

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO SAZONAL DA
CONCENTRAÇÃO DE *BLACK CARBON* NA
EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DO PANTANAL
MATO-GROSSENSE**

HALINE JOSEFA ARAUJO DA SILVA

PROF. DR. LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO

**Cuiabá - MT
Maio de 2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO SAZONAL DA
CONCENTRAÇÃO DE *BLACK CARBON* NA
EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DO PANTANAL
MATO-GROSSENSE**

HALINE JOSEFA ARAUJO DA SILVA

*Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Física Ambiental da
Universidade Federal de Mato Grosso,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Física Ambiental*

PROF. DR. LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO

**Cuiabá - MT
Maio de 2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

J83i Araujo da Silva, Haline Josefa.

Influência da variação sazonal da concentração de Black Carbon na emissividade atmosférica do Pantanal Mato-Grossense / Haline Josefa Araujo da Silva. -- 2021 44 f.: il. color. ; 30 cm.

Orientador: Leone Francisco Amorim Curado.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2021. Inclui bibliografia.

1 . Black Carbon. 2. emissividade atmosférica. 3. Pantanal Mato-Grossense. 4. equação de Brutsaert. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO SAZONAL DA CONCENTRAÇÃO DE BLACK CARBON NA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DO PANTANAL MATO-GROSSENSE

AUTORA: MESTRANDA HALINE JOSEFA ARAÚJO DA SILVA

Dissertação defendida e aprovada em **13 de maio de 2021**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado – Orientador - Instituto de Física – UFMT
Prof. Dr. João Basso Marques – Examinador Interno – Instituto de Física - UFMT
Prof. Dr. Vinícius Márcio Rodrigues Pereira - Examinador Externo - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais /INPE/Cuiabá-MT
Cuiabá-MT, 13/05/2021.



Documento assinado eletronicamente por **SERGIO ROBERTO DE PAULO, Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 13/05/2021, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 13/05/2021, às 17:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Marcio Rodrigues Pereira, Usuário Externo**, em 13/05/2021, às 18:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOÃO BASSO MARQUES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 14/05/2021, às 09:58,



conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3492049** e o código CRC **73E0778F**.

Referência: Processo nº 23108.034193/2021-32

SEI nº 3492049

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Lourival João da Silva e Odalia Ramos de Araujo pelo imenso amor, pelas suas mãos calejadas devido ao trabalho árduo com o intuito de me proporcionar um futuro melhor.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço primeiramente à Deus que sempre esteve ao meu lado, cuidando de mim e me ensinando a prosseguir.
- Agradeço imensamente aos meus pais que sempre me apoiaram, me incentivaram e nunca mediram esforços para me dar o melhor.
- Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental pela oportunidade de realizar esta pesquisa.
- Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.
- Agradeço ao meu orientador pela paciência e pelo auxílio durante a orientação do Mestrado.
- Agradeço a todos os professores da Pós-Graduação pelos ensinamentos compartilhados nas disciplinas do Mestrado.
- Agradeço aos amigos e colegas da Pós-Graduação pela troca de experiências e por tornar a caminhada mais prazerosa.
- A todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho, meu muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	I
RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo Geral.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 RADIAÇÃO SOLAR	4
2.1.1 Lei de Wien.....	4
2.1.2 Lei de Stefan-Boltzmann.....	5
2.1.2.1 Emissividade De Uma Superfície	5
2.2 BALANÇO DE ENERGIA.....	6
2.2.1 Radiação de Ondas Longas	6
2.3 O PANTANAL	7
2.4 AEROSSÓIS	9
2.4.1 <i>Black Carbon</i>	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	12
3.2 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA	12
3.2.1 Temperatura e Umidade Relativa do Ar	12
3.2.2 Concentração de <i>Black Carbon</i>	13
3.3 ESTIMATIVA DA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE BRUTSAERT	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	17
4.1 VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE <i>BLACK CARBON</i>	17
4.1.1 Relação do BC com as variáveis meteorológicas	20
4.2 VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA	22
4.3 EMISSÃO DE ENERGIA DA ATMOSFERA	25
4.4 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE <i>BLACK CARBON</i> NA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA	27

5. CONCLUSÕES.....	30
6 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas Sub-Regiões. Fonte: SILVA, J. dos S. V. ABDON, M. de M, 1998.....	8
Figura 2- Variação média mensal da concentração de <i>Black Carbon</i> (2017-2019). Fonte: Elaborado pela autora.....	17
Figura 3- Monitoramento dos focos de queimadas no Pantanal (2017-2019). Fonte: Elaborado pela autora	19
Figura 4- Variação média mensal da temperatura e umidade relativa do ar para os anos de 2018 e 2019. Fonte: Elaborado pela autora.	20
Figura 5- a) correlação entre a temperatura do ar e a concentração de <i>Black Carbon</i> . b) Correlação entre a umidade relativa do ar e a concewntração de <i>Black Carbon</i> . Fonte: elaborado pela autora.	21
Figura 6- Variação média mensal da emissividade atmosférica para os anos de 2018 e 2019. Fonte: Elaborada pela autora.	22
Figura 7- Variação sazonal da emissividade atmosférica para o ano de 2018. Fonte: elaborada pela autora.	23
Figura 8- Variação da sazonal da emissividade atmosférica para o ano de 2019. Fonte: Elaborada pela autora.	23
Figura 9- Variação média mensal da emissão atmosférica para os anos de 2018 e 2019. Fonte: Elaborada pela autora.	25
Figura 10- Variação sazonal da emissão atmosférica para o ano de 2018. Fonte: Elaborado pela autora.....	26
Figura 11- Variação sazonal da emissão atmosférica para o ano de 2019. Fonte: Elaborada pela autora.	26
Figura 12- Variação da concentração de <i>Black Carbon</i> em relação a emissividade atmosférica para o ano de 2018. Fonte: Elaborada pela autora.....	27
Figura 13- Variação da concentração de <i>Black Carbon</i> em relação a emissividade atmosférica para o ano de 2019. Fonte: Elaborada pela autora.....	28
Figura 14- Correlação entre a concentração e a emissividade atmosférica para os anos de 2018 e 2019 respectivamente. Fonte: Elaborada pela autora.	28
Figura 15- Correlação entre a concentração de <i>Black Carbon</i> e a emissividade atmosférica para todo o período estudado. Fonte: Elaborada pela autora.....	29

