



Impacto dos aerossóis sobre fluxos radiativos em região de transição Cerrado-Pantanal

Leone Francisco Amorim CURADO ¹, João Basso MARQUES ¹, Denes Martins de MORAIS ^{1,2},
Ian Maxime Cordeiro Barros da SILVA ¹, Nicolas Neves de OLIVEIRA ¹,
Rafael da Silva PALÁCIOS ^{1,3}, Thiago Rangel RODRIGUES ⁴, Lucas Cardoso RAMOS ¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

² Centro Universitário de Várzea Grande, Várzea Grande, MT, Brasil.

³ Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

⁴ Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brasil.

*E-mail: leone.curado@fisica.ufmt.br

Submetido em: 15/10/2024; Aceito em 29/11/2024; Publicado em: 06/12/2024.

RESUMO: Os aerossóis provenientes de queimadas ou ações antropogênicas implicam alterações no balanço radiativo do sistema Terra-atmosfera. A série de dados de 2001 a 2017, fornecida pela rede AERONET Cuiabá-Miranda, foi utilizada neste estudo para obter parâmetros como a profundidade óptica de aerossóis (AOD), albedo de espalhamento simples (SSA), expoente de Ångström de extinção (EAE) e forçante radiativa. Entre as forçantes do topo (FR TOP) e da superfície (FR SUP) há uma proporcionalidade mínima de 1/3. A variação da FR TOP foi entre -5 e -52 Wm^{-2} , FR SUP de -10 a -180 Wm^{-2} , e uma forçante radiativa da atmosfera (FR ATM) entre 2 e 170 Wm^{-2} , com uma taxa de aquecimento (HR) entre $0,05$ e $0,28 \text{ K.dia}^{-1}$. Foi analisada a correlação entre as forçantes radiativas com a profundidade óptica, as equações foram validadas com os dados de 2015 a 2017, obtendo um R^2 superior a $0,8$. Analisados os valores de eficiência das forçantes (EF), verificou-se uma pequena variação no topo da atmosfera, e há menor eficiência no período seco em comparação com os restantes dos meses na superfície.

Palavras-chave: AERONET; forçante radiativa; eficiência da forçante radiativa; sensoriamento remoto.

Impact on radioactive flux by aerosols in a transition region Cerrado-Pantanal

ABSTRACT: Aerosols from biomass burning or anthropogenic activities lead to changes in the radiative balance of the Earth-atmosphere system. The dataset from 2001 to 2017, provided by the AERONET Cuiabá-Miranda network, was used in this study to obtain parameters such as aerosol optical depth (AOD), single scattering albedo (SSA), Ångström extinction exponent (EAE), and radiative forcing. Between the top-of-atmosphere forcing (FR TOP) and surface forcing (FR SUP), there is a minimum proportionality of 1/3. The variation in FR TOP ranged from -5 to -52 Wm^{-2} , FR SUP from -10 to -180 Wm^{-2} , and atmospheric radiative forcing (FR ATM) from 2 to 170 Wm^{-2} , with a heating rate (HR) between 0.05 and 0.28 K.day^{-1} . The correlation between radiative forcings and optical depth was analyzed, and the equations were validated with data from 2015 to 2017, yielding an R^2 greater than 0.8 . Upon analyzing the forcing efficiency (EF) values, a small variation was observed at the top of the atmosphere, and lower efficiency was noted during the dry season compared to the other months at the surface.

Keywords: AERONET; radiative forcing; radiative forcing efficiency; remote sensing.

1. INTRODUÇÃO

A questão ambiental é tema recorrente de debate em fóruns nacionais e mundiais, tendo como foco os fatores antropogênicos e suas consequências para o meio ambiente. Há debates no que concerne à contribuição no aquecimento global dos componentes atmosféricos gás carbônico (CO_2), vapor d'água e aerossóis. Ainda assim, há incertezas sobre o comportamento da atmosfera e seus constituintes, sendo necessário estudos específicos, como a formação e os impactos do Black Carbon e Brown Carbon.

O forçamento radiativo é a mudança no fluxo líquido, seja no topo da atmosfera ou na superfície, devido à mudança no ambiente. Essa mudança poderá ser produzida por alterações na composição atmosférica, na natureza das espécies constituintes, nebulosidade ou propriedades de superfície.

Os aerossóis, tanto naturais quanto antropogênicos, afetam o sistema climático de forma direta, dispersando ou absorvendo a radiação, e espalhando, absorvendo e emitindo radiação térmica. Como núcleos de condensação de nuvens e núcleos de gelo, contribuem de forma indireta.

O conhecimento regional ou local é importante para estudos e avaliações nas alterações climáticas global provenientes de ações antropogênicas ou naturais. Este estudo foi realizado numa região de transição Cerrado-Pantanal, sujeita a uma variação na concentração de aerossóis da atmosfera. O estudo da forçante radiativa numa região de transição proporcionou um entendimento e uma melhor caracterização. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar e quantificar a forçante radiativa dos aerossóis na região de transição Cerrado-Pantanal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local de estudo

A Fazenda Miranda encontra-se a 20 km a SE da região urbanizada da capital e ao sul da Amazônia, entre as coordenadas geográficas de latitude: 15° 72' S; longitude: 56° 02' W; altitude: 210 m acima do nível do mar (MAMEDE et al., 1981). Nela está instalado o sistema de monitoramento de aerossóis por sensoriamento remoto AERONET (AErosol RObotic NETwork).

2.2. Rede de monitoramento AERONET

A rede AERONET (do inglês, AErosol RObotic NETwork) (HOLBEN et al., 1998) é uma rede global de monitoramento de aerossóis por sensoriamento remoto, instalada ao nível da superfície e mantida pelo sistema EOS (do inglês, Earth Observing System) da NASA.

É constituída por radiômetros espectrais automáticos e idênticos distribuídos pelo globo. Suas medidas permitem o monitoramento, praticamente em tempo real, da espessura óptica dos aerossóis, da coluna d'água precipitável, distribuição de tamanho das partículas, dentre outras propriedades físicas e ópticas dos aerossóis. Os produtos fornecidos pela AERONET estão disponíveis na internet, de fácil acesso.

As medidas da radiação direta pelos fotômetros fornecem informações para obtenção da profundidade óptica espectral do aerossol na coluna atmosférica (AOD). A absorção em 940 nm é utilizada para a obtenção da coluna do vapor de água presente na atmosfera (água precipitável). Duas versões de dados (versões 1 e 2) e três níveis de qualidade (níveis 1,0; 1,5; 2,0) existem para cada produto. Embora os níveis de 1,0 e 1,5 sejam fornecidos em tempo quase real, em 12 meses ou mais de atraso (devido à calibração final e inspeção manual), garante que os dados da mais alta qualidade possam ser encontrados na versão 2. Neste trabalho, foram utilizados dados com nível de qualidade 2,0.

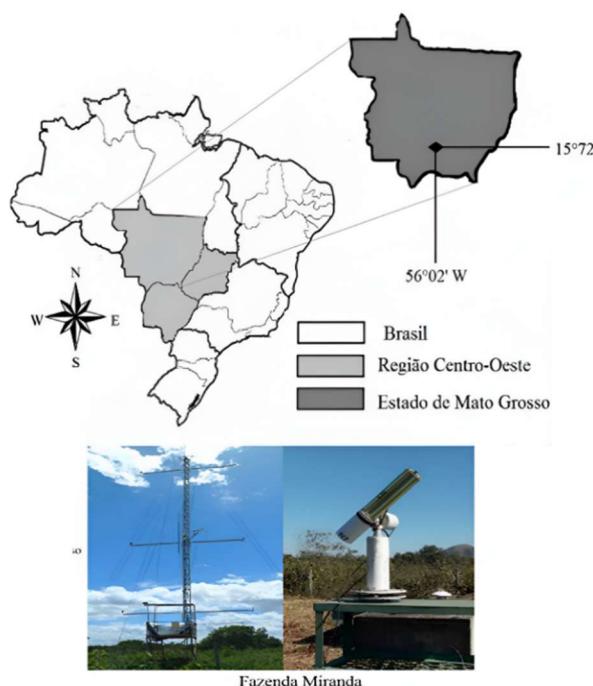


Figura 1. Localização instalação da rede AERONET na Fazenda Miranda.

