



Avaliação da Profundidade Ótica dos Aerossóis dos produtos MODIS 3k e 10k para um site de Floresta na Amazônia

Lucas Rangel Coringa Barros¹

Augusto Gabriel da Costa Pereira²

Tamires Fernandes de Oliveira³

Danielle Christine Stenner Nassarden⁴

Francisco de Souza Oliveira⁵

Rafael da Silva Palácios⁵

RESUMO

As incertezas associadas as variações espaço-temporal dos aerossóis têm fortes impactos sobre o clima. As análises desenvolvidas por sensoriamento remoto de resolução moderada fornecem importantes informações sobre os aerossóis em escalas regionais e global. No Brasil, entretanto, é notória a lacuna sobre a aplicação de tais produtos, principalmente do produto para a profundidade óptica do aerossol (AOD) de resolução espacial de 3 km. Nesse sentido esse trabalho teve como objetivo avaliar as estimativas da AOD dos produtos MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de resoluções espaciais de 3 km e 10 km. As medidas de AOD AERONET (*Aerosol Robotic Network*) foram utilizadas como referência para avaliação dos produtos MODIS. As estimativas foram avaliadas entre 2002 e 2017 sobre a região de Alta Floresta - MT, na Amazônia. Os resultados mostraram que ambos os produtos subestimaram os valores de AOD. Foi verificado que na estação chuvosa, a baixa magnitude da AOD provoca grande dispersão entre as medidas da AERONET x MODIS, provocando tanto efeitos de subestimação quanto de superestimação. No entanto, na estação seca o ajuste linear melhora consideravelmente, resultado direto do aumento da carga de aerossóis e conseqüentemente da magnitude dos valores de AOD. Não foi encontrada uma diferença estatisticamente significativa para as distribuições de dispersão e erros em comparação aos diferentes produtos, 3 k e 10k. Esse resultado evidencia que o produto 3k, devido a sua melhor resolução espacial, pode ser aplicado em análises locais tais como a análise de plumas de fumaça emitidas pelas queimadas na área de estudo.

Palavras-chave: AOD, AERONET, MOD04, MYD04, Variação sazonal.

1 Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. E-mail: <lucasrangelcoringa@gmail.com>.

2 Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará.

3 Programa de Pós-graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará.

4 Universidade Federal do Mato Grosso.

5 Universidade Federal do Pará.

ABSTRACT

Evaluation of the Optical Depth of Aerosols of MODIS 3k and 10k products for an Amazon Forest site. The uncertainties associated with space-time variations of aerosols have strong impacts on climate. Analyzes developed by remote sensing of moderate resolution provide important information about aerosols at regional and global scales. In Brazil, however, the lack of application of such products is notorious, mainly the product for aerosol optical depth (AOD) with a spatial resolution of 3 km. In this sense, this work aimed to evaluate the AOD estimates of MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) products with spatial resolutions of 3 km and 10 km. AERONET (Aerosol Robotic Network) AOD measurements were used as a reference for evaluating MODIS products. The estimates were evaluated between 2002 and 2017 over the Alta Floresta - MT region, in the Amazon. The results showed that both products underestimated the AOD values. It was verified that in the rainy season, the low magnitude of the AOD causes great dispersion between the measures of AERONET x MODIS, causing both underestimation and overestimation effects. However, in the dry season, the linear adjustment improves considerably, as a direct result of the increase in the aerosol load and, consequently, of the magnitude of the AOD values. No statistically significant difference was found for the scatter and error distributions compared to the different products, 3k and 10k. This result shows that the 3k product, due to its better spatial resolution, can be applied in local analyzes such as the analysis of smoke plumes emitted by fires in the study area.

Keywords: AOD, AERONET, MOD04, MYD04, Seasonal variation.

INTRODUÇÃO

A composição entre partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera é denominada aerossol atmosférico (Seinfeld e Pandis, 2006, Palácios et al., 2022a). Essas partículas podem ser emitidas tanto de forma natural quanto de forma antropogênica e assim podem apresentar diferentes propriedades físicas e óticas (Seinfeld e Pandis, 2006, Gustafsson e Ramanathan, 2016). As fontes naturais de aerossóis emitem partículas como: poeira, cinzas vulcânicas, pulverização do mar e fuligem devido a queima de biomassa, ao passo que, os aerossóis de fontes antropogênicas são gerados a partir da combustão de combustíveis fósseis ou biomassa ou emissão de gases industriais (IPCC, 2013; Dayou et al., 2014).

Dependendo de suas propriedades, os aerossóis podem exercer grande influência no clima (IPCC, 2013; Dayou et al., 2014; Palácios et al., 2022b), de forma direta através da absorção e espalhamento da radiação solar, e de maneira indireta ao atuarem como núcleo de condensação das nuvens, alterando suas características microfísicas, e por conseguinte, a precipitação (Prado et al., 2017; Palácios et al., 2018). Ainda sobre a atuação direta no clima, os aerossóis perturbam o equilíbrio radioativo do sistema Terra-atmosfera com o forçamento radioativo (Balakrishnaiah et al., 2011), de forma que, o estudo e o melhor entendimento das propriedades óticas dos aerossóis se torna valioso para trabalhos que avaliem o efeito dessas partículas no meio ambiente e sobre as mudanças climáticas (Wei et al., 2019).

Um dos parâmetros fundamentais na análise das propriedades óticas é a Profundidade Ótica do Aerossol (AOD), (*Aerosol Optical Depth*), que representa a magnitude da extinção da radiação solar por processos físicos de absorção e espalhamento na coluna atmosférica (Palácios et al., 2014; Palácios et al., 2018). Com base na necessidade do monitoramento em escalas regionais e globais, as propriedades óticas dos aerossóis são medidas continuamente pela rede AERONET (*Aerosol Robotic Network*), que fornece um conjunto medidas contínuas para vários parâmetros dos aerossóis em vários pontos do globo terrestre

(Holben et al., 1998).

