresta e Cuiabá. Valores calculados com as estimativas diárias de 2002 a 2017.

Site	Estação	Produto	Média	Desvio	Mediana
Alta Floresta	Seca	MODIS 10k	0,42	0,61	0,22
		MODIS 3k	0,45	0,59	0,28
	chuvosa	MODIS 10k	0,09	0,09	0,07
		MODIS 3k	0,16	0,13	0,14
Cuiabá	Seca	MODIS 10k	0,21	0,36	0,09
		MODIS 3k	0,25	0,38	0,14
	chuvosa	MODIS 10k	0,08	0,10	0,06
		MODIS 3k	0,12	0,12	0,10

Conclusão

Esse trabalho foi o resultado da análise e aplicação dos produtos AOD MODIS com diferentes resoluções espaciais, 3k e 10k, do algoritmo *Dark Target* (DT) para uma longa série de dados (2002-2017) sobre sites de Floresta e Cerrado na Amazônia Legal. Após uma comparação prévia entre os produtos AOD MODIS 3k e 10k com as medidas da AERONET e a análise desses produtos para os sites de Alta Floresta e Cuiabá, Floresta e Cerrado, respectivamente, as principais conclusões desse trabalho foram:

Foi verificado que as estimativas totais da AOD MODIS 3k e 10k para os sites de Alta Floresta e Cuiabá subestimaram os valores de AOD em comparação com as medidas da AERONET. As estimativas totais dos produtos MODIS 3k e 10k subestimaram a AOD em torno de 13% em Alta Floresta e 22% em Cuiabá. Também foi verificado que para elevadas cargas de aerossóis, AOD AERONET maior de 2,0 ocorre uma inversão na distribuição dos pontos e os produtos MODIS passam a superestimar os valores de AOD.

A análise interanual dos produtos AOD MODIS 3k e 10k evidenciou diferenças consistentes de ano para ano em ambos sites analisados, justificadas nas distribuições regionais de queima de biomassa levantadas por diversos trabalhos na literatura atual. Foi constatado também que quanto maior a carga de aerossóis menor foi a diferença relativa entre os produtos 3k e 10k. A comparação entre os sites mostrou que as estimativas de AOD para ambos produtos (3k e 10) são mais elevadas sobre o site de Alta Floresta, em torno de 50% para 3k e 40% para o 10k.

A análise sazonal quantificou as médias, desvios e medianas para os produtos AOD MODIS 3k e 10k para as estações seca e chuvosa para os dois sites estudados. Foi constatado que não existem diferenças entre as estimativas dos produtos na estação seca, entretanto, em ambos

sites, durante a estação chuvosa as estimativas do MODIS 3k foram superiores em 44% e 34% em relação ao MODIS 10k para Alta Floresta e Cuiabá, respectivamente. Na estação seca as estimativas para os produtos MODIS foram de 48% e 62%, 3k e 10k respectivamente, superiores a estação chuvosa em Alta Floresta. Essa tendência nas diferenças sazonais também foi observada para Cuiabá. Em resumo ambos produtos evidenciaram que durante a estação chuvosa os valores de AOD MODIS são similares para Alta Floresta e Cuiabá e durante a estação seca o site de Alta Floresta é mais impactado pela alta carga de aerossóis emitidos pelas queimas regionais, em torno de 44% e 50% superiores a Cuiabá para os produtos 3k e 10k.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos a Faculdade de Meteorologia (FAMET) pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará pela Bolsa de Iniciação Científica PRODOUTOR contemplada pelo Projeto de Pesquisa “Influência de Oscilações Atmosféricas nas Propriedades Físicas de Aerossóis na Amazônia Oriental” Portaria PRO4463-2020.

Referências

- Artaxo, P., Martins, J. V., Yamasoe, M. A., Procopio, A. S., Pauliquevis, T. M., Andreae, M. O., Guyon, P., Gatti, L. V., Leal, A. M. C., 2002. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondonia, Amazonia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 107, 8081. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1029/2001JD000666>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Bilal, M., Nichol, J.E., 2015. Evaluation of MODIS aerosol retrieval algorithms over the