Figure 1. Location of the AERONET network installation at Fazenda Miranda.

O radiômetro espectral CIMEL Electronique 318-A (Figura 2) é um radiômetro solar e celeste direcionado roboticamente, resistente à permanência a céu aberto, alimentado com energia solar. Um sensor, com colimadores de 25 cm, é anexado a uma base-robô de 40 cm (PROCÓPIO, 2005).

Os sensores são capazes de automatizar a coleta de medidas, os colimadores apontam para o sol de acordo com uma rotina pré-programada. A base gira nos ângulos zenithal e azimuthal a partir de motores de passo com uma precisão de 0,05°. Através de um microprocessador, é calculada a posição solar fundamentada em informações de hora, latitude e longitude, direcionando os colimadores a menos de 1° do Sol. Um pequeno detector localiza precisamente o Sol para que a sequência de medidas seja iniciada. Ao final das medidas, o instrumento volta à sua posição de repouso (apontando aproximadamente para o nadir). Um sensor de umidade acoplado ao sistema cancela qualquer sequência de medidas para o caso de ocorrência de precipitação. Os radiômetros são capazes de medir tanto a radiação direta quanto a radiação solar difusa (PROCÓPIO, 2005).



Figura 2. Radiômetro solar CIMEL 318^a. (Fonte: SANTANNA, 2008).

Figure 2. Sun radiometer CIMEL 318A. (Source: SANTANNA, 2008).

Os radiômetros possuem dois detectores capazes de realizar duas medidas básicas de radiação solar, direta ou difusa (apontando para o sol ou para o céu), em uma sequência programada (HOLBEN et al., 1998). As medidas diretas do sol têm um campo de visão de 1,2° e são realizadas em oito bandas espetrais: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 e 1020 nm (em que 440, 670, 870, 940 e 1020 nm são medidas padrão), que são coletadas em um suporte que gira com auxílio de um motor de passo localizados dentro do sensor e cada medida leva aproximadamente dez segundos para ser feita (PALÁCIOS, 2017).

As larguras das bandas variam de 2,5 nm para os comprimentos de onda na região do ultravioleta (340 e 380 nm) e 10 nm para os demais canais. Uma sequência pré-programada de medidas tem início pela manhã e termina à tarde, durante os períodos em que a massa de ar é igual a sete (a massa de ar corresponde ao inverso do cosseno do ângulo solar zenithal), os intervalos entre as medidas são de aproximadamente: 0,25 x Mar, enquanto o intervalo é de

aproximadamente 15 minutos com a massa de ar baixa (SENA et al., 2013).

Todos os canais são utilizados para obtenção da espessura óptica dos aerossóis calculada através da extinção da radiação baseada na Lei de Beer-Bouguer-Lambert e dos coeficientes de Ångström das partículas de aerossol, com exceção do canal de 940 nm, que é usado para obtenção da coluna de vapor d'água precipitável (HALTHORE et al., 1997).

A variação temporal de cobertura das nuvens é tipicamente maior que a dos aerossóis; para diferenciá-los, são realizadas três medidas com um intervalo de 30 segundos entre elas, a cada 15 minutos para cada λ , possibilitando a verificação da presença de nuvens na maioria das vezes.

As medidas do almucântar são obtidas em intervalos de 0,5° de ângulo azimutal próximo ao Sol (distante 6°) e aumentam em intervalos de 2 a 10° de distância a partir da posição solar (Figura 3). Essas medidas celestes são usadas para obter as propriedades da coluna de aerossóis, incluindo a distribuição de tamanho, função de fase, as componentes real e imaginária do índice de refração, o raio efetivo e o albedo simples de espalhamento, que são rotineiramente calculadas com os algoritmos de inversão da AERONET (DUBOVIK et al., 2006).

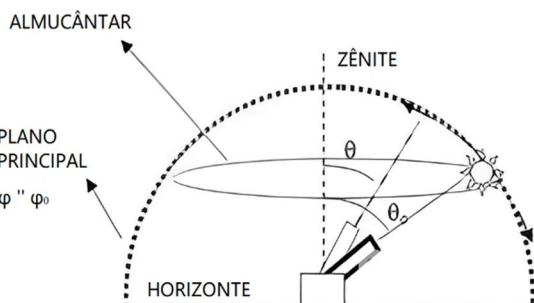


Figura 3. Esquema dos posicionamentos do fotômetro para a realização das medidas de radiação. (Fonte: Adaptado de PALÁCIOS, 2017).

Figure 3. Diagram of the photometer positions for radiation measurements. (Source: Adapted from PALÁCIOS, 2017).

A técnica de inversão de radiância do almucântar para determinar tanto os índices de refração reais quanto os imaginários é mais precisa quando a AOD em 440 nm é maior do que 0,4 (DUBOVIK et al., 2006), o ângulo zenital solar é maior do que 50°, e o erro da radiância celeste é menor que 5 a 8%, dependendo da AOD (HOLBEN et al., 1998).

A rede AERONET fornece os dados em 3 níveis, conforme um protocolo de qualidade de dados. Neste trabalho, foram utilizados os dados de nível 2.0, para medidas diretas, que representam as medidas processadas e garantidas pela rede, eliminando medidas contaminadas pela presença de nuvens, e são aplicadas correções e calibrações finais devido à degradação do instrumento. A este nível, a incerteza para os valores de AOD varia entre 0,01 e 0,02 (HOLBEN et al., 1998). E nível 1.5 para medidas de inversão.

A série de dados utilizados neste trabalho compreende o período entre 2001 a 2017 para os produtos da AERONET, sendo os produtos diretos: AOD 500 nm, EAE 400-870 nm e Água precipitada (cm). Os produtos de inversão são: SSA 440 nm, forçantes no topo e na superfície e a eficiência da forçante (EF) no topo e na superfície.

Além de uma série de dados, dos anos de 2009 a 2017, de radiação global, radiação incidente e refletida obtidos da torre de medida micrometeorológica da Fazenda Miranda. A razão entre a radiação global refletida e a radiação global incidente fornece o albedo de superfície, sendo possível analisar a sua influência sob as forçantes radiativas dos aerossóis. Médias diárias foram realizadas com os dados para utilização, e com a radiação global houve uma transformação de W m^{-2} em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização das propriedades ópticas dos aerossóis

A quantidade de partículas, ativas na atmosfera, provenientes de emissões da floresta, de queimada e de partículas de poeira do solo, produto da interação entre vento e superfície, concatena com a grandeza de profundidade óptica do aerossol (AOD) (ARTAXO et al., 1998).

A intensidade com que cada uma dessas fontes atua na formação de novas partículas é algo que varia espacial e temporalmente, devido à heterogeneidade geográfica e sazonal de cada fonte. Em regiões mais sujeitas a atividades antropogênicas, ocorrem grandes emissões de queimadas no período seco. Além disso, estas regiões também têm maiores áreas de solo exposto, o que diminui a participação das emissões naturais da floresta e aumenta a de poeira de solo. O contrário ocorre em regiões remotas, com pouca ou nenhuma influência antropogênica (HOLANDA, 2015).

Uma série de 17 anos de dados (2001 a 2017), com médias diárias, é apresentada na Figura 4, e observa-se uma sazonalidade na profundidade ótica, contribuição das queimadas provavelmente proveniente do arco do desflorestamento. Nos meses de agosto a outubro encontram-se os índices mais elevados (período seco). Nos demais meses, a profundidade ótica dos aerossóis (AOD 500 nm) tem seus valores mínimos, valores próximos a zero. A variação da intensidade entre os anos é significativa, certamente influenciada por políticas contra queimadas. As séries temporais indicam a sazonalidade por consequência de ações antropogênicas durante o período seco na região de estudo (ARTAXO et al., 2013; SENA et al., 2013).