Além das medidas da AERONET o sensoriamento remoto por satélites também auxilia no monitoramento das propriedades dos aerossóis, possibilitando uma ampla cobertura espacial e um significativo avanço no entendimento da dinâmica espaço-temporal dos aerossóis em escalas regionais e global (Kumar et al., 2014; Kang et al., 2016; Wei et al., 2019). Atualmente a aplicação de sensoriamento remoto por meio dos espectrômetros de resolução moderada como o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) tem mostrado capacidade de fornecer importantes propriedades físicas dos aerossóis (Cao et al., 2014). Um novo produto para a profundidade ótica do aerossol é estimado na Coleção 6 (C6) do MODIS, essas estimativas vão além dos dados tradicionais de resolução espacial de 10 km do nível 2. Essa nova coleção, com a aplicação do algoritmo *Dark Target* (DT), fornece um novo produto global com resolução espacial de 3 km (Remer et al., 2013).

As aplicações dos produtos MODIS para investigar as variações espaço-temporais da AOD requerem que as estimativas sejam validadas de alguma forma. Nesse sentido as medidas de AOD da AERONET são tomadas como valores de referência (Remer et al., 2013; Kang et al., 2016; Kumar et al., 2014; Wei et al., 2019). No Brasil, especificamente, poucos trabalhos avaliaram a aplicação e validação dos produtos MODIS C6 para AOD. Em uma análise global Wei et al. (2019) realizaram algumas comparações e avaliações entre os diferentes algoritmos, *Dark Target* (DT) e *Deep Blue* (DB) e da combinação entre eles (DTB) sobre o Brasil e em outros locais do globo, entretanto, estas análises se concentraram no desempenho dos algoritmos e não na validação e aplicabilidade local de um destes produtos. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar as estimativas de AOD dos produtos MODIS de resoluções de 3 km e 10 km sobre um site ao sul da bacia Amazônica.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Nesse estudo foram analisadas as estimativas dos produtos de AOD do MODIS sobre um site de Floresta pertencente ao bioma Amazônico, especificamente sobre o site de Alta Floresta, no norte do Estado de Mato e dentro da Amazônia Legal (Figura 1).

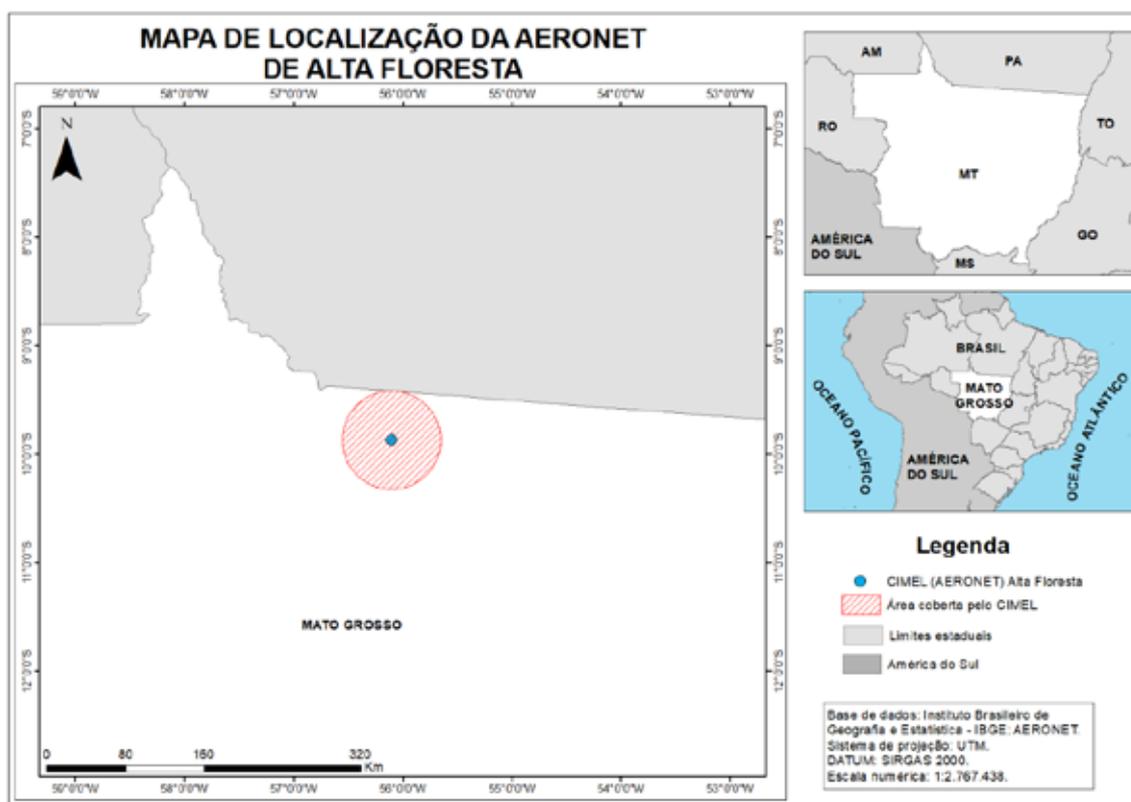


Figura 1. Localização do site de Alta Floresta, sobre os quais foram analisados os produtos MODIS para a profundidade ótica do aerossol. No centro da figura o radiômetro da AERONET CIMEL é circundado pela área de cobertura das medidas, uma área radial de 50 km de raio.