- Beijing-Tianjin-Hebei region during low to very high pollution events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120, 7941–7957. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/2015JD023082>. Acesso: 01 set. 2020.
- Cao, C., Zheng, S., Singh, R.P., 2014. Characteristics of aerosol optical properties and meteorological parameters during three major dust events (2005–2010) over Beijing, China. *Atmospheric Research* 150, 129–142. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.07.022>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Cheng, T., Chen, H., Gu, X., Yu, T., Guo, J., Guo, H., 2012. The inter-comparison of MODIS, MISR and GOCART aerosol products against AERONET data over China. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 113, 2135–2145. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.06.016>. Acesso: 01 set. 2020.
- Chu, D. A., Kaufman, Y. J., Ichoku, C., Remer, L. A., Tanré, D., and Holben, B. N., 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land, *Geophysical Research Letter* 29, 8007. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2001GL013205>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Cirino, G. G., Souza, R. F. A., Adams, K. D., Artaxo, P., 2014. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 6523–6543. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-14-6523-2014>. Acesso: 14 jun. 2020.
- Costa, R. O., Palácios, R. S., Menezes, J. A., Santos, A. C. A., Sallo, F. S., Sallo, K. F. A. P., Nogueira, J. S., 2018. Variabilidade espaço-temporal da profundidade ótica de aerossóis atmosféricos sobre a Amazônia. *Revista de Ciências Ambientais (Unilasalle)* 12, 07–21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.18316/rca.v12i1.3175>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Davidson, E. A., Araujo, A. C., Artaxo, P., Balch, J. K., Brown, I. F., Bustamante, M. M. C., Coe, M. T., Defries, R. S., Keller, M., Longo, M., Munger, J. W., Schroeder, W., Soares-Filho, B. S., Souza Jr, C. M., Wofsy, S. C., 2012. The Amazon basin in transition. *Nature* 481, 321–328. Disponível: <https://doi.org/10.1038/nature10717>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Dayou, J., Chang, J. H. W., Sentian, J., 2014. Ground-based aerosol optical depth measurement using sunphotometers. *Kota Kinabalu: Springer*. 67p. Disponível: <https://doi.org/10.1007/978-981-287-101-5>. Acesso: 14 jun. 2020.
- Dickinson J. E., Tessa M. H., 2019. Gregory J.M. Seasonality of climatic drivers of flood variability in the conterminous United States, *Nature*, 9:15321. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51722-8>. Acesso: 28 mar. 2022.
- Eibedingil, I. G., Gill, T.E., R. Van Pelt, S., Tong, D.Q., 2021. Comparison of aerosol optical depth from modis product collection 6.1 and aeronet in the western united states. *Remote Sensing* 13(12), 1–25. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs13122316>. Acesso: 28 mar. 2022.
- Fuzzi, S., Decesari, S., Facchini, M. C., Cavalli, F., Emblico, L., Mircea, M., Andreae, M.O., Trebs, I., Hoffer, A., Guyon, P., Artaxo, P., Rizzo, L. V., Lara, L. L., Pauliquevis, T., Maenhaut, W., Raes, N., Chi, X., Mayol-Bracero, O. L., Soto-García, L. L., Claeys, M., Kourtschev, I., Rissler, J., Swietlicki, E., Tagliavini, E., Schkolnik, G., Falkovich, A. H., Rudich, Y., Fisch, G., Gatti, L. V., 2007. Overview of the inorganic and organic composition of size-segregated aerosol in Rondônia, Brazil, from the biomass-burning period to the onset of the wet season. *Journal of Geophysical Research* 112, D01201. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2005JD006741>. Acesso: 02 ago. 2020.
- Gliß, J et al., 2021. AeroCom phase III multi-model evaluation of the aerosol life cycle and optical properties using ground- And space-based remote sensing as well as surface in situ observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21(1), 87–128. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-21-87-2021>. Acesso: 28 mar. 2022.
- He, Q., Zhang, M, Huang, B., Tong, X., 2017. MODIS 3 km and 10 km aerosol optical depth for China: Evaluation and comparison. *Atmospheric Environment* 153, 150–162. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.023>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Hoelzemann, J. J., Longo, K.M., Fonseca, R. M., Rosário, N. M. E., Elbern, H., Freitas, S. R., Pires, C., 2009. Regional representativity of AERONET observation sites during the biomass burning season in South America determined by correlation studies with MODIS Aerosol Optical Depth. *Journal of Geophysical Research* 114, D13301. Disponível: 909