Nos anos de 2005, 2007 e 2010 notou-se um acréscimo significativo no AOD, destacando o ano de 2007 com o elevado foco de queimadas na região de floresta, Cerrado e Pantanal (INPE, 2020). Acarretando inclusive a interrupção de pouso, por algumas horas, devido à baixa visibilidade no Aeroporto Internacional Marechal Rondon, localizado na cidade de Várzea Grande, Mato Grosso.

Apesar de a fazenda Miranda, o site de Cuiabá, não estar localizada na região do arco do desflorestamento, os dados de AOD 500 nm são influenciados por queimadas locais de vegetação típica de cerrado e pastagem, e pelo transporte de partículas originárias do sul da bacia Amazônica (PALÁCIOS, 2017).

O aumento na concentração de aerossóis implica numa alteração significativa na distribuição de tamanho das partículas, pois a maioria das partículas emitidas em queimadas é de modo fino (SCHAFFER et al., 2008; ECK et al., 2010). O expoente de Ångström de extinção na faixa de 440 a 870 nm acompanha a sazonalidade da AOD 500 nm, pois no período seco é majoritária a emissão de partículas finas, contribuindo para o espalhamento e absorção da radiação pela atmosfera.

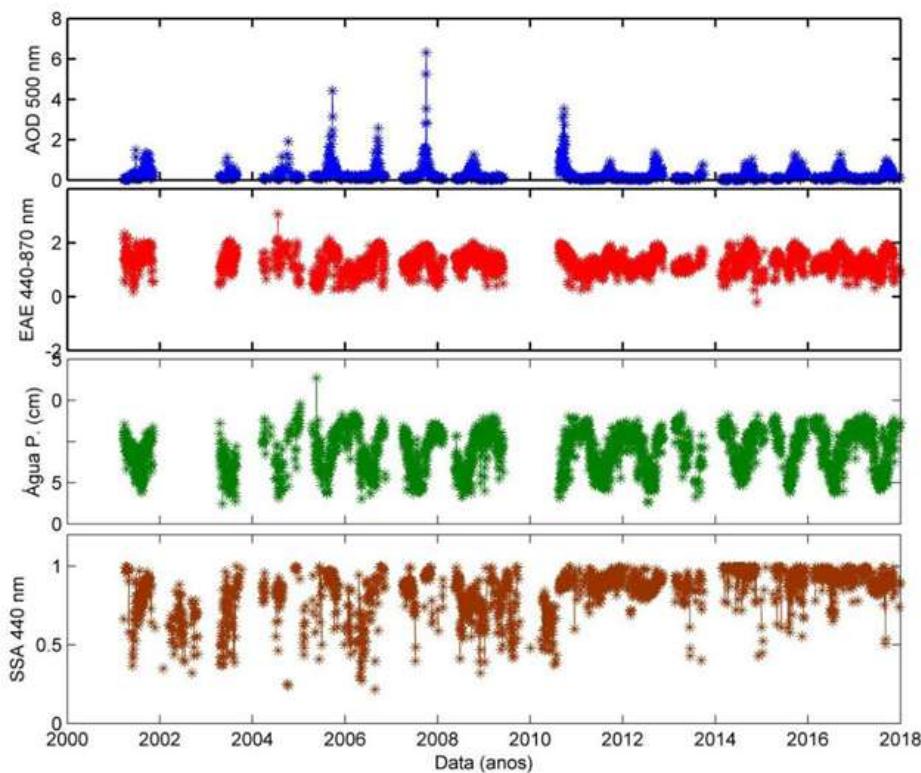


Figura 4. Série temporal de AOD 500 nm, com dados diários, EAE 440-870 nm, vapor d'água e SSA 440 nm entre os anos de 2001 e 2017 coletados da rede AERONET-Cuiabá.

Figure 4. Time series of AOD 500 nm, with daily data, EAE 440-870 nm, water vapor and SSA 440 nm between 2001 and 2017 collected from the AERONET-Cuiabá network.

A magnitude da variação sazonal do vapor de água precipitável é mais acentuada no período chuvoso e uma baixa quantidade de aerossóis e, portanto, uma intensidade da AOD 500 nm é menor, implicando em uma atmosfera com menor concentração de aerossóis de moda fina, e aumento da moda grossa. Com início do período seco, há uma diminuição do vapor de água precipitável, um aumento no expoente de extinção e da AOD 500 nm, principalmente com início das queimadas (ARTAXO et al., 2013; SENA et al., 2013).

O EAE, com valores próximos a 2 ou maiores, indica predominância de partículas finas, oriundas de poluição urbana ou queima de biomassa, geralmente. Já para EAE igual ou próximo a 1 representa partículas de moda grossa (PROCÓPIO, 2005; SCHUSTER et al., 2006).

No período chuvoso, constata-se uma baixa densidade dos aerossóis de moda fina, fato observado na Figura 5, na qual os valores de EAE estão próximos a 1, baixos valores para SSA e AOD. Nesse período, tem-se os maiores valores de vapor de água precipitável. Contudo, no período seco há um pico significativo no AOD, EAE e no SSA. Provavelmente, devido ao acréscimo de aerossóis oriundos de queimadas (SANTOS, 2018).

Os meses de fevereiro e março apresentaram um aumento no SSA, com um padrão proporcional aos meses de agosto e setembro (período seco).

Os índices de AOD, EAE têm seus máximos e mínimos nos meses de setembro e fevereiro, respectivamente. O vapor de água apresentou seus máximos e mínimos nos meses de janeiro e julho e o SSA mostrou máximos e mínimos em setembro e janeiro.

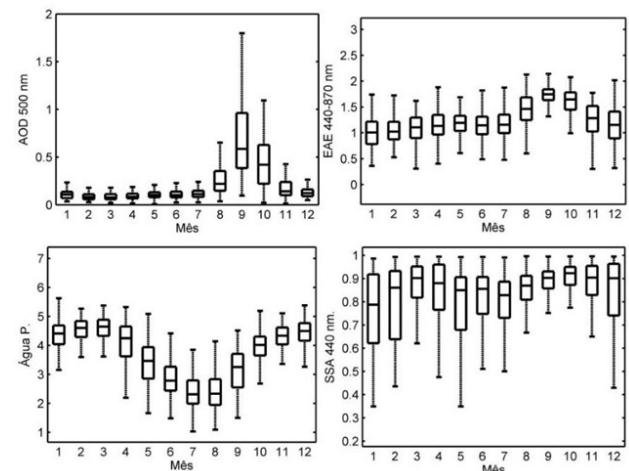


Figura 5. Variação mensal dos valores de AOD 500 nm, EAE 440-870 nm, vapor d'água e SSA 440 nm entre os anos de 2001 e 2017 – AERONET.

Figure 5. Monthly variation in AOD 500 nm, EAE 440-870 nm, water vapor and SSA 440 nm values between 2001 and 2017 – AERONET.

3.2. Sazonalidade da forçante radiativa na transição Pantanal/Cerrado

Os aerossóis têm papel fundamental no balanço energético terrestre e contribuem para o aquecimento ou resfriamento da atmosfera. Os aerossóis afetam o balanço radiativo terrestre de forma direta, absorvendo ou espalhando radiação, e indiretamente, perturbando os outros constituintes da atmosfera e servindo de núcleo de

condensação das nuvens, afetando sua formação e propriedades físicas.

O desequilíbrio no balanço de energia gera uma mudança climática, ocasionando o aquecimento ou resfriamento do planeta, concatenando para o equilíbrio. Perturbações externas podem acarretar uma alteração no balanço de energia radiativa, levando a uma alteração na irradiância solar no topo da atmosfera, denominada forçante radiativa. A forçante radiativa (Wm^{-2}) é uma ferramenta utilizada para estimativas de desequilíbrios do balanço de energia radiativa, devidos atividades antropogênicas, mudanças do uso do solo e alteração de albedo da superfície (PROCÓPIO, 2005).