O município de Alta Floresta está localizado no extremo Norte do Estado de Mato Grosso e ao Sul da bacia Amazônica, em uma região conhecida arco do desmatamento. Essa região faz parte da frente de avanço agrícola e, portanto, representa a fronteira entre o cultivo agrícola e a floresta. Nesse site, o radiômetro CIMEL da AERONET está posicionado em uma região de transição entre floresta e pastagem (Palácios et al., 2020). O site de Alta Floresta, assim como todo território ao Sul da bacia Amazônica é influenciado fortemente pela emissão devido a queima de biomassa na estação seca (Artaxo et al., 2013; Sena et al., 2013; Palácios et al., 2020), nesse sentido, as análises dos produtos MODIS foram realizadas para as estações seca e chuvosa. O critério de classificação para as estações seca e chuvosa não foi realizada com base nos registros climatológicos de precipitação, ao invés disso, foi realizada uma separação com base nas alterações provocadas pelas emissões de queimadas nas propriedades óticas dos aerossóis, conforme Rizzo et al. (2013). Nesse critério as estações são classificadas com base na mudança das propriedades óticas dos aerossóis. Nesse trabalho a estação seca foi definida 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 2002 a 2017.

Medidas da AERONET

Esse estudo utilizou as medidas da profundidade ótica do aerossol (AOD) da AERONET (*Aerosol RObotic NETwork*) para avaliar as estimativas do algoritmo *Dark Target* (DT) do MODIS. A AERONET é uma rede global de monitoramento das propriedades óticas dos aerossóis. Por meio do sensoriamento

remoto em superfície, essa rede permite 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 (Holben et al., 1998). Os produtos derivados da AERONET estão disponíveis gratuitamente on-line em <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, assim como todas as informações sobre o sistema de monitoramento.

As medidas da AERONET seguem um protocolo para garantia e qualidade dos dados, que são divididos de acordo com o nível de processamento e variam entre 1,0, 1,5 e 2,0. As medidas de nível 1,0 representam medições brutas realizadas pelo radiômetro, o nível 1,5 apresenta medidas pré-processadas que eliminam a contaminação por nuvens e chuva, já o nível 2,0 fornece dados que passam por uma calibração final com correções de fatores locais. Nesse último nível de dados (2,0) as medidas recebem um certificado de garantia e são recomendados para publicação.

Além das medidas pontuais de AOD na faixa espectral de 500nm (AOD 500nm), este estudo também utilizou as medidas do Expoente Angstrom de Extinção para faixa espectral de 440-870 nm (EA) de nível 2,0 de 2002 a 2017. O EA fornece a dependência espectral da AOD e permite a conversão da AOD 500nm para outras faixas espectrais. Assim as medidas de AOD 500nm podem ser convertidas em AOD 550nm que é faixa de espectro utilizada nas estimadas dos produtos MODIS.

Estimativas dos produtos MODIS

Nesse estudo foram utilizados diferentes produtos de AOD estimados a partir das medidas do sensor MODIS. O MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um sensor abordo dos satélites Terra e Aqua, e 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 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 *Dark-Target* (DT) foi utilizado para as estimativas da AOD com diferentes resoluções espaciais. Os produtos DT 10 km já foram avaliados sobre as escalas regionais e global (Levy et al., 2013; Bilal et al., 2015; He et al., 2017), com um erro esperado de $\pm 0,05 + 15\%$ nos continentes (Levy et al., 2013). Os produtos de DT 3 km, também avaliado nas escalas regionais e global (Remer et al., 2013; Nichol e Bilal, 2016; He et al., 2017) possuem um erro esperado reportado de $\pm 0,05 + 20\%$ sobre o continente (Remer et al., 2013).

Nesse trabalho, especificamente, 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 da Coleção 6 (C6) MOD04_L2 (*Terra*) e MYD04_L2 (*Aqua*) para a AOD 550nm para as resoluções de 3 km (3k) e 10 km (10k) foram adquiridos com base na localização física do radiômetro da AERONET no site de Alta Floresta entre 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. 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.

Medidas complementares

Para complementar as análises sobre as variações da AOD foram utilizadas as séries temporais de precipitação sobre o site de Alta Floresta e também os registros de focos de queimadas sobre a Amazônia. Os dados de precipitação foram obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia, INMET (INMET, 2020) (<https://mapas.inmet.gov.br/>). Foram utilizados os dados da estação meteorológica de Matupá, identificação 832014. Essa estação fica a aproximadamente 60 km (linha reta) da região central de Alta Floresta. Foram utilizados os acumulados mensais de precipitação de 2002 a 2017. Os registros de focos de queimadas foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE (INPE, 2020) (<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>). Foram utilizadas as medidas do satélite de referência *Aqua* (período vespertino), acumulados mensais, para a Amazônia Legal entre 2002 a 2017.

Organização dos dados

As medidas instantâneas da AOD 500nm e do expoente de Angstrom (EA) da AERONET foram utilizadas para o cálculo de média diária. As médias diárias de AOD 500nm foram interpoladas a 550nm com o auxílio das medidas de EA. Essa interpolação foi necessária para que as medidas da AERONET fossem comparadas diretamente com as estimativas da AOD MODIS, que são realizadas em 550nm. A conversão da AOD 500nm em AOD 550nm para as medidas da AERONET foi realizada por meio da Equação 01 (Kang et al., 2016; Wei et al., 2019):

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

Já as estimativas de AOD 550nm pelos produtos AOD MODIS *Terra* (MOD) e *Aqua* (MYD) foram compilados em um único arquivo denominado AOD MODIS, foi então calculado um valor médio (média das duas estimativas ao longo do dia) de acordo com a Equação 02. Esse mesmo procedimento foi realizado tanto para as estimativas 3k como 10k.

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

Após a compilação dos dados AOD MODIS as estimativas dos produtos de resolução espacial de 3km (3k) e de 10km (10k) foram avaliados em função das medidas de referência da AOD 550nm da AERONET por meio de regressões lineares. As análises de regressão foram realizadas com base no Erro Médio Absoluto (EMA, Equação 03), na Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM, Equação 04), coeficiente de Willmott (d, Equação 05) e no coeficiente de determinação (R^2).