RESUMO

Silva, H.J.A. **Influência da variação sazonal da concentração de *Black Carbon* na emissividade atmosférica do Pantanal Mato-Grossense.** Cuiabá, 2021, 44f. Dissertação (mestrado em Física Ambiental). Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A expansão do agronegócio e a mudança de uso da terra para o plantio de grãos, no Pantanal Mato-Grossense, trouxeram como consequências o aumento do desmatamento e dos incêndios, que por sua vez são responsáveis pela emissão de aerossóis antrópicos como o *Black Carbon* (Carbono Negro). Esse aerossol tem impacto significativo sobre o clima global e regional, alterando o balanço de radiação do sistema Terra-atmosfera. No entanto, a quantificação de seus efeitos ainda está sujeita à grandes incertezas. No presente estudo buscou-se analisar a influência da variação sazonal da concentração de *Black Carbon* na emissividade atmosférica do Pantanal Mato-Grossense. Para isso, calculou-se as variações das concentrações de *Black Carbon* e das variáveis meteorológicas, e estimou-se a emissividade atmosférica pela equação de Brutsaert. Verificou-se que as variações das concentrações de *Black Carbon* e da emissividade atmosférica exibem padrões de comportamentos contrários. Os resultados indicam que o aumento da concentração de *Black Carbon* na atmosfera do Pantanal durante o período seco diminui o teor de vapor de água, e isto pode causar uma diminuição na emissividade atmosférica.

Palavras Chave: *Black Carbon*, emissividade atmosférica, Pantanal Mato-Grossense, equação de Brutsaert.

ABSTRACT

Silva, H.J.A. **Influence of the seasonal variation of the concentration of *Black Carbon* on the atmospheric emissivity of the Pantanal Mato-Grossense.** Cuiabá, 2021, 44f. Dissertation (Master's in Environmental Physics), Physics Institute, Federal University of Mato Grosso.

The expansion of agribusiness and the change in land use for grain planting, in the Pantanal Mato-Grossense, brought as consequences the increase in deforestation and fires, which in turn are responsible for the emission of anthropic aerosols such as *Black Carbon*. This aerosol has a significant impact on the global and regional climate, altering the radiation balance of the Earth-atmosphere system. However, the quantification of its effects is still subject to great uncertainties. In the present study, we sought to analyze the influence of the seasonal variation of the *Black Carbon* concentration on the atmospheric emissivity of the Pantanal Mato-Grossense. For this, the variations of *Black Carbon* concentrations and meteorological variables were calculated, and the atmospheric emissivity was estimated using the Brutsaert equation. It was found that variations in *Black Carbon* concentrations and atmospheric emissivity exhibit patterns of contrary behavior. The results indicate that the increase in the concentration of *Black Carbon* in the Pantanal atmosphere during the dry period decreases the water vapor content, and this can cause a decrease in atmospheric emissivity.

Keywords: *Black Carbon*, atmospheric emissivity, Pantanal Mato-Grossense, Brutsaert equation.

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

Nas últimas décadas, os aerossóis antropogênicos como o *Black Carbon* (Carbono Negro), provenientes da queima incompleta de combustíveis fósseis, queima de biomassa e biocombustíveis, tornaram-se assunto de grande interesse ambiental e uma das principais áreas de pesquisa da comunidade científica. Isto ocorre devido ao seu impacto climático e na saúde humana, embora ainda permaneçam incertezas na quantificação de seus efeitos. Depois do dióxido de carbono (CO₂), o *Black Carbon*, é o segundo maior contribuinte para o aquecimento global. Sendo um forte absorvedor da radiação solar, ele aquece a atmosfera ao passo em que reduz a irradiância solar no solo, alterando assim o balanço de radiação do sistema terra-atmosfera (BIBI et al., 2017).

Devido ao fato de sua faixa de tamanho ser principalmente da moda fina, as partículas podem penetrar o sistema respiratório humano, acarretando sérios riscos à saúde e contribuindo para o surgimento ou agravamento de doenças pulmonares. Um estudo recente realizado nos EUA, para entender a relação entre a exposição de longo prazo à poluição do ar e a mortalidade por COVID-19, constatou que um aumento de apenas 1 µgm⁻³ das partículas finas (PM 2.5) está associado a um aumento de 8% na taxa de mortalidade por COVID-19 (SRIVASTAVA, 2021).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC), estima-se que as emissões globais anuais de *Black Carbon*, são de aproximadamente 8 Tg ano⁻¹ e contribuiu com 0,2-0,4 Wm⁻² para o forçamento radiativo (FORSTER et al., 2007). Por ter um tempo de vida atmosférico relativamente curto (cerca de 7 dias), as variações espaço-temporais das concentrações das partículas de *Black Carbon* dependem consideravelmente das fontes de emissão e das condições meteorológicas do local, e esses dois processos variam muito dependendo da região (ZHANG et al., 2020).