Na série temporal apresentada na Figura 6, observa-se uma sazonalidade dos fluxos tanto no topo da atmosfera (TOP), como na superfície terrestre (SUP). Os picos ocorrem nos meses de período seco de cada ano, com predominância dos aerossóis provenientes de ação antropogênica provavelmente queimadas.

Os aerossóis de origem das queimas de biomassa cooperaram para o resfriamento, sendo assim, resulta numa forçante mais negativa no período seco do que no período chuvoso. Observa-se que a FR TOP apresenta situações positivas, ou seja, contribui para o aquecimento do topo da atmosfera. O mesmo não ocorre na FR SUP, que apresenta apenas situações negativas, indicando o resfriamento da superfície atmosférica.

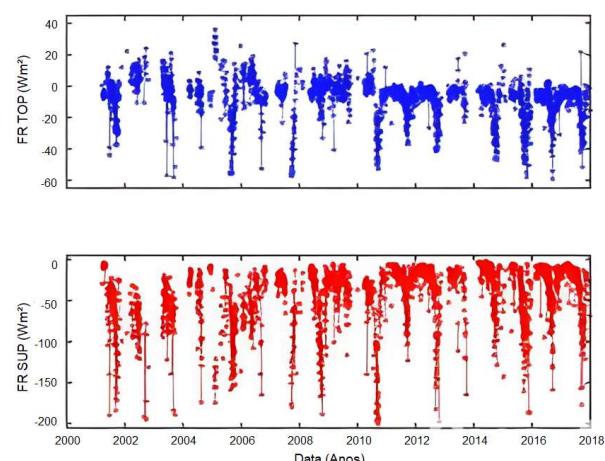


Figura 6. Distribuição temporal da Forçante Radiativa no topo da atmosfera (FR TOP) e na superfície (FR SUP) – AERONET.

Figure 6. Temporal distribution of radiative forcing at the top of the atmosphere (FR TOP) and at the surface (FR SUP) – AERONET.

Separando os dados em período seco (agosto, setembro e outubro) e chuvoso (restante dos meses) e fazendo média anual, é possível analisar o comportamento das forçantes (Tabelas 1 e 2). No topo da atmosfera, para as médias com meses somente do período chuvoso, com FR positiva, implicando em um aquecimento do topo em determinados momentos da série (2003, 2004 e 2007). O mesmo não ocorre para a superfície no mesmo período analisado.

No período seco, a FR é positiva no topo (TOP) nos anos de 2003 e 2010, e negativa no restante da série. Em relação à superfície (SUP) a FR é negativa, com maior intensidade em 2003 e 2011. Ao analisar a forçante radiativa nos meses de período seco e chuvoso, por médias anuais, têm-se valores menores no topo e na superfície comparando com o período chuvoso e seco. E a FR SUP é de resfriamento, enquanto alguns anos no TOP a forçante contribuiu para o

aquecimento do topo (HOLANDA, 2015; PALÁCIOS, 2017).

Tabela 1. Média anual da forçante radiativa no topo da atmosfera, na superfície terrestre (Wm^{-2}) e desvio médio (Wm^{-2}), no período chuvoso.

Table 1. Annual average radiative forcing at the top of the atmosphere at the earth's surface (Wm^{-2}) and average deviation (Wm^{-2}) during the rainy season.

Ano	FR TOP	DM FR TOP	FR SUP	DM FR SUP
2002	- 3,04	9,05	- 42,05	32,36
2003	6,06	5,79	- 71,18	21,95
2004	0,21	11,61	- 55,06	23,16
2005	- 3,63	4,91	- 30,21	20,16
2006	7,30	15,00	- 78,10	49,80
2007	3,24	7,59	- 53,60	22,00
2008	- 3,67	6,23	- 30,19	16,28
2009	- 0,55	5,38	- 30,72	21,20
2010	- 2,41	6,29	- 26,97	16,26
2011	- 0,43	6,66	- 39,56	22,70
2012	- 5,32	3,40	- 18,51	7,41
2013	- 4,22	3,39	- 18,38	8,90
2014	- 3,13	4,14	- 22,61	16,59
2015	- 5,33	4,30	- 13,76	13,56
2016	- 7,91	10,71	- 39,20	42,52
2017	- 6,49	4,53	- 19,49	14,32

Tabela 2. Média anual da forçante radiativa no topo da atmosfera, na superfície terrestre (Wm^{-2}) e desvio médio (Wm^{-2}), no período seco

Table 2. Annual average radiative forcing at the top of the atmosphere at the earth's surface (Wm^{-2}) and average deviation (Wm^{-2}) during the dry season.

Ano	FR TOP	DM FR TOP	FR SUP	DM FR SUP
2002	-13,13	11,86	-81,36	41,07
2003	10,1	11,19	-135,52	50,29
2004	-11	16,96	-73,85	36,42
2005	-8,69	9,15	-65,23	40,56
2006	-22,79	16,62	-88,21	34,57
2007	-12,91	12,3	-50,58	42,63
2008	-41,03	12,68	-105,92	41,58
2009	-5,09	7,7	-95,13	36,12
2010	0,27	9,48	-45,89	20,56
2011	-29,85	12,64	-117,66	53,89
2012	-15,54	8,27	-48,99	25,9
2013	-17,58	11,67	-66,22	43,73
2014	-8,22	10,36	-63,88	42,02
2015	-22,42	12,59	-46,25	30,65
2016	-21,82	15,08	-66,09	35,68
2017	-18,61	12,95	-56,46	33,59

Os maiores valores, em módulo, encontrados na forçante são na superfície, destacando-se no período seco; porém, no chuvoso, valores de menores intensidades são notados. Tendo em 2004, o valor de 0,21 Wm^{-2} médio no topo da atmosfera, e em 2003, o valor de -135,52 Wm^{-2} médio na superfície. Observa-se uma proporção média de no mínimo 1/3 (um terço) da FR SUP em relação à FR TOP (PROCÓPIO, 2005).

A diferença entre TOP e SUP fornece o ATM (Atmosfera) sendo a quantização da quantidade de energia retida na atmosfera pela absorção do aerossol e transformada em energia térmica, Figura 7. Os valores médios mensais de TOP, SUP e ATM foram calculados através da forçante radiativa diária para o período em estudo.

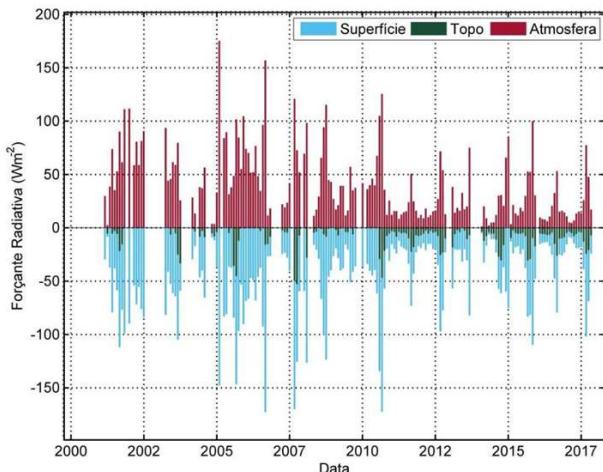


Figura 7. Variação mensal da forçante radiativa, TOP (verde), SUP (azul) e ATM (vermelho).

Figure 7. Monthly variation in radiative forcing, TOP (green), SUR (blue) and ATM (red).

Valores negativos da forçante no TOP levam ao resfriamento da atmosfera ou do sistema da Terra, enquanto valores positivos, devido à absorção de radiações solares por absorção do tipo de aerossóis, contribuem para o aquecimento da atmosfera (PROCÓPIO, 2005).

Os valores médios mensais do TOP variaram de - 5 a - 52 Wm⁻², percebe-se que os valores foram maiores (módulo) para o período seco. Enquanto os valores mensais do SUP variaram de -10 a - 180 Wm⁻², com médias maiores também no período seco. Portanto, implicando no resfriamento do topo e na superfície, porém um resfriamento maior na superfície. A mesma proporcionalidade de 1/3 é observada no período estudado (PALÁCIOS, 2017).