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|MODIS_{(i)} - AERONET_{(i)}|) \quad (03)$$

$$RQEM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MODIS_{(i)} - AERONET_{(i)})^2} \quad (04)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (MODIS_{(i)} - AERONET_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (|MODIS_{(i)} - \overline{AERONET}_{(i)}| + |AERONET_{(i)} - \overline{AERONET}_{(i)}|)^2} \right] \quad (05)$$

A análise de regressão e os parâmetros estatísticos foram avaliados para toda série da AOD MODIS (2002-2017), para os períodos considerados como estação seca e chuvosa e também para as estimativas mensais. As análises de subestimação ou superestimação das estimativas MODIS foram avaliadas pelo coeficiente angular, obtido na reta de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação total e sazonal das estimativas AOD MODIS

A Figura 2 mostra a série temporal dos acumulados mensais de precipitação para Alta Floresta e os totais mensais dos registros de queimadas para a Amazônia Legal. A variação sazonal para o regime de precipitação ao Sul da bacia Amazônica é acompanhada diretamente pela elevação dos registros de queima. Os altos registros de queimadas ocorrem principalmente nos meses de agosto, setembro e outubro (Sena et al., 2013), entretanto, é possível observar que mesmo com a elevação dos índices de precipitação em novembro e dezembro as queimadas ainda persistem por esse período. Esse fato pode ser justificado com base nas práticas de desmatamento (Artaxo et al., 2006; Artaxo et al., 2013), pois após a retirada da madeira, que geralmente ocorre no início da estação seca, a vegetação remanescente passa por um processo de secagem para que então, já no final do período seco seja utilizado o fogo na limpeza dessas áreas desmatadas.

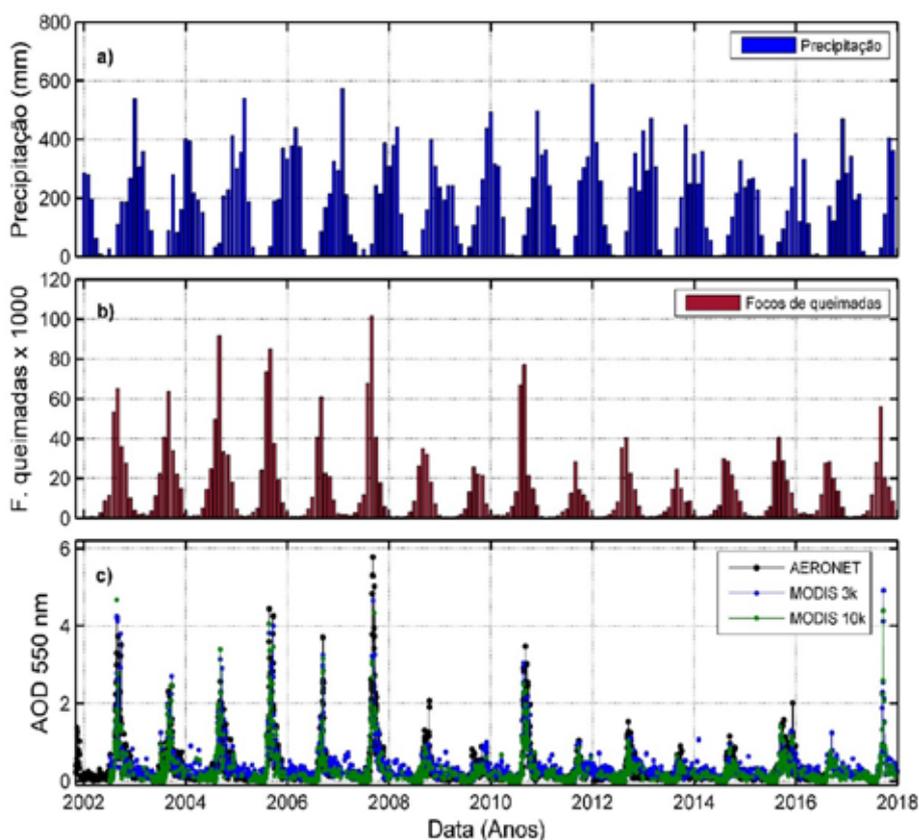


Figura 2. a) Série temporal de 2002 a 2017 para os acumulados mensais de precipitação para Alta Floresta (INMET, 2021). b) Série temporal de 2002 a 2017 para os registros de queimadas sobre a Amazônia Legal (INPE, 2021). c) Série temporal para os valores de AOD da AERONET e das estimativas MODIS 3k e 10k.

As variações sazonais da AOD sobre Alta Floresta acompanham os registros de queimadas que ocorrem na Amazônia Legal (Sena et al., 2013; Palácios et al., 2020) que são evidenciados nas Figuras 2b e 2c. A Figura 2c evidencia uma boa concordância entre as medidas da AERONET e as estimativas dos produtos MODIS de AOD para as variações sazonais. Para verificar as possíveis variações dos produtos MODIS os valores de AOD foram analisados levando em consideração todas as possíveis alterações devido ao aumento da carga de aerossóis na estação seca. A análise de regressão entre a AOD da AERONET e as estimativas da AOD MODIS para os produtos 3k e 10k é mostrada na Figura 3.

A análise de regressão (Figura 3) para todas as medidas entre 2002 a 2017 mostra os pares AERONET x MODIS ocorridos para os diferentes meses do ano. Os resultados evidenciam de forma geral que ambos produtos AOD MODIS, 3k na Figura 3a) e 10k na Figura 3b) subestimam os valores de AOD. A subestimação de ambos produtos foi em torno de 20%, entretanto é possível observar que para valores de AOD maior que 2,0, parte considerável dos pontos representam uma superestimação da AOD, resultado também encontrado para regiões da Amazônia central (Cirino et al., 2014).

Os valores máximos da AOD para o site de Alta Floresta, que geralmente ocorrem entre os meses de agosto e setembro, estão relacionados diretamente com os eventos de queimadas que ocorrem regionalmente. Grandes concentrações de aerossóis e gases são emitidas pela queima de biomassa regional que ocorrem na região Central e Norte do Brasil e cobrem extensas áreas sobre a América do Sul impactando locais relativamente distantes dos locais de origem (Martin et al., 2010; Davidson et al., 2012).