No Brasil a maior fonte de aerossóis antrópicos é oriunda das emissões por queima de biomassa (ARTAXO et al., 2006), que é uma prática agrícola comumente utilizada. Durante os meses da estação seca, principalmente de agosto a outubro, as

queimadas se intensificam, o que faz com que boa parte do Brasil e da América do Sul fique envolta por fumaça que cobre milhões de quilômetros quadrados (GRIMM et al., 2012).

Estudos realizados na região da floresta amazônica (ARTAXO et al., 2006) apontam que durante a estação chuvosa, onde predominam as emissões naturais, a concentração de massa das partículas de aerossóis é da ordem de 8 a 10 μgm^{-3} . Já na estação seca, onde predomina a emissão por queimadas, a concentração das partículas sobe para cerca de 300 a 600 μgm^{-3} . Essa alta concentração de aerossóis têm impacto significativo no balanço de radiação.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Pantanal, a maior área úmida de água doce do mundo, é um dos biomas que compõem o estado de Mato Grosso. Ele foi reconhecido como patrimônio nacional pela Constituição Federal Brasileira de 1988 e patrimônio mundial pela Unesco em 2000. É frequentemente caracterizado pelo seu pulso de inundação que tem como influência o regime de chuvas amazônico no norte do rio Paraguai. É um bioma rico em biodiversidade, sendo crucial a sua preservação.

Atualmente, o Pantanal vive uma das fases mais críticas de degradação ambiental. A expansão do agronegócio e a mudança de uso da terra para a plantação de grãos trouxeram como consequência o aumento do desmatamento e dos incêndios. Toda essa degradação é responsável pelo aumento da concentração de aerossóis antropogênicos. Isto pode alterar a composição atmosférica, causando um desequilíbrio no balanço de radiação, contribuindo assim para mudanças na temperatura, ciclo hidrológico, estabilidade atmosférica e interações biosfera-atmosfera da região (RAMACHANDRAN, KEDIA 2011).

Considerando que a região do Pantanal carece de estudos voltados para a interação aerossol-radiação, e que as diversas maneiras pela qual essa interação acontece é uma das principais fontes de incertezas na modelagem e previsão do clima e considerando que um dos parâmetros que determinam os efeitos radiativos dos aerossóis são suas concentrações, buscou-se neste estudo analisar a influência da variação sazonal da concentração de *Black Carbon* na emissividade atmosférica do Pantanal Mato-Grossense.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da variação sazonal da concentração de *Black Carbon* na emissividade atmosférica do Pantanal Mato-Grossense.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar as variações temporais da concentração de *Black Carbon*;
- Estimar a emissividade atmosférica a partir da equação de Brutsaert;
- Verificar a relação entre a emissão e a emissividade atmosférica;
- Verificar a relação entre BC e as variáveis meteorológicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é a principal fonte de energia disponível aos processos naturais, desde a fotossíntese até a circulação geral da atmosfera. O sol irradia por todo o espectro eletromagnético, no ultravioleta, no visível e no infravermelho próximo. No entanto, a maior parte da energia está concentrada na faixa do visível, ou seja, de 400 a 700 nm (0,4-0,7 μ m), o pico de emissão fica em torno de 500 nm.

A quantidade de energia irradiada de um corpo depende muito da temperatura do corpo. A radiação emitida pelo sol é semelhante a de um corpo negro em cerca de 6000K.

O regime radiativo de uma superfície é mais bem entendido por duas leis: a lei de Wien e a lei de Stefan-Boltzmann.

2.1.1 Lei de Wien

Em 1894, Wihelm Wien propôs que o produto da temperatura absoluta (T, em K) do objeto, pelo comprimento de onda de máxima emissão energética ($\lambda_{m\acute{a}x}$), é uma constante absoluta, ou seja:

$$T\lambda_{m\acute{a}x} = \text{constante} = 2,898 \cdot 10^6 \text{ nmK}$$

Eq. (1)

Essa equação é chamada de Lei do deslocamento de Wien. Quanto maior a temperatura do corpo radiante menor é o comprimento de onda de máxima absorção. Pela lei de Wien determina-se que a energia emitida pelo sol tem $\lambda_{m\acute{a}x} \approx 500\text{nm}$ e a energia emitida pela terra tem $\lambda_{m\acute{a}x} \approx 10\,000$. Devido a isso, o comprimento de onda da radiação emitida pelo sol (T=6000K) é considerada de “ondas curtas” e a emitida pela Terra (T=300K) de “ondas longas” (VAREJÃO, 2006).

Essa lei é importante para o entendimento do balanço de radiação na superfície da Terra.

2.1.2 Lei de Stefan-Boltzmann

Demonstrada experimentalmente, em 1879, por Josef Stefan e comprovada teoricamente por Ludwig Boltzmann, a lei de Stefan-Boltzmann relaciona a densidade de fluxo de energia emitida por uma superfície e a sua temperatura absoluta:

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

Eq.(2)

Onde:

E= densidade de fluxo de energia emitida (W/m²)

ε=emissividade (adimensional)

σ= constante de Stefan-Boltzmann (= 5,67 10⁻⁸ W/m² K⁴ = 4,903 10⁻⁹ MJ / m² d K⁴).