A diferença entre a forçante radiativa no TOP e SUP fornece o efeito do resfriamento ou aquecimento da atmosfera (ATM). Sendo observando valores variando de 2 a 170 Wm⁻², positivamente, ou seja, um aquecimento da atmosfera no período estudado. Logo, energia solar sendo convertida em energia térmica.

No ano de 2005, tem-se um pico acima de 150 Wm⁻², e valores entre 100 e 150 Wm⁻², nos anos 2001, 2006, 2007, 2008, 2010 e 2015. Verifica-se que a AOD também oscilou com picos nesses períodos, portanto, a presença de aerossóis finos é identificada. Logo, a presença de aerossóis oriundos da queima de biomassa contribuiu para a resultante de energia absorvida pela atmosfera.

Ao analisar a série, com médias mensais na Figura 8, notase que os meses de período chuvoso têm os menores valores para a forçante no topo, como na superfície, por conseguinte menor valor resultante na atmosfera. Porém, ao analisar o período seco encontram-se os maiores valores, destacando o mês de setembro de toda a série em estudo. O mês de fevereiro apresentou uma média maior na forçante no topo, em comparação com janeiro, março, abril, maio, junho e julho.

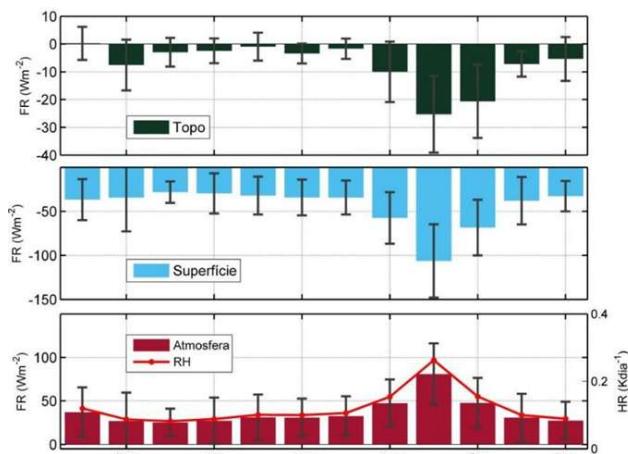


Figura 8. Fluxo da forçante radiativa no topo, superfície e a taxa de aquecimento da atmosfera em média mensal.

Figure 8. Radiative forcing flux at the top, surface and monthly average atmospheric heating rate.

Procópio (2005), analisando dois sítios da AERONET, Abracos Hill e Alta Floresta, constatou que os aerossóis de queima regional de biomassa causam, em média, uma variação entre -5 e -12 Wm⁻² para TOP e entre -21 e -74 Wm⁻² para SUP. Analisando a série temporal com a média dos meses de cada ano, verifica-se uma variação entre -0,5 e -26 Wm⁻² para TOP e entre -22 e -106 Wm⁻² para SUP. Portanto, os dados citados acima apresentam consistência em seus valores.

Na Figura 8, a variação da taxa de aquecimento (HR) acompanha os índices da ATM. Os valores mínimos são observados nos meses chuvosos (período chuvoso) e há aumento dos valores nos meses de seca (período seco). Há uma dependência direta do HR à variação da forçante na ATM, que por sua vez depende dos valores no topo (TOP) e na superfície (SUP). No período seco temos o maior valor, e no período chuvoso o menor valor da taxa de aquecimento atmosférico.

Constata-se uma pequena variação na taxa de aquecimento na média dos meses, de 0,05 a 0,28 Kdia⁻¹. Visto que o mês de setembro apresenta o maior valor de HR, 0,28 Kdia⁻¹, período seco, sendo valores consistentes com os apresentados por (PROCÓPIO, 2005).

3.3. Ajuste da forçante radiativa em função da profundidade óptica dos aerossóis

Sendo uma das maiores fontes de incertezas na previsão climática, o forçamento radiativo de aerossóis, portanto, a sua caracterização tem um papel fundamental. Vários estudos são desenvolvidos visando uma melhor compreensão e caracterização dos aerossóis. Há uma forte relação entre a forçante radiativa e a profundidade óptica (SATHEESH; SRINIVASAN, 2002).

Os valores das forçantes no topo e na superfície, no período de 2001 a 2014, foram relacionados com a profundidade óptica (500 nm), proporcionando uma regressão linear em ambos os casos. Concatenando a importância dos aerossóis na forçante, logo, no impacto do balanço de radiação atmosférico. Observam-se maiores valores em módulo para a forçante na superfície em comparação com o topo, Figura 9.

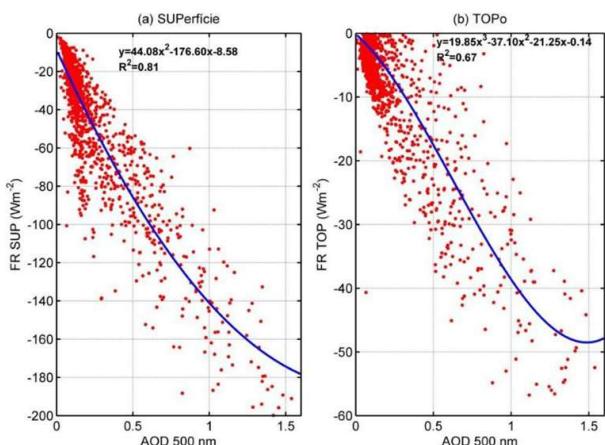


Figura 9. Relação entre a forçante na superfície e no topo com a profundidade óptica em 500 nm, com dados de 2001 a 2014.

Figure 9. Relation between the forcing at the surface and the top with the optical depth at 500 nm, data from 2001 to 2014.

Nota-se um carregamento de aerossóis com baixa profundidade ótica em ambos os casos, tanto na superfície como no topo da atmosfera. Aerossóis de moda fina predominam nessa faixa de atuação, com origem nas queimadas ou ações antropogênicas. A fim de analisar os tipos de aerossóis, será necessário fazer uma avaliação da eficiência da forçante radiativa.

O valor de R^2 encontrado na superfície implica numa boa relação entre forçante e AOD 500 nm, contudo, no topo, a relação não apresenta a mesma eficiência. Dados de anos atípicos ou alguma anormalidade podem ter influenciado a relação. Ou ainda, outros parâmetros, por exemplo, como SSA têm influência maior na forçante no topo. Ratificando a dependência da forçante em relação aos aerossóis, e este, em função de suas características.

A fim de testar as equações obtidas na Figura 9, utilizou-se os dados de 2015 a 2017 para aferição, na Figura 10. E o resultado ($R^2 = 0,8$) para as forçantes, no topo e na superfície, foi satisfatório e apresenta uma boa concordância entre os ajustes. Demonstrando uma relação da forçante com a profundidade óptica, na região estudada. A série longa de dados fornece uma equação próxima à proposta por Procopio (2004), diferenciando as constantes encontradas tanto para a superfície quanto para o topo. Tendo as FR um comportamento regido por equações polinomiais de 3º grau para FR TOP e de 2º grau para FR SUP (PROCÓPIO, 2005).

Pesquisa realizada em Cuiabá via dados da rede AERONET indicam fortes influências antropogênicas nos aerossóis, demonstrando a importância dos parâmetros na análise de radiação disponível, ou seja, na forçante radiativa que faz a interação topo, atmosfera e superfície (PROCÓPIO, 2005).

3.4. Eficiência da forçante radiativa na transição entre Pantanal e Cerrado

A eficiência da forçante radiativa (EF) é um instrumento relevante na análise dos aerossóis. Com essa magnitude, é possível avaliar o efeito da radiação para cada tipo de aerossol, características como composição química e tamanho, pois a influência da carga é descartada. Podendo ser definida pela inclinação da regressão linear entre a forçante e a profundidade óptica (PALANCAR et al., 2016).