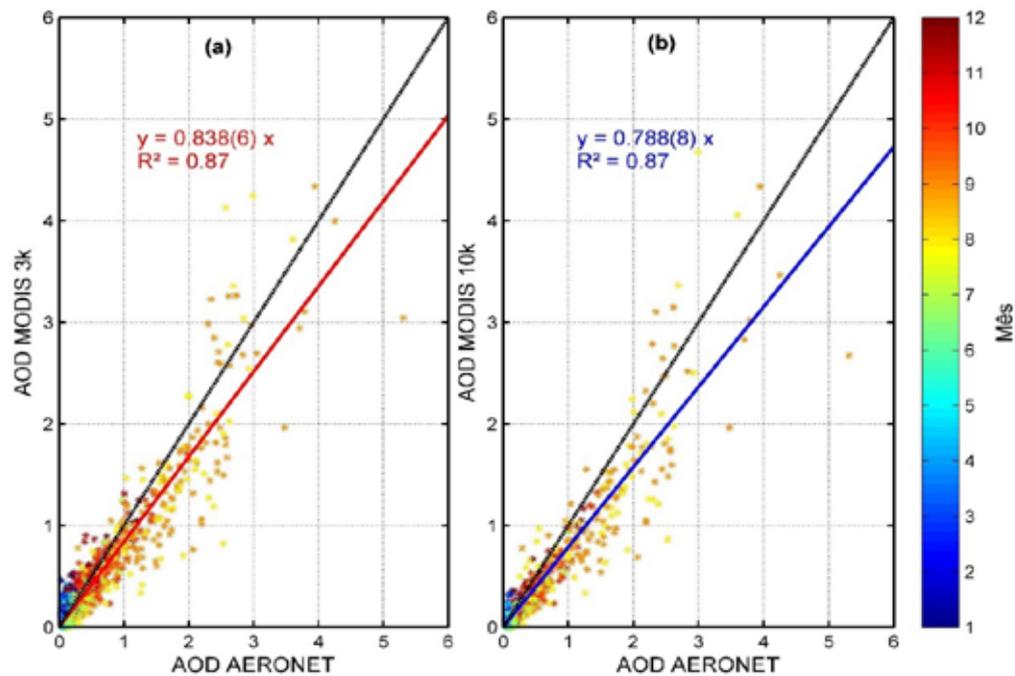


Figura 3. Análise de regressão entre os valores de AOD AERONET e as estimativas a) AOD MODIS 3k e b) AOD MODIS 10k. A coloração representa a distribuição dos pontos ao longo dos meses do ano.

A Figura 3 ainda mostra que durante os meses considerados como estação chuvosa os pontos se concentram em valores próximos a zero. Nesse sentido foram realizadas novas análises de regressões separando as estações seca e chuvosa. As regressões lineares entre AOD AERONET e AOD MODIS para ambos produtos para as estações seca e chuvosa são mostradas na Figura 4. As análises estatísticas para as regressões da Figura 4 são evidenciadas na Tabela 1.

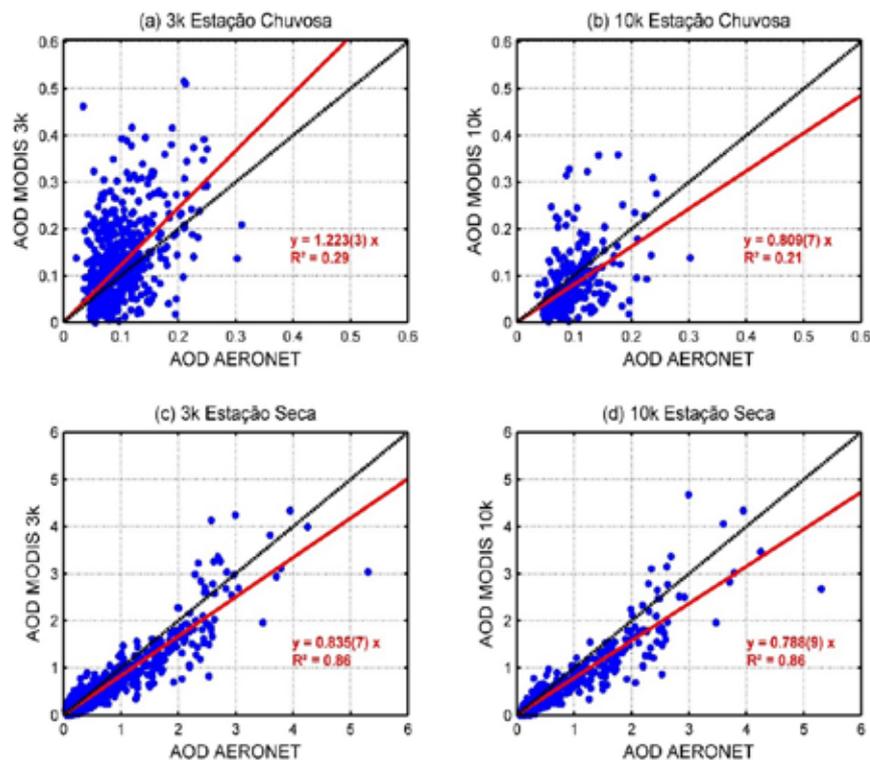


Figura 4. Regressão linear entre a) AOD AERONET x AOD MODIS 3k para a estação chuvosa, b) AOD AERONET x AOD MODIS 10k para a estação chuvosa, c) AOD AERONET x AOD MODIS 3k para a estação seca, d) AOD AERONET x AOD MODIS 10k para a estação seca.