- <https://doi.org/10.1029/2008JD010369>. Acesso: 01 set. 2020.
- Holben, B., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A., 1998. AERONET - A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment* 66, 1-16. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5). Acesso: 12 jun. 2020.
- INPE, 2020. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais. Disponível: <http://www.inpe.br/queimadas>. Acesso: 14 jun. 2020.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Jin, S., Ma, Y., Zhang, M., Gong, W., Dubovik, O., Liu, B., Shi, Y., Yang, C., 2019. Retrieval of 500 m Aerosol Optical Depths from MODIS Measurements over Urban Surfaces under Heavy Aerosol Loading Conditions in Winter. *Remote Sensing* 11(19), 2218-2230. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs11192218>. Acesso: 01 ago. 2020.
- Kang, N., Kumar, K., Hu, K., Yu, X., Yin, Y., 2016. Long-term (2002–2014) evolution and trend in Collection 5.1 Level-2 aerosol products derived from the MODIS and MISR sensors over the Chinese Yangtze River Delta. *Atmospheric Research* 181, 29-43. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.008>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Kumar, K. R., Sivakumar, V., Yin, Y., Reddy, R. R., Kang, N., Diao, A. J. A., Yu, X., 2014. Long-term (2003-2013) climatological trends and variations in aerosol optical parameters from MODIS over three stations in South Africa. *Atmospheric Environment* 95, 400-408. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.001>. Acesso: 02 ago. 2020.
- Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., Remer, L.A., Sayer, A.M., Patadia, F., Hsu, N.C., 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean *Atmospheric Measurement Techniques* 6, 2989–3034. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5194/amt-6-2989-2013>. Acesso: 01 set. 2020.
- Malavelle, F. F., Haywood, J. M., Mercado, L. M., Folberth, G. A., Bellouin, N., Sitch, S., and Artaxo, P., 2019. Studying the impact of biomass burning aerosol radiative and climate effects on the Amazon rainforest productivity with an Earth system model. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 19, 1301–1326. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-19-1301-2019>. Acesso: 28 mar. 2022.
- Mansour A., 2019. A comparison study between AOD data from MODIS deep blue collections 51 and 06 and from AERONET over Saudi Arabia, *Atmospheric Research* 225, 88-95. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.040>. Acesso: 28 mar. 2022.
- Marengo, J. A., Nobre, C. A., Tomasella, J., Cardoso, M. F., Oyama, M. D., 2008. Hydroclimatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, 1773-1778. Disponível: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0015>. Acesso: 12 set. 2020.
- Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R., Rodriguez, D. A., 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letter* 38, L12703. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>. Acesso: 01 ago. 2020.
- Martin, S. T., Andreae, M. O., Althausen, D., Artaxo, P., Baars, H., Borrmann, S., Chen, Q., Farmer, D. K., Guenther, A., Gunthe, S. S., Jimenez, J. L., Karl, T., Longo, K., Manzi, A., Müller, T., Pauliquevis, T., Petters, M. D., Prenni, a. J., Pöschl, U., Rizzo, L. V., Schneider, J., Smith, J. N., Swietlicki, E., Tota, J., Wang, J., Wiedensohler, A., Zorn, S. R., 2010. An overview of the Amazonian Aerosol Characterization Experiment 2008 (AMAZE-08). *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 415–11. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-10-11415-2010>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Munchak, L., Levy, R., Mattoo, S., Remer, L., Holben, B., Schafer, J., Hostetler, C., Ferrare, R., 2013. MODIS 3 km aerosol product: applications over land in na urban/suburban region. *Atmospheric Measurement Techniques* 6, 1747-1759. Disponível: <https://doi.org/10.5194/amt-6-1747-2013>. Acesso: 14 jun. 2020.