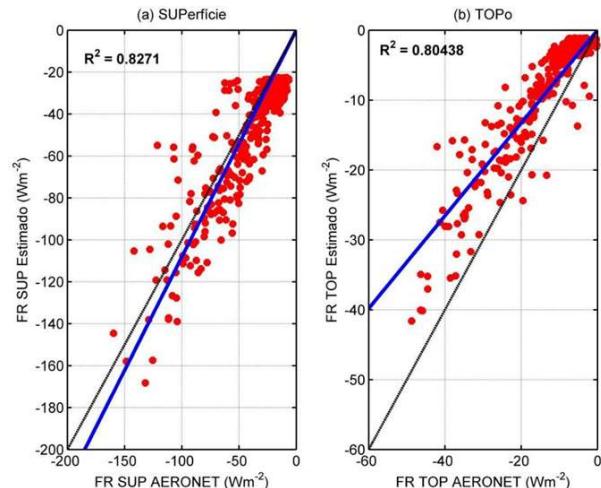


Figura 10. Dados de 2015 a 2017 para validação da regressão linear entre FR e AOD.

Figure 10. Data from 2015 to 2017 for validation of the linear regression between RF and AOD.

Sendo a EF uma taxa de variação da forçante com a profundidade óptica de aerossóis, é possível obter uma estimativa do impacto de um tipo de aerossol sobre diferentes tipos de superfície (SENA, 2013). Ou ainda estimar os tipos de aerossol e suas características. Para melhor compreensão da região, esse parâmetro foi analisado no topo da atmosfera e na superfície, mediante uma série de 2001 a 2017 (Figura 11).

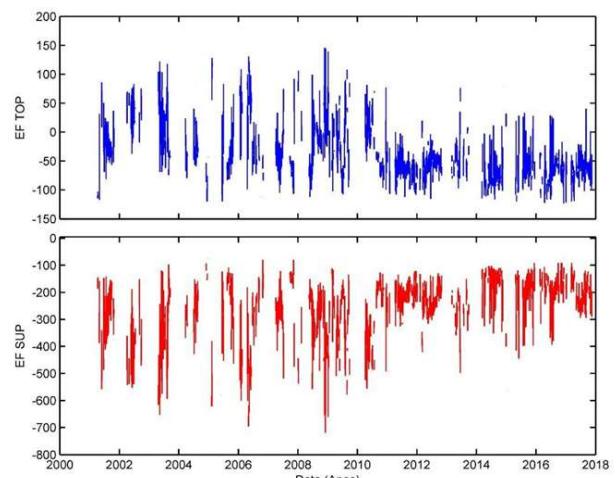


Figura 11. Variação temporal da EF no período de 2001 a 2017, no topo e na superfície.

Figure 11. Temporal variation of FE from 2001 to 2017, on top and surface.

A EF no topo da atmosfera, e na superfície, apresenta uma sazonalidade espelhada em função da profundidade óptica, Figura 12. A eficiência da forçante radiativa (EF) no topo da atmosfera (EF TOP) é positiva em alguns pontos (dias) da série, enquanto na superfície (EF SUP) é somente negativa. Porém ao analisar mensalmente, observa-se que no topo, mesmo com dados de EF positivos, a média mensal foi negativa. Acarretando assim, o resfriamento do topo da atmosfera. Em módulo, os valores são de menor intensidade se comparados à EF na superfície, porém ambos com sinal negativo em relação à média, indicando o resfriamento da

superfície e do topo. Acarretando um aquecimento da atmosfera (GARCÍA et al., 2012).

Na comparação entre os períodos chuvosos e secos, verifica-se que a EF no topo e na superfície, em ambos os casos, diminui nos meses de seca, com aumento da profundidade óptica. Oriundos provavelmente de ações antropogênicas. O ano de 2009 apresenta maior EF no topo e na superfície, com valores de 150 Wm^{-2} por unidade de profundidade óptica e -690 Wm^{-2} por unidade de profundidade óptica.

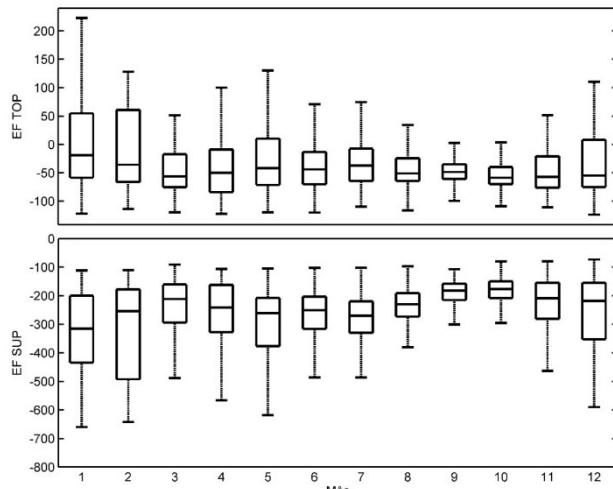


Figura 12. Distribuição da eficiência da forçante no topo e na superfície, em média mensal.

Figure 12. Distribution of top and surface forcing efficiency, monthly average.

Examinando a EF pela média mensal de toda a série de dados, Figura 12, contempla-se uma menor eficiência em períodos de seca, na superfície. O mês de janeiro apresenta uma pequena variação entre $-10 \text{ a } 45 \text{ Wm}^{-2}$ por unidade de profundidade óptica. A eficiência da forçante radiativa, não depende da densidade de aerossóis, e sim da profundidade óptica. Portanto a eficiência diminui com o aumento da profundidade óptica, o que implica na diminuição da capacidade de absorção do aerossol (GARCÍA et al., 2012).

No período da seca, há uma tendência de simetria na média dos dados da eficiência; o mesmo não ocorre para os outros meses, nas duas situações, topo e superfície. Os meses de setembro e outubro apresentaram a menor eficiência da forçante na superfície, em relação aos meses de janeiro, julho e agosto, que se destacaram. Os meses de janeiro, maio e julho apresentaram uma média de forçante no topo anteriormente muito baixa, próxima a zero, implicando em uma eficiência baixa, não devido ao AOD dos aerossóis.

3.5. Relação entre forçante radiativa e fluxos de superfície

Em 2010, no período da seca, o maior valor médio quinzenal de AOD foi registrado, 1,92. Os maiores anos de queimadas registrados na região ocorreram em 2004, 2007 e 2010. No ano de 2007, conforme discutido anteriormente, obteve a maior intensidade para AOD da série. Contudo, o ano de 2010 também obteve índices consideráveis de focos de queimadas, e os menores valores de AOD foram observados em 2014.

Em 2011, foi observado o maior valor médio quinzenal da série para a radiação global. A série de dados apresenta uma sazonalidade, com maior intensidade no final do período de seca, e menor intensidade no período chuvoso, enquanto a AOD tem seus maiores índices no período de seca e queda nos índices no período de chuva. Na tentativa de relacionar os fluxos de superfície com as propriedades ópticas dos aerossóis, foi avaliada a variação mensal do albedo de superfície com os valores de forçante radiativa (Figura 13).

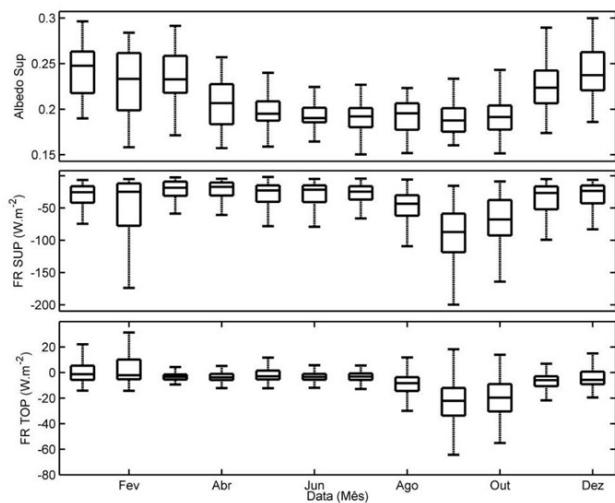


Figura 13. Média mensal de 2009 a 2017 do albedo de superfície e dos valores de forçante radiativa.