Os resultados da Figura 4 indicam uma fraca relação entre as medidas de AOD da AERONET e as medidas dos produtos 3k e 10k do MODIS na estação chuvosa. Embora os coeficientes de determinação sejam 0,29 e 0,21 para os produtos 3k e 10k, respectivamente, seus coeficientes de correlação são significativos (p -valor < 0,05). Os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 1 também evidenciam a validade de tais estimativas. O fato que chama atenção na Figura 4a) e b) é justamente a inversão que ocorre entre o produto 3k e o 10k, enquanto o produto 3k superestima os valores de AOD em torno de 20% o produto 10k subestima os valores de AOD na mesma proporção.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos das análises de regressão entre AOD AERONET e AOD MODIS (3k e 10k) para as estações chuvosa, seca e para todo período. EMA é o Erro Médio Absoluto, RQEM é a Raiz Quadrada do Erro Médio e d é o coeficiente de Willmott.

	Chuvosa		Seca		Todo período	
	3k	10k	3k	10k	3k	10k
EMA	0,009	0,004	0,045	0,034	0,027	0,020
RQEM	0,034	0,018	0,140	0,132	0,102	0,093
D	0,929	0,963	0,987	0,977	0,990	0,982

Esse trabalho sugere que essas variações sejam decorrentes da grande dispersão entre os pares AERONET x MODIS na estação chuvosa. Estes resultados evidenciam que mesmo com um baixo erro associado à sua estimativa, a magnitude dos valores de AOD na estação chuvosa provoca uma grande dispersão entre as medidas. Essa justificativa explica o fato de as estimativas na estação seca possuírem uma

melhor relação ($R^2 = 0,86$ para 3k e 10k) e mesmo assim possuem um erro maior como mostra a Tabela 1. Logo, pode se perceber que quanto maior a magnitudes dos valores de AOD maiores serão os erros associados a suas estimativas, mesmo que a dispersão seja menor.

A Figura 4 ainda evidencia as regressões para a AOD AEROENET e AOD MODIS para os produtos 3k e 10k na estação seca. Diferente da estação chuvosa a relação entre as variáveis mostra claramente um comportamento linear, com baixa dispersão. Ambos produtos de AOD MODIS (3k e 10k) subestimam os valores de AOD da AERONET, entretanto, é possível observar que o produto 3k subestima em aproximadamente 17% e o 10k em 23%. Essas pequenas variações não apresentam uma diferença estatisticamente significativa, assim como os parâmetros estatísticos praticamente não evidenciam diferenças consideráveis, entretanto é importante observar essas variações já que a resolução do produto 3k pode ser útil na análise de eventos pontuais como plumas de queimadas. A Tabela 1 ainda evidencia os parâmetros estatísticos de comparação para todo o período de medidas, considerando de forma conjunta a estação chuvosa e seca. De forma geral estes resultados mostram um comportamento similar para as comparações entre as estações e para todo período. O erro associado ao produto 3k é levemente superior, mas não ocorre diferença significativa.

Distribuição mensal da AOD MODIS

As regressões mensais entre a AOD AERONET e a AOD dos produtos MODIS é mostrada na Figura 5 e os parâmetros estatísticos de comparação na Figura 6. Esses resultados detalham a dispersão entre as medidas na estação chuvosa e seca, de janeiro a junho as magnitudes máximas da AOD não ultrapassam 0,5. Para esses meses é possível observar grandes dispersões (Figura 5) e baixos valores de R^2 (Figura 6), esses resultados foram verificados tanto para o produto 3k como para o 10k. Devido as grandes dispersões as tendencias de subestimação ou superestimação variam entre os meses da estação chuvosa, de janeiro a abril é verificada uma superestimação da AOD por ambos produtos, 3k e 10k, já para o mês de maio o produto 3k subestima os valores de AOD enquanto o 10k superestima e a partir de junho todas estimativas subestimam a AOD.

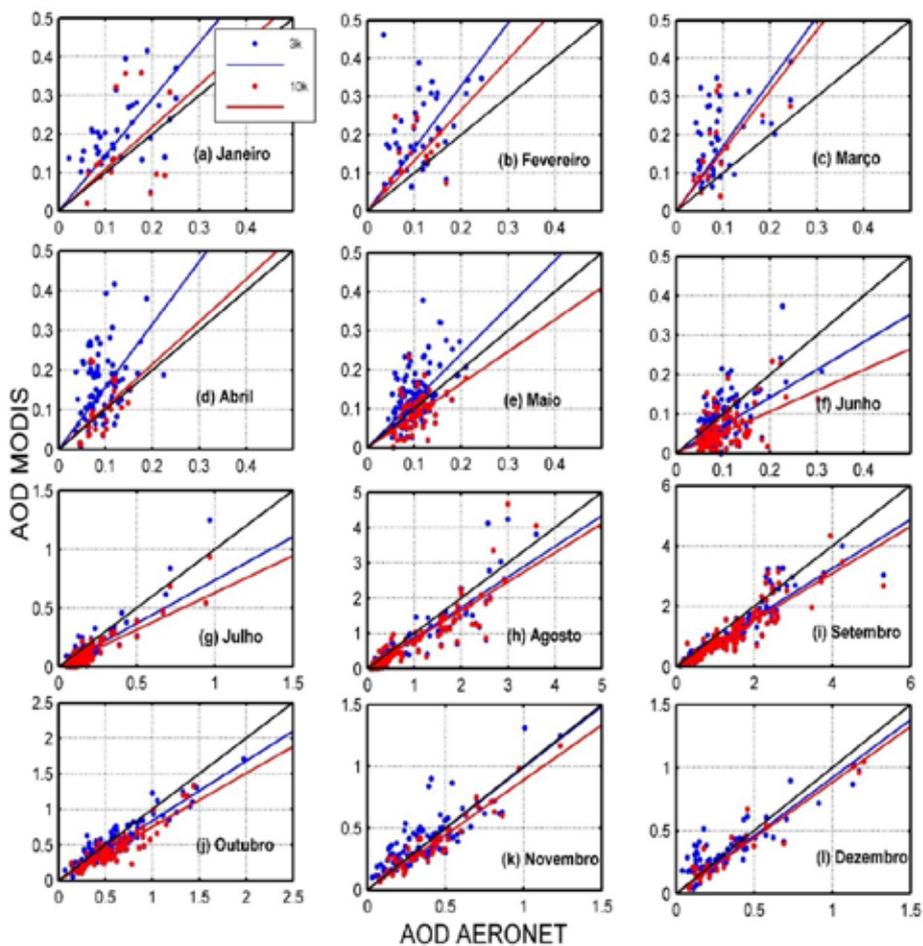


Figura 5. Regressões lineares entre AOD AERONET x AOD MODIS 3k (vermelho) e entre AOD AERONET x AOD MODIS 10k (azul) para os meses do ano, considerando todo período (2002-2017)