T=Temperatura (K)

Essa lei evidencia que todas as superfícies naturais emitem energia radiante.

2.1.2.1 Emissividade De Uma Superfície

A emissividade é um parâmetro que define a capacidade de emissão de uma superfície radiante. Pela lei de Stefan-Boltzmann temos que a emissividade é a fração da radiação emitida pela superfície (E), em relação ao corpo negro:

$$\varepsilon = \frac{E}{\sigma T^4}$$

Eq. (3)

A emissividade varia de 0 a 1. Um corpo negro tem emissividade igual a 1. Portanto, quanto maior o valor da emissividade maior é a capacidade do corpo emitir radiação. A maioria dos objetos naturais possuem uma emissividade entre 0,95 e 1.

Considerando a atmosfera como uma superfície radiante, o valor de ε mudará continuamente, pois deve-se levar em consideração o teor de vapor d'água presente na mesma, logo, a estimativa de ε dependerá do vapor da água.

Sendo o seu cálculo muito importante para determinar a radiação de onda longa líquida na interface superfície-atmosfera que é utilizada em diversos modelos climáticos, como por exemplo, no cálculo do efeito estufa (PEREIRA et al., 2007).

2.2 BALANÇO DE ENERGIA

A energia irradiada do sol (ondas curtas) e a energia liberada da superfície terrestre (ondas longas) constitui o equilíbrio de energia da terra. A atmosfera desempenha um papel muito importante nesse processo, controlando a entrada e a saída da radiação. Quando a radiação solar atravessa a atmosfera terrestre e interage com seus constituintes, sofre mudanças na quantidade, na qualidade e na direção dos raios solares. Considerando o total de energia que chega no topo da atmosfera, parte é absorvida por gases atmosféricos e vapor de água, parte é refletida pelas nuvens e parte atinge a superfície do solo. Ao atingir a superfície do solo, parte desta radiação é absorvida e parte é refletida, constituindo assim o “balanço de ondas curtas”.

Ao receber a radiação solar, a superfície do solo irá se aquecer, portanto, emitirá radiação à atmosfera, obedecendo a lei de Stefan-Boltzmann, a qual por sua vez também emitirá radiação, constituindo assim o “balanço de ondas longas”.

Segundo SEINFELD E PANDIS 2006, a irradiância solar incidente no topo da atmosfera é de aproximadamente 342 W.m^{-2} , desse total, uma fração (cerca de 30%) é refletida de volta para o espaço e o restante é absorvida pelo sistema terra-atmosfera.

2.2.1 Radiação de Ondas Longas

A radiação de ondas longas é o fluxo de energia radiante emitida pela atmosfera em direção à superfície terrestre e pela superfície em direção à atmosfera. A faixa de emissão fica em torno de $4,0\text{-}100,0 \mu\text{m}$. A radiação de ondas longas é uma componente chave no balanço de energia que depende criticamente de boas estimativas dessa componente. A radiação de ondas longas proveniente da atmosfera é a componente mais difícil de se medir, pois os instrumentos utilizados para medi-la, os pirgeomêtros, são relativamente caros e sensíveis, comparados aos piranômetros, que medem a radiação de ondas curtas. Além disso, eles emitem radiação em comprimentos de onda

comparáveis aos que estão sendo medidos. Desta forma, vários modelos foram desenvolvidos para estimar a radiação de onda longa descendente, baseados em dados mais prontamente disponíveis como a temperatura e a umidade do ar. Esses modelos variam em sofisticação, sendo alguns deles baseados na teoria de transferência radiativa de propagação de ondas longas e a maioria formulações empíricas simples, tanto para céu claro quanto para céu nublado. Os modelos empíricos, no entanto, tendem a ser menos aplicáveis ao passo que os baseados fisicamente são mais facilmente adaptáveis às características locais (Ångström (1915), Brunt (1932), Swinbank (1963), Idso e Jackson (1969), Brutsaert, 1975, Prata, 1996, Crawford e Duchon (1999)).

2.3 O PANTANAL

Reconhecido pela Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (Unesco) por sua importância ecológica, como Reserva da Biosfera Mundial, o Pantanal é considerado a maior planície alagada do mundo. Está localizado na América do Sul, inserido na Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai. No Brasil, ocupa uma área de 138.183 km², abrange partes dos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul e estende-se pelos países Bolívia e Paraguai.¹

Considerando as diferenças nas características como inundação, relevo, solo e vegetação, por conta da influência dos Biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica (BRASIL, 1997), o Pantanal foi dividido em onze sub-regiões: Porto Murtinho, Poconé, Paraguai, Paiaguás, Nhecolândia, Nabileque, Miranda, Cáceres, Barão de Melgaço, Aquidauana e Abobral (Figura 1).