- NASA, 2019. Dark Target - Aerosol Retrieval Algorithm. accessed on 1 September, 2019. National Aeronautics and Space Administration. Disponível: <https://darktarget.gsfc.nasa.gov/>. Acesso: 01 set. 2020.
- Nascimento, J. P., Bela, M.M., Meller, B.B., Banducci, A.L., Rizzo, L.V., Vara-Vela, A.L., Barbosa, H.M.J., Gomes, H., Rafee, S.A.A., Franco, M.A., Carbone, S., Cirino, G.G., Souza, R.A.F., Mckeen, S.A., Artaxo, P., 2021. Aerosols from anthropogenic and biogenic sources and their interactions-modeling aerosol formation, optical properties, and impacts over the central Amazon basin. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21(9), 6755–6779. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-21-6755-2021>. Acesso: 28 mar. 2022.
- Neto, N. M. et al., 2019. Amazonian Biomass Burning enhances tropical Andean Glaciers Melting. *Nature*, 9:16914. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53284-1>. Acesso: 28 mar. 2022.
- Nichol, J.E., Bilal, M., 2016. Validation of MODIS 3 km resolution aerosol optical depth retrievals over Asia. *Remote Sensing* 8 (4), 328. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs8040328>. Acesso: 01 set. 2019.
- Opálková, M., Burda, M., Navrátil, M., Špunda., 2019. Influence of air pollution to incident photosynthetically active radiation during clear sky conditions in Ostrava, Czech Republic. *Atmospheric Environment*, 215, 116910. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116910>. Acesso: 28 mar. 2022.
- Palácios, R. S., Romera, K. S., Curado, L. F. A., Banga, N. M., Rothmund, L. D., Sallo, F.d.S., Morais, D., Santos, A. C. A., Moraes, T. J., Morais, F.G., Landulfo, E., Franco, M. A. M., Kuhnen, I. A., Marques, J. B., Nogueira, J. S., Júnior, L. C. G. d. V., Rodrigues, T. R., 2020. Long Term Analysis of Optical and Radiative Properties of Aerosols in the Amazon Basin. *Aerosol and Air Quality Research* 20, 139-154. Disponível: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0189>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Palácios, R. S., Sallo, F. S., Marques, J. B., Santos, A.C.A; Menezes, J.A., Biudes, M. S., Nogueira, J. S., 2018. Variabilidade Espaço-Temporal da Profundidade Ótica de Aerossóis em Regiões de Cerrado e Pantanal na Região Central do Brasil. *Nativa* 6, 56-65. Disponível: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i1.5153>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Palácios, R.S., Artaxo, P., Cirino, G.G., Nakale, V., Morais, F.G., Rothmund, L.D., Biudes, M.S., Machado, N.G., Curado, L.F.A., Marques, J.B., Nogueira, J.S., 2022. Long-term measurements of aerosol optical properties and radiative forcing (2011-2017) over Central Amazonia. *Atmosfera* 35(1), 143-163. Disponível: <https://doi.org/10.20937/ATM.52892>. Acesso: 28 mar. 2022.
- Pope, R. J., Arnold, S. R., Chipperfield, M. P., Reddington, C. L. S., Butt, E. W., Keslake, T. D., Feng, W., Latter, B. G., Kerridge, B. J., Siddans, R., Rizzo, L., Artaxo, P., Sadiq, M., Tai, A. P. K., 2020. Substantial Increases in Eastern Amazon and Cerrado Biomass Burning-Sourced Tropospheric Ozone. *Geophysical Research Letters*. 47, e2019GL084143. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2019GL084143>. Acesso: 28 mar. 2022.
- Prado, N. V., Marilene, S., Coelho, S. C., 2017. Estudo da Variabilidade Temporal da Profundidade Ótica do Aerossol Utilizando Dados de Sensoriamento Remoto Sobre a Região de Transição entre a Floresta Amazônica e o Cerrado. *Revista Brasileira de Meteorologia* 32 (4) 649-658. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786324012>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Procopio, A. S., Artaxo, P., Kaufman, Y. J., Remer, L. A., Schafer, J. S., Holben, B. N., 2004. Multiyear analysis of amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. *Geophysical Research Letters* 31, L03108. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2003GL018646>. Acesso: 01 set. 2020.
- Remer, L., Mattoo, S., Levy, R., Munchak, L., 2013. MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* 6, 69-112. Disponível: <https://doi.org/10.5194/amtd-6-69-2013>. Acesso: 02 ago. 2020.
- Rizzo, L. V., Artaxo, P., Müller, T., Wiedensohler, A., Paixão, M., Cirino, G. G., Arana, A., Swietlicki, E., Roldin, P., Fors, E. O., Wiedemann, K. T., Leal, L. S. M., Kulmala, M., 2013. Long term measurements of aerosol optical properties at a primary forest site in Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 2391–2413. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-13-2391-2013>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Romera, K. S., De Musis, C. R., Palácios, R. S., Curado, L. F. A., Nogueira, J. S., Marques, J.

- B., Costa, R. O., Brunelli, T. C., Duarte, L. G., 2019. Variabilidade interanual das propriedades óticas de aerossóis em biomas distintos na Amazônia Legal. *Revista Brasileira de Climatologia* 25, 424-443. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.61621>. Acesso: 14 jun. 2020.
- Rothmund, L. D., Palácios, R. S., Marques, J. B., Oliveira, L. G. B., Rodrigues, T. R., Curado, L. F. A., Nogueira, J. S., 2018. Characterization of physical properties of aerosols atmospheric on regions affected by burning biomass in Brazil. *Holos Environment* 18, 68-86. Disponível: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v18i1.12248>. Acesso: 01 set. 2020.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change*. New York: John Wiley & Sons, 1152p.
- Sena, E. T., Artaxo, P., Correia, A. L., 2013. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosols and the effects of land use change in Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 1261–1275. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-13-1261-2013>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Wei, J., Li, Z., Peng, Y., Sun, L., 2019. MODIS Collection 6.1 aerosol optical depth products over land and ocean: validation and comparison. *Atmospheric Environment* 201, 428-440. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.004>. Acesso: 02 ago. 2020.
- Xiaojing, S., Zhongfeng, Q., Muhammad, B., 2018. Validation of Modis Aerosol Optical Depth Over South China Sea. *IGARSS 2018 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Disponível: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517339>. Acesso: 02 ago. 2020.