Para os meses considerados como estação seca (julho a outubro) a elevação da carga de aerossóis pelas queimadas aumenta consideravelmente as magnitudes da AOD, em setembro os valores de AOD dos produtos MODIS ultrapassam a 4. Assim como demonstrado anteriormente (Figura 4), os meses considerados na estação seca possuem um ajuste linear com valores de R^2 acima de 0,8 (Figura 6). Os parâmetros estatísticos não mostram diferenças entre os produtos 3k e 10k, entretanto evidenciam uma sazonalidade para a distribuição de erros e ajustes. De forma geral os ajustes de R^2 e do coeficiente de Willmott (d) não mostram concordância para as distribuições analisadas nos meses considerados como estação chuvosa, entretanto, devido a baixa magnitude da AOD os erros EMA e RQEM também permanecem baixos. Já para os meses da estação seca os ajustes lineares evidenciam a boa concordância entre as medidas da AERONET e as estimativas MODIS, com erros EMA e RQEM que acompanham a elevação da magnitude da AOD.

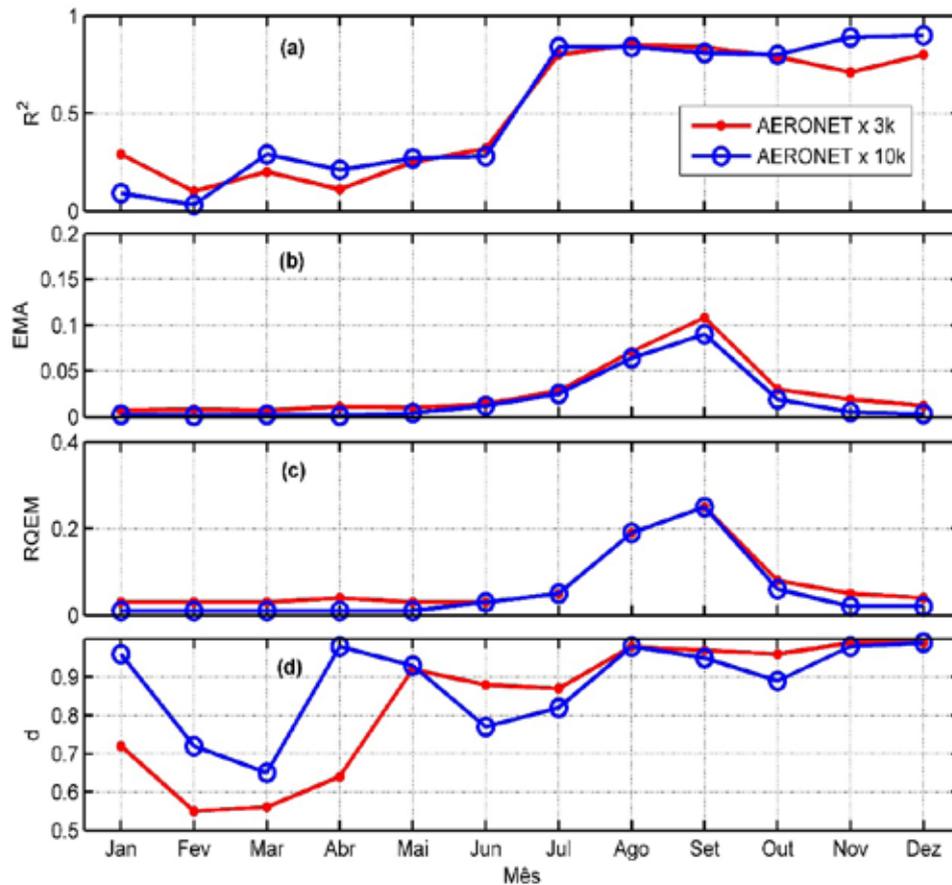


Figura 6. Distribuições mensais dos parâmetros estatísticos das regressões entre AOD AERONET e AOD MODIS 3k (vermelho) e entre AOD AERONET e AOD MODIS 10k (azul). a) distribuição do coeficiente de determinação (R^2), b) Erro Médio Absoluto (EMA), c) Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM) e d) coeficiente de Willmott (d).

Devido à falta de trabalhos que avaliem as estimativas MODIS sobre a área de estudo poucas comparações podem ser realizadas sobre essas distribuições de erros e ajustes, desta forma, os resultados aqui mostrados foram comparados a magnitude das estimativas dos trabalhos de Sena et al. (2013), Cirino et al. (2014) com análise dos 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 cuja resolução espacial é de 1 grau por 1 grau, ou seja, aproximadamente 100 km x 100 km. O estudo de Cirino et al. (2014) utilizou as estimativas da AOD MODIS 10k no período de 2000 a 2012, com valores médios de AOD em torno de 0,4. Já 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, os valores encontrados para a AOD foram em média 0,50 para o ano de 2005, valor consistente aos registros aqui mostrados. O trabalho de Prado et al. (2017) utilizou um recorte sobre o Estado de Mato Grosso e resultou em valores médios de AOD, de acordo com Cirino et al. (2014), inferiores a 0,40. Já o trabalho de Costa et al. (2018), que utilizou vários recortes sobre vários sites da Amazonia, resultou em valores médios de AOD variando entre 0,40 a 0,75 sobre os diferentes sites analisados.