¹ Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/unesco-declara-pantanal-reserva-da-biosfera>

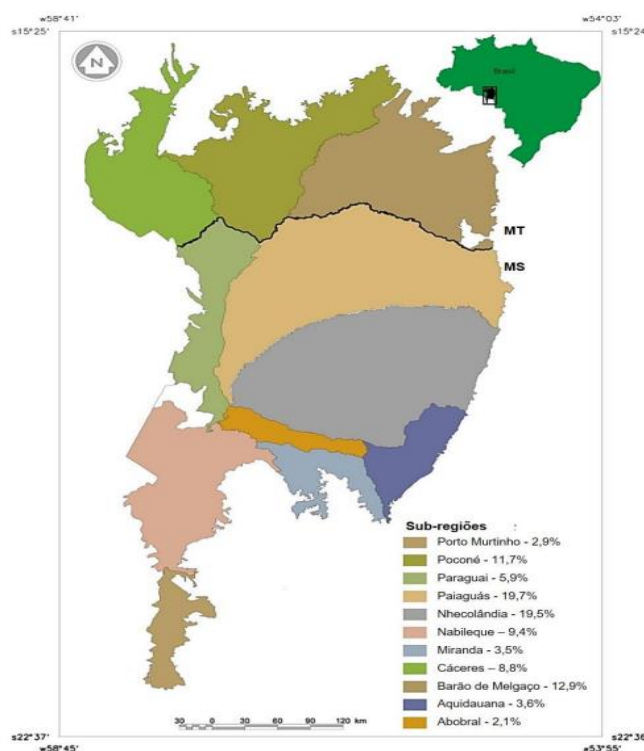


Figura 1-Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas Sub-Regiões. Fonte: SILVA, J. dos S. V. ABDON, M. de M, 1998

Sendo influenciado pelos sistemas atmosféricos que atuam na região amazônica e pelos sistemas extratropicais, segundo a classificação climática de Koppen, o clima do pantanal é do tipo AW, ou seja, clima tropical úmido, com estação seca de inverno² (que se estende de maio a setembro) e verão chuvoso. A média da precipitação anual fica em torno de 1400 mm e a temperatura média anual da região é de 26,1 °C (BIUDES et al., 2015).

A vegetação do pantanal é bastante diversificada, composta por formações florestais (matas e cerrado) e savânicas (cerrado típico), e também amplas áreas de campo cerrado, campos limpos e campos inundáveis (ricos em gramíneas), incluindo comunidades aquáticas (camalote-da-meia-noite e vitória-régia). Conta também com espécies de plantas invasoras como o cambará, o pombeiro e a lixeira (SANTOS et al., 2006).

A colonização do Pantanal Mato-Grossense se deu por ribeirinhos que utilizavam a pesca como a atividade extrativista mais importante da região (CURADO, 2011). A pesca tornou-se uma atividade de grande importância social, econômica e

² Disponível em: <http://www.abc.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Livro-Biomas-e-Agricultura-Site.pdf>

ambiental, sendo realizada atualmente como pesca de subsistência, pesca profissional artesanal e pesca amadora ou recreativa (BARLETTA et al., 2016).

No cenário atual, a pecuária de corte é a principal atividade econômica, responsável por 81,7% de toda produção bruta da região³. Esse sistema produtivo se desenvolveu graças à existência de extensas áreas de pastagens naturais e estabelece o padrão de ocupação do espaço geográfico e da cultura pantaneira. Entretanto, nas últimas décadas, a atividade do setor vem sofrendo uma grande queda na produtividade, pois a região vem enfrentando problemas cada vez mais graves por conta da degradação de suas pastagens nativas como consequência da exploração empírica, sem bases técnicas, assim como as secas prolongadas que vem ocorrendo na região pantaneira⁴.

As principais fontes de ameaça à biodiversidade do Pantanal estão relacionadas às ações antrópicas. Dentre elas se destacam o desmatamento e o uso do fogo que se tornou frequente nas últimas décadas para limpar as pastagens e forçar a rebrota (DONATELI, 2014). Além de consumir grandes quantidades de biomassa, as queimadas modificam a qualidade da água, do ar, do solo e de outros recursos naturais, e também são responsáveis por emissões significativas de gases traços e aerossóis para a atmosfera. (ARTAXO et al., 2006; DA SILVA CARDOSO et al., 2010)

2.4 AEROSSÓIS

Os aerossóis podem ser definidos como colóides compostos por finas partículas sólidas e gotículas de líquidos suspensas na atmosfera (WANG et al., 2019). São de diferentes tamanhos, formas, composições químicas e propriedades físicas, provenientes de fontes naturais, como poeira transportada pelo vento, pulverização do mar, emissões vulcânicas e biogênicas, e de atividades antropogênicas como a combustão de combustíveis e a emissão de queimadas (SEINFELD e PANDIS, 2006)⁵.

³ Disponível em: <http://www.mt.gov.br/-/15832384-governo-de-mt-vai-investir-mais-de-r-430-milhoes-na-recuperacao-da-pecuaria-do-pantanal>

⁴ Disponível em: <http://www.abc.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Livro-Biomas-e-Agricultura-Site.pdf>

⁵ Disponível em: http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos_publicos/GT1/GT1_volume_completo_cap6.pdf.

Os aerossóis podem ser denominados como primários, pois são emitidos diretamente como partículas, podendo também ser produzidos na atmosfera livre pelo processo de conversão de partículas topográficas de gases, sendo assim denominados como aerossóis secundários.

O tamanho das partículas de aerossóis varia de algumas dezenas de angstroms a várias centenas de micrometros e são classificadas de acordo com o seu diâmetro (D_p). As partículas com diâmetro menor que $2,5\ \mu\text{m}$ são classificadas como “moda fina” já aquelas com diâmetro entre $2,5\ \mu\text{m}$ e $10\ \mu\text{m}$ são referidas como “moda grossa”.

As partículas de aerossóis podem ser removidas da atmosfera por dois mecanismos: a deposição seca e a deposição úmida. Na deposição seca, são removidas por absorção na superfície do solo, água ou vegetação, sem a presença de precipitação, na deposição úmida ocorre a incorporação das partículas em gotículas de nuvens durante a formação da precipitação (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Os aerossóis atmosféricos influenciam fortemente o clima global, assim, diretamente alteram o balanço de radiação do sistema terra-atmosfera absorvendo e espalhando tanto a radiação solar quanto a terrestre. De forma indireta agem como núcleo de condensação de nuvens (NCN), alterando o seu tempo de residência, suas propriedades físicas e radioativas, assim como a taxa de precipitação (GULERIA; KUNIAL, 2019).

Segundo Artaxo et al., 2006, as mudanças no balanço energético global são denominadas de forçantes radiativas, em unidades de Wm^{-2} , que é a diferença em irradiância líquida na tropopausa entre um estado perturbado e um estado de referência. Essas perturbações podem ser causadas por influências naturais: por exemplo, a intensidade das atividades solares, a órbita terrestre, vulcões, etc.; e pelas atividades humanas: como por exemplo a queima de combustíveis fósseis e as mudanças no uso do solo. O estado de referência pode ser definido como a ausência ou o impacto do agente forçante. Alguns autores adotam a era pré-industrial, como tal estado (FORSTER et al., 2007). A forçante é dita positiva quando contribui para o aquecimento do planeta. Já uma forçante negativa representa um estado de resfriamento do clima.

2.4.1 *Black Carbon*

Um dos mais fortes agentes radiativos na atmosfera que contribuem para o aquecimento do sistema climático global são os aerossóis *Black Carbon* (BC), em português carbono negro (KAHNERT, KANNGIEßER 2020). O *Black Carbon* é um aerossol de origem antrópica, principalmente emitido pela queima de biomassa e combustível fóssil. Pode ser encontrado tanto na atmosfera, como no solo, no gelo e em sedimentos. O BC absorve a radiação solar incidente aquecendo a atmosfera e dispersa a luz reduzindo assim a irradiância solar no solo, alterando o perfil vertical de temperatura. A sua vida útil varia de dias a semanas dependendo da meteorologia, sendo passível de transporte de médio e longo alcance.

As partículas de BC são em sua maioria da moda fina ($< 1\mu\text{m}$), sendo assim pequenas o suficiente para serem inaladas e penetrando profundamente o sistema respiratório, causando sérios riscos à saúde humana. Segundo a resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) de 1990, que estabelece os padrões de qualidade do ar, as partículas inaláveis não devem ultrapassar a concentração média anual de $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Um estudo da OMS aponta que a exposição às partículas finas contribui para a mortalidade por doenças pulmonares como asma, doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), câncer de pulmão e até mesmo doenças cardiovasculares, indicando que as partículas afetam os tecidos distantes do local inicial de deposição (J.-S. Im et al., 2001; HIGHWOOD, KINNERSLEY 2006)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada na Base Avançada de Pesquisas do Pantanal (BAPP) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), no Parque SESC Baía das Pedras em Porto Cercado, Poconé – MT. Esta área é composta substancialmente pela vegetação conhecida popularmente como “pombeiro” (*Combretum laxum*), um grande arbusto abundante em solos argilosos.⁶

O clima da região, segundo a classificação climática de Koppen, é do tipo “Aw”, isto é, tropical com estação seca de inverno, com duas estações bem definidas, a seca entre maio e setembro e a chuvosa entre outubro e abril. A precipitação média anual da região é de 1400 mm e a temperatura média anual fica em torno de 26 °C (BIUDES et al., 2015; ALVARES et al., 2013).

3.2 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

3.2.1 Temperatura e Umidade Relativa do Ar

Neste trabalho foram utilizados dados da Temperatura do ar (°C) e Umidade Relativa do ar (%) medidos in situ. O sensor meteorológico utilizado para realizar essas medidas foi um Termohigrômetro modelo HMP 45 C, *Vaisala, Inc., Helsinki, Finland*. Esse instrumento, contém um detector de temperatura de resistência de platina (PRT) e um sensor capacitivo para medir a umidade relativa, onde mede a umidade relativa (UR) na faixa de 0 a 100% e a temperatura do ar (T_a) na faixa de -40 °C a + 60 °C. Os dados meteorológicos foram armazenados em um *Datalogger* modelo CR10X, *Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah*. Os dados coletados foram de janeiro de 2018 a dezembro de 2019.

⁶ Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/812197/1/BP66.pdf>

3.2.2 Concentração de *Black Carbon*

As medidas em tempo real da concentração das partículas de aerossol BC presentes na atmosfera foram realizadas por um Aetalômetro modelo AE33 fabricado pela *Magee Scientific*. Este instrumento opera seguindo um princípio de funcionamento baseado na medida da atenuação óptica de um feixe de luz transmitido através de uma amostra de partículas de aerossóis depositadas em uma fita de filtro de fibra de quartzo. Simultaneamente, detectores sensíveis medem a intensidade da luz transmitida através de uma porção não exposta da fita que serve de referência. A intensidade da luz transmitida diminui gradualmente à medida que o aerossol se acumula na fita. Essa diminuição da intensidade da luz de uma medição para outra é interpretada como um aumento na quantidade de material coletado⁷.

A atenuação óptica é definida da seguinte forma:

$$ATN = 100 \cdot \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad \text{Eq.(4)}$$

Onde I_0 é a intensidade da luz transmitida pelo filtro limpo (sinal de referência) e I a intensidade da luz transmitida após as partículas de aerossol serem depositadas no filtro. (SANDRADEWI et al., 2008). O coeficiente de atenuação das amostras das partículas de aerossol (σ_{ATN}) pode ser calculado usando a variação da atenuação (ΔATN) em função do tempo (Δt), a taxa de fluxo volumétrico (Q) e a área do filtro (A):

$$\sigma_{ATN} = \frac{A}{Q} \cdot \frac{\Delta ATN}{\Delta t} \quad \text{Eq.(5)}$$

O coeficiente de Atenuação é considerado uma razão constante, a relação entre BC e ATN torna-se linear.

A concentração de massa de *Black Carbon*, fornecida pelo Aetalômetro, é determinada da seguinte maneira:

⁷ Disponível em: <https://mageesci.com/mproducts/model-ae33-aethalometer/>

$$[BC]_{ATN} = \frac{\sigma_{ATN}}{\sigma_{1/\lambda}}$$

Eq.(6)

Onde:

$\sigma_{1/\lambda} = 14625/\lambda \text{ [m}^2 \cdot \text{g}^{-1}\text{]}$ é a seção de choque de absorção óptica e $[BC]$ é a concentração de *Black Carbon* [$\mu\text{.g.m}^{-3}$].

Neste instrumento, a atenuação do feixe de luz incidente é medida em sete comprimentos de ondas (370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm e 950 nm). No presente estudo, o comprimento de onda de 880 nm foi usado para encontrar a concentração total de BC, pois neste comprimento de onda o aerossol *Black Carbon* tem absorção máxima e outros aerossóis têm absorção desprezível (TALUKDAR et al., 2015).

3.3 ESTIMATIVA DA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE BRUTSAERT

Brutsaert (1975) foi o primeiro a desenvolver uma parametrização muito utilizada para calcular a radiação de ondas longas descendentes e também a emissividade atmosférica. Essa parametrização é baseada na teoria física da equação de transferência radiativa de Schwarzschild, assumindo condições atmosféricas próximas ao padrão de propriedades emissivas e taxas de lapso da pressão de vapor de água e da temperatura nos 15 km mais baixos da atmosfera, onde emprega algumas suposições simplificadoras para permitir um tratamento analítico (Crawford; Duchon 1999). O modelo de Brutsaert (1975) foi considerado superior a outros modelos em uma série de estudos, por exemplo, Crawford e Duchon (1999) e Shridhar e Elliot (2002) .

A radiação de onda longa de acordo com Brutsaert tem a seguinte forma:

$$L_d = 1,24\sigma T_a^4 (e/T_a)^{\frac{1}{7}}$$

Eq.(7)

Onde:

L_d : Radiação de onda longa emitida pela atmosfera

e : Pressão de vapor de água

T_a : Temperatura do ar

Pela lei de Stefan-Boltzmann, a emissividade atmosférica é dada por:

$$\varepsilon = \frac{E_a}{T_a^4}$$

Eq.(8)

Fazendo a razão entre a energia emitida e absorvida pela atmosfera, obtém-se:

$$\varepsilon = \frac{L_d}{\sigma T_a^4} = 1,24(e/T_a)^{\frac{1}{7}}$$

Eq.(9)

a pressão de vapor de água é calculada pela seguinte equação:

$$e = \frac{UR \cdot e_s}{100}$$

Eq.(10)

Onde:

UR: Umidade relativa do ar

e_s : pressão de saturação de vapor d'água

A equação de Tetens (SAUCIER, 1955) foi utilizada para calcular e_s :

$$e_s = 6,1078 \cdot 10^{(7,5T/237,3+T)}$$

Eq.(11)

Portanto, a emissividade atmosférica pode ser calculada por:

$$\varepsilon = 1,24 \left[\frac{UR \cdot 6,1078 \cdot 10^{(7,5T_a/237,3+T_a)}}{100T_a} \right]^{\frac{1}{7}}$$

Eq.(12)

Logo, tem-se uma equação para a estimativa da emissividade dependente apenas da umidade relativa e da temperatura do ar medidas no local (CURADO, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são discutidos os resultados da análise dos dados obtidos na estação meteorológica da Baía das Pedras.

4.1 VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE *BLACK CARBON*

A variação média mensal da concentração de *Black Carbon* para os anos de 2017, 2018 e 2019 é mostrada na figura 2.

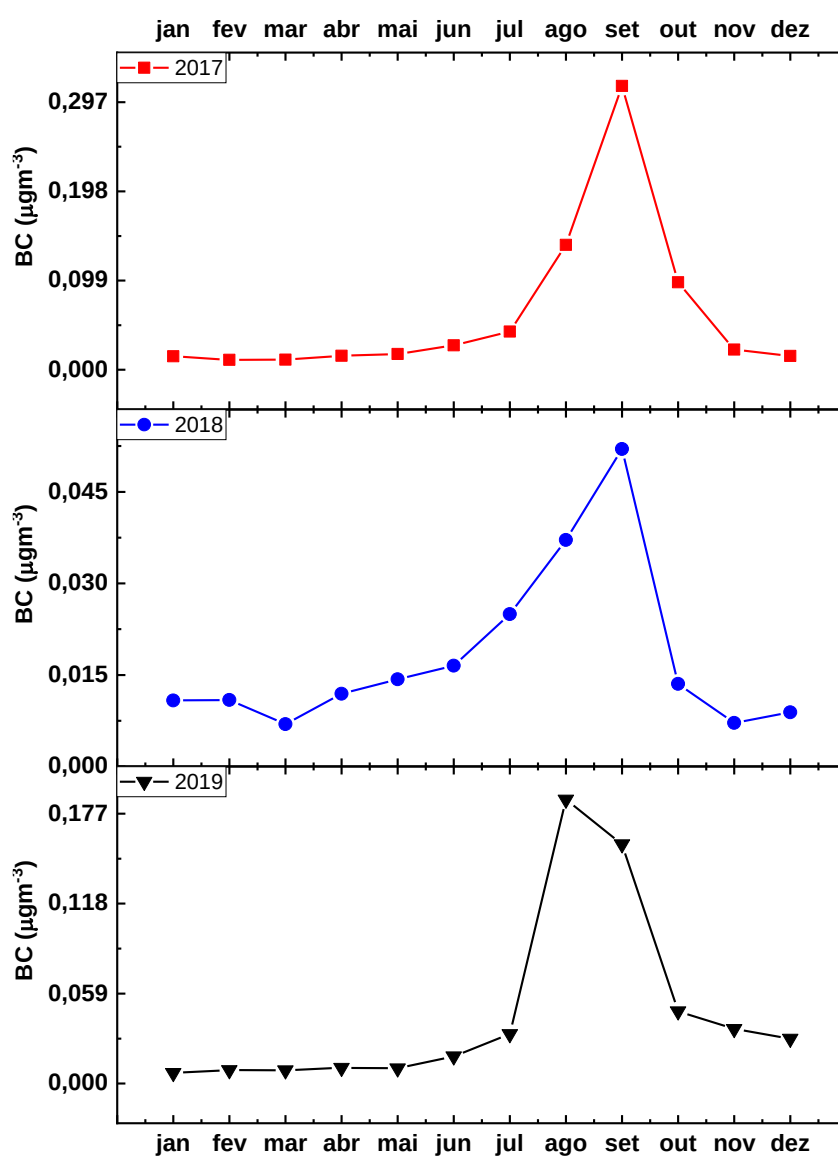


Figura 2- Variação média mensal da concentração de *Black Carbon* (2017-2019). **Fonte:** Elaborado pela autora.

Nos cinco primeiros meses de 2017, observamos que as concentrações de *Black Carbon* se mantiveram praticamente constantes, com valores em torno de $0,01 \mu\text{gm}^{-3}$. A partir de junho ($0,02 \mu\text{gm}^{-3}$) houve um aumento gradual até atingir o pico no mês de setembro ($0,31 \mu\text{gm}^{-3}$). No mês de outubro o valor da concentração de BC caiu para $0,09 \mu\text{gm}^{-3}$ e nos meses seguintes esses valores voltaram a cair para $0,02 \mu\text{gm}^{-3}$ em novembro e $0,01 \mu\text{gm}^{-3}$ em dezembro.

No ano de 2018, observamos um comportamento semelhante ao ano anterior na concentração de *Black Carbon* apesar de a magnitude ser diferente. Nos primeiros meses podemos notar que as concentrações de BC se mantiveram praticamente constantes. Em janeiro, fevereiro, abril, maio e junho a média se manteve em torno de $0,01 \mu\text{gm}^{-3}$. Março foi o mês com a menor concentração de BC, com o valor de $0,006 \mu\text{gm}^{-3}$. A partir do mês de julho os valores começam a subir, de $0,02 \mu\text{gm}^{-3}$ em julho, $0,03 \mu\text{gm}^{-3}$ em agosto e $0,05 \mu\text{gm}^{-3}$ em setembro, o qual foi o mês com maior concentração de BC. Já no mês de outubro a concentração de BC diminuiu para $0,01 \mu\text{gm}^{-3}$ em novembro para $0,007 \mu\text{gm}^{-3}$ e em dezembro para $0,008 \mu\text{gm}^{-3}$.

Um padrão similar aos anos anteriores foi observado no ano de 2019: de janeiro a julho houve sutis variações nas concentrações de BC. Em agosto ($0,18 \mu\text{gm}^{-3}$) houve a maior concentração de BC, seguido de setembro ($0,15 \mu\text{gm}^{-3}$). A partir do mês de outubro as concentrações de BC começaram a diminuir gradativamente. As concentrações médias anuais do período estudado foram respectivamente: $0,063 \mu\text{gm}^{-3}$, $0,017 \mu\text{gm}^{-3}$ e $0,045 \mu\text{gm}^{-3}$. É interessante notar que houve uma redução na concentração de *Black Carbon* de 2017 para 2018, de aproximadamente 72 %. Em 2019 a concentração de BC volta a subir, mas ainda é menor que a concentração de BC 2017.

Nos três anos estudados podemos notar que há um padrão sazonal na variação média das concentrações de *Black Carbon*. As concentrações de BC são mais altas no período seco (maio a setembro) do que no período chuvoso (entre outubro e abril) sendo que os meses de agosto e setembro se destacam como os meses que apresentam as mais altas