Figure 13. Monthly average of surface albedo and radiative forcing values from 2009 to 2017.

O albedo da superfície, razão entre as radiações refletida e incidente, apresenta-se uma sazonalidade em função dos períodos secos e chuvosos, com menores valores no período seco. Uma variação sazonal na média mensal, com os menores valores de albedo nos meses de julho, agosto, setembro e outubro. O albedo analisado no período tem uma variação entre 0,18 e 0,25, com menor valor no período seco.

A contribuição do albedo de superfície, com uma baixa variação na média anual, é verificada em comparação com as forçantes. Pois, as forçantes radiativas no topo e na superfície apresentam, no período de seca, as maiores intensidades, e intensidade baixa no período chuvoso. Logo, a sazonalidade do albedo de superfície é observada nas forçantes radiativas do topo e superfície da atmosfera. Na literatura, é adotada a variação do albedo de superfície anualmente; é considerada insignificante, porém verifica-se uma sazonalidade entre o albedo de superfície e as FR (SENA, 2013).

As forçantes no topo apresentam menores valores em módulo quando comparados com os valores na superfície, isso para todo período analisado, conforme já discutido em seções anteriores. No topo, os valores de FR variaram entre 0 a -25 Wm^{-2} , já na superfície ficaram entre $-20 \text{ a } -85 \text{ Wm}^{-2}$. Provavelmente, a cobertura vegetal do solo tem seu ápice no período chuvoso, e, com o início do período seco há diminuição da cobertura vegetal, levando o albedo da superfície a variar entre os períodos secos e chuvosos, ou seja, a sazonalidade observada.

4. DISCUSSÃO

A região em estudo registra uma variabilidade nas propriedades dos aerossóis em função das queimadas existentes no estado, principalmente no período seco. A

profundidade óptica de aerossóis (AOD) em períodos de chuva apresentou os menores valores e baixa variação, enquanto na seca tem-se uma variação significativa nos valores quando comparados ao mês do mesmo período e maior variação se comparados ao período chuvoso. O mês de setembro apresentou o maior AOD médio. O ano de 2007 registra o maior índice de AOD, maior que 6.

Os resultados do EAE exibem um padrão similar à evolução de AOD nos meses de agosto a outubro, atingindo valor médio superior a 1,5 no mês de setembro, corroborando a influência das partículas de moda fina. Assim, os aerossóis espalham e absorvem mais radiação nesse período. Em relação à água precipitada, uma sazonalidade foi verificada, com início da seca em julho e início das chuvas em outubro. O SSA foi mais intenso nos meses de agosto a outubro, porém o mês de março expôs o mesmo índice de mediana de setembro. Contudo, os valores foram mais dispersos em março.

As forçantes no topo (FR TOP) e na superfície (FR SUP) apresentaram sazonalidade em toda série estudada, com valores acentuados no período seco. Em módulo, as FR exibem uma proporcionalidade de aproximadamente 1/3 entre a FR TOP e a FR SUP. Essa proporcionalidade se mantém quando analisada a série em período seco e chuvoso. Em média mensal, as forçantes são negativas, ocasionando o resfriamento da superfície e do topo da atmosfera. Porém, com intensidades diferentes na qual a superfície apresenta em módulo maior intensidade. Há uma média aparente na série mensal da FR TOP variando entre -5 e -52 Wm⁻², enquanto a FR SUP varia entre -10 e -180 Wm⁻². A diferença entre FR SUP e FR TOP fornece a FR ATM, ou seja, energia absorvida pela atmosfera, e posteriormente convertida em energia térmica. A média da FR ATM é positiva em toda série, com picos significativos entre 2005 e 2008 e no ano de 2011. Em 2005 foi o maior índice encontrado no estudo, com média acima de 150 Wm⁻². Portanto, com uma FR ATM positiva, concatena-se uma taxa de aquecimento (RH) da atmosfera variando de 0,05 a 0,28 Kdia⁻¹.

Um ajuste linear realizado entre as forçantes (FR) e a AOD nos permite visualizar quais fatores característicos dos aerossóis influenciam no resultado. A maior quantidade de aerossóis é de menor AOD, moda fina, origem de queimadas ou ações antropogênicas. Equações polinomiais foram obtidas da relação entre FR e AOD, sendo de 2º grau para a FR SUP, com R² maior que 0,8, e de 3º grau para a FR TOP, com R² de 0,67. Isso mostra um comportamento diferente no topo da atmosfera em relação à AOD, para a região de estudo, em comparação à superfície.

Apurando a EF mensal média no topo da atmosfera, observou-se uma mediana variando entre -10 a -50 Wm⁻² por unidade da profundidade óptica de aerossol, enquanto na superfície a variação é de -80 a -320 Wm⁻² por unidade da profundidade óptica de aerossol. Assim, quanto maior a AOD, menor é a EF. Além disso, foi possível observar que na seca a EF é menor em comparação com outros meses na SUP e maior no TOP. Porém, a intensidade da EF é maior em módulo na SUP.

A radiação global apresentou sazonalidade, com aumento da intensidade após os períodos de seca e valores menores em períodos chuvosos, enquanto a AOD obteve seus maiores índices em períodos de seca e menores no período chuvoso.

O albedo de superfície apresentou baixa variação mensal entre 0,18 a 0,25. Contudo, há uma sazonalidade presente, na qual o período de seca tem menor índice, e o chuvoso, maior. As forçantes TOP e SUP apresentaram a mesma sazonalidade em períodos de seca e de chuva. Dessa forma, percebeu-se uma dependência entre as FR e o albedo de superfície, ou seja, com diminuição do albedo há um aumento das forçantes, seja no topo ou na superfície.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região em estudo registra uma variabilidade nas propriedades dos aerossóis em função das queimadas existentes no estado, principalmente no período seco. A profundidade óptica de aerossóis (AOD) em períodos de chuva apresentou os menores valores e baixa variação, enquanto na seca tem-se uma variação significativa nos valores quando comparados ao mês do mesmo período e maior variação se comparados ao período chuvoso. O mês de setembro apresentou o maior AOD médio. O ano de 2007 registra o maior índice de AOD, maior que 6.

Os resultados do EAE exibem um padrão similar à evolução de AOD nos meses de agosto a outubro, atingindo valor médio superior a 1,5 no mês de setembro, corroborando a influência das partículas de moda fina. Assim, os aerossóis espalham e absorvem mais radiação nesse período. Em relação à água precipitada, uma sazonalidade foi verificada, com início da seca em julho e início das chuvas em outubro. O SSA foi mais intenso nos meses de agosto a outubro, porém o mês de março expôs o mesmo índice de mediana de setembro. Contudo, os valores foram mais dispersos em março.

As forçantes no topo (FR TOP) e na superfície (FR SUP) apresentaram sazonalidade em toda série estudada, com valores acentuados no período seco. Em módulo, as FR exibem uma proporcionalidade de aproximadamente 1/3 entre a FR TOP e a FR SUP. Essa proporcionalidade se mantém quando analisada a série em período seco e chuvoso. Em média mensal, as forçantes são negativas, ocasionando o resfriamento da superfície e do topo da atmosfera. Porém, com intensidades diferentes na qual a superfície apresenta em módulo maior intensidade. Há uma média aparente na série mensal da FR TOP variando entre -5 e -52 Wm⁻², enquanto a FR SUP varia entre -10 e -180 Wm⁻². A diferença entre FR SUP e FR TOP fornece a FR ATM, ou seja, energia absorvida pela atmosfera, e posteriormente convertida em energia térmica. A média da FR ATM é positiva em toda série, com picos significativos entre 2005 e 2008 e no ano de 2011. Em 2005 foi o maior índice encontrado no estudo, com média acima de 150 Wm⁻². Portanto, com uma FR ATM positiva concatena-se uma taxa de aquecimento (RH) da atmosfera variando de 0,05 a 0,28 Kdia⁻¹.

Um ajuste linear realizado entre as forçantes (FR) e a AOD nos permite visualizar quais fatores característicos dos aerossóis influenciam no resultado. A maior quantidade de aerossóis é de menor AOD, moda fina, origem de queimadas ou ações antropogênicas. Equações polinomiais foram obtidas da relação entre FR e AOD, sendo de 2º grau para a FR SUP, com R² maior que 0,8, e de 3º grau para a FR TOP, com R² de 0,67. Isso mostra um comportamento diferente no topo da atmosfera em relação à AOD, para a região de estudo, em comparação à superfície.

Apurando a EF mensal média no topo da atmosfera, observou-se uma mediana variando entre -10 a -50 Wm⁻² por

unidade da profundidade óptica de aerossol, enquanto na superfície a variação é de -80 a -320 Wm⁻² por unidade da profundidade óptica de aerossol. Assim, quanto maior a AOD, menor é a EF. Além disso, foi possível observar que na seca a EF é menor em comparação com outros meses na SUP e maior no TOP. Porém, a intensidade da EF é maior em módulo na SUP.

A radiação global apresentou sazonalidade, com aumento da intensidade após os períodos de seca e valores menores em períodos chuvosos, enquanto a AOD obteve seus maiores índices em períodos de seca e menores no período chuvoso.

O albedo de superfície apresentou baixa variação mensal entre 0,18 e 0,25. Contudo, há uma sazonalidade presente, na qual o período de seca tem menor índice, e o chuvoso, maior. As forçantes TOP e SUP apresentaram a mesma sazonalidade em períodos de seca e de chuva. Dessa forma, percebeu-se uma dependência entre as FR e o albedo de superfície, ou seja, com diminuição do albedo há um aumento das forçantes, seja no topo ou na superfície.

6. REFERÊNCIAS

- ARTAXO, P.; FERNANDES, E. T.; MARTINS, J. V.; YAMASOE, M. A.; HOBBS, P. V.; MAENHAUT, W.; LONGO, K. M.; CASTANHO, A. Large-scale aerosol source apportionment in Amazonia. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 103, p. 31837-31847, 1998. <https://doi.org/10.1029/98JD02346>
- ARTAXO, P.; RIZZO, L. V.; BRITO, J. F.; BARBOSA, H. M. J.; ARANA, A.; SENA, E. T.; CIRINO, G. G.; BASTOS, W.; MARTIN, S. T.; ANDREAE, M. O. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: From natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discussions*, v. 165, p. 203-235, 2013. <https://doi.org/10.1039/c3fd00052d>
- DUBOVIK, O.; SINYUK, A.; LAPYONOK, T.; HOLBEN, B. N.; MISHCHENKO, M.; YANG, P.; ECK, T. F.; VOLTEN, H.; MUÑOZ, O.; VEIHELMANN, B.; VAN der ZANDE, W. J.; LEON, J. F.; SOROKIN, M.; SLUTSKER, I. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 111, n. 11, p. 1-34, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JD006619>
- ECK, T. F.; HOLBEN, B. N.; SINYUK, A.; PINKER, R. T.; GOLOUB, P.; CHEN, H.; CHATENET, B.; LI, Z.; SINGH, R. P.; TRIPATHI, S. N.; REID, J. S.; GILES, D. M.; DUBOVIK, O.; O'NEILL, N. T.; SMIRNOV, A.; WANG, P.; XIA, X. Climatological aspects of the optical properties of fine/coarse mode aerosol mixtures. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 115, n. 19, p. 1-20, 2010. <https://doi.org/10.1029/2010JD014002>
- GARCÍA, O. E.; DÍAZ, J. P.; EXPÓSITO, F. J.; DÍAZ, A. M.; DUBOVIK, O.; DERIMIAN, Y.; DUBUSSON, P.; ROGER, J. C. Shortwave radiative forcing and efficiency of key aerosol types using AERONET data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 12, n. 11, p. 5129-5145, 2012. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5129-2012>
- HALTHORE, R. N.; ECK, T. F.; HOLBEN, B. N.; MARKHAM, B. L. Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940-nm band. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. D4, p. 4343-4352, 1997. <http://dx.doi.org/10.1029/96JD03247>
- HOLANDA, B. A. *Absorção da radiação por aerossóis na Amazônia*. 93f. Dissertação [Mestrado em Ciências] – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- HOLBEN, N.; ECK, T. F.; SLUTSKER, I.; TANRÉ, D.; BUIS, J. P.; SETZER, A.; VERMOTE, E.; REAGAN, J. A.; KAUFMAN, Y. J.; NAKAJIMA, T.; LAVENU, F.; JANKOWIAK, I.; SMIRNOV, A. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, v. 66, n. 1, p. 1-16, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
- INPE_Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais*. 2020. Available at: <http://www.inpe.br/queimadas>. Accessed on: 15 Dec. 2022.
- MAMEDE, L.; ROSS, J. L. S.; SANTOS, L. M. *Geomorfologia*. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia - Projeto RADAMBRASIL, 1981.
- PALÁCIOS, R. S. *Interação entre a radiação solar direta e os aerossóis atmosféricos na Amazônia*. 159f. Tese [Doutorado em Física Ambiental] – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2017.
- PALANCAR, G.; OLCESE, L. E.; LANZACO, B. L.; ACHAD, M.; LÓPEZ, M. L.; TOSELLI, B. M. Aerosol radiative forcing efficiency in the UV-B region over central Argentina. *Atmospheric Research*, v. 176-177, p. 1-9, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.016>
- PROCÓPIO, A. S. *Forçante radiativa direta dos aerossóis na região amazônica devida à queima de biomassa*. 224f. Tese [Doutorado em Meteorologia] - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001549066>
- SANTANNA, F. B. *Propriedades óticas do aerossol atmosférico na região sul de Mato Grosso*. 110p. Dissertação [Mestrado em Física Ambiental] - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2008.
- SANTOS, A. C. A. *Absorção da radiação solar por partículas de aerossóis no pantanal mato- partículas de aerossóis no pantanal mato-grossense*. 107p. Tese [Doutorado em Física Ambiental] – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2018.
- SATHEESH, S. K.; SRINIVASAN, J. Enhanced aerosol loading over Arabian Sea during the pre-monsoon season: Natural or anthropogenic? *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 18, p. 1997-2000, 2002. <https://doi.org/10.1029/2002GL015687>
- SCHAFFER, J. S.; ECK, T. F.; HOLBEN, B. N.; ARTAXO, P.; DUARTE, A. F. Characterization of the optical properties of atmospheric aerosols in Amazônia from long-term AERONET monitoring (1993-1995 and 1999-2006). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 113, n. 4, p. 1-16, 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JD009319>
- SCHUSTER, G. L.; DUBOVIK, O.; HOLBEN, B. N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 111, n. 7, p. 1-14, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JD006328>
- SENA, E. T.; ARTAXO, P.; CORREIA, A. L. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass

burning aerosols and the effects of land use change in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, no. 3, p. 1261-1275, 2013. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1261-2013>

SENA, E. T. **Variabilidade espacial e temporal da forçante radiativa direta de aerossóis de queimadas e os efeitos da mudança de uso do solo na Amazônia.** 272f. Tese [Doutorado em Ciências] - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Agradecimentos: à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

Contribuição dos autores: L.F.A.C.: Conceitualização, metodologia, redação e análises estatísticas (original); J.B.M.: Supervisão, administração e validação (original), redação (revisão e edição); D.M.M.: Redação, coleta de dados e metodologia (original); I.M.C.B.S.: Redação, coleta de dados e metodologia (original); N.N.O.: Redação e tradução (revisão e edição); R.S.P.: Supervisão, investigação, validação e metodologia (original); T.R.R.: Investigação e validação (original); L.C.R.: Redação (revisão e edição). Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

Conflito de interesses: Os autores declararam não haver conflito de interesses.