CONCLUSÃO

Esse trabalho foi o resultado de uma análise sistemática das estimativas de AOD MODIS por meio de dois produtos de resoluções espaciais diferentes, o 3 k (3 km x 3 km) e o 10 k (10 km x 10 km) derivados do algoritmo *Dark Target* (DT), as avaliações foram realizadas utilizando as medidas da AERONET como referência.

Foi encontrada uma boa relação linear entre a AERONET e os produtos MODIS para o site analisado com um R^2 de 0,87, entretanto, de forma geral as estimativas de ambos os produtos MODIS, 3k e 10k, subestimam os valores de AOD em torno de 20%. Foi verificado que nos meses considerados como estação chuvosa, a baixa magnitude da AOD provoca grande dispersão entre as medidas da AERONET e as estimativas MODIS, provocando tanto efeitos de subestimação quanto de superestimação. Já para altas cargas de aerossóis na estação seca, o ajuste linear melhora consideravelmente, entretanto, a elevação da magnitude da AOD também provoca um aumento dos erros EMA e RQEM. A análise mensal permitiu detalhar as possíveis variações dos produtos MODIS 3k e 10k, de forma que a distribuição da dispersão e erros também detém um comportamento sazonal. As maiores dispersões foram encontradas para os meses da estação chuvosa e os maiores erros para os meses considerados como estação seca, resultado direto do aumento da carga de aerossóis e conseqüentemente da magnitude dos valores de AOD. Não foi encontrada uma diferença estatisticamente significativa para as distribuições de dispersão e erros em comparação aos diferentes produtos, 3 k e 10k. Esse resultado permite afirmar que o produto 3k apresenta um resultado altamente satisfatório, pois o mesmo, devido a sua melhor resolução espacial, pode ser aplicado para análise de plumas de fumaça emitidas pelas queimadas na área de estudo.

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 PRODUTOR contemplada pelo Projeto de Pesquisa “Influência de Oscilações Atmosféricas nas Propriedades Físicas de Aerossóis na Amazônia Oriental” Portaria PRO4463-2020. Os autores gostariam de agradecer também a rede AERONET e ao Professor Paulo Artaxo pelos dados do site de Alta Floresta – MT.

REFERÊNCIAS

- ARTAXO, P. et al. 2006. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia** 21, 167-189.
- ARTAXO, P. et al. 2013. Atmospheric aerosol in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discussions** 13, 203-235.
- BALAKRISHNAIAH, G. et al. 2011. Analysis of optical properties of atmospheric aerosols inferred from spectral AODs and Ångström wavelength exponent. **Atmospheric Environment** 45, 1275-1285.
- 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.

- 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.
- CHENG, T. et al. 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.
- CIRINO, G. et al. 2014. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon. **Atmospheric Chemistry and Physics** 14, 6523-6543.
- COSTA, R.O. et al. 2018. Variabilidade espaço-temporal da profundidade ótica de aerossóis atmosféricos sobre a Amazônia. **Revista de Ciências Ambientais (Unilasalle)** 12, 07-21.
- DAVIDSON, E.A. et al. 2012. The Amazon basin in transition. **Nature**. 481, 321-328.
- DAYOU, J; CHANG, J.H.W.; SENTIAN, J. 2014. **Ground-based aerosol optical depth measurement using sunphotometers**. Kota Kinabalu: Springer. 67p.
- Gustafsson e Ramanathan, 2016. Convergence on Climate Warming by Black Carbon Aerosols. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.** 113, 4243-4245.
- HE, Q. et al. 2017. MODIS 3 km and 10 km aerosol optical depth for China: Evaluation and comparison. **Atmospheric Environment** 153, 150-162.
- HOLBEN, B. et al 1998. AERONET - A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. **Remote Sensing of Environment** 66, 1-16.
- 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. **Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA**,1535.
- KANG, N. et al. 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.
- KUMAR, K.R. et al. 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.
- LEVY, R.C. et al. 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. **Atmospheric Measurement Techniques** 6, 2989-3034.
- MARTIN, S.T. et al. 2010. An overview of the Amazonian Aerosol Characterization Experiment 2008 (AMAZE-08). **Atmospheric Chemistry and Physics** 10, 415-11.
- NICHOL, J.E.; BILAL, M. 2016. Validation of MODIS 3 km resolution aerosol optical depth retrievals over Asia. **Remote Sensing** 8 (4), 328.
- PALÁCIOS, R.S. et al. 2014. Análise da profundidade ótica de aerossóis e coeficiente de Angstrom no cerrado Mato-grossense. **Revista Brasileira de Climatologia** 14, 173-185.
- PALÁCIOS, R.S. et al. 2018. Variabilidade Espaço-Temporal da Profundidade Ótica de Aerossóis em Regiões de Cerrado e Pantanal na Região Central do Brasil. **Nativa** 6, 56-65.
- PALÁCIOS, R.S. et al. 2020. Long Term Analysis of Optical and Radiative Properties of Aerosols in the Amazon Basin. **Aerosol and Air Quality Research** 20, 139-154.
- PALÁCIOS, R.S. et al. 2022a. Evaluation of MODIS Dark Target AOD Product with 3 and 10 km Resolution in Amazonia. **Atmosphere**, 13, 1742.
- PALÁCIOS, R.S. et al. 2022b. Long-term measurements of aerosol optical properties and radiative forcing (2011-2017) over Central Amazonia. **Atmosfera**, 35, 143-163.

PRADO, N.V.; MARILENE, S.; COELHO, S.C. 2017. Estudo da Variabilidade Temporal da Profundidade Óptica 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.

REMER, L. et al. 2013. MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective. **Atmospheric Measurement Techniques Discussions** 6, 69-112.

RIZZO, L. V. et al. 2013. Long term measurements of aerosol optical properties at a primary forest site in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics** 13, 2391–2413.

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 aerosol and the effects of land use change in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics** 13, 1261-1275.

WEI et al. 2019. MODIS Collection 6.1 aerosol optical depth products over land and ocean: validation and comparison. **Atmospheric Environment** 201, 428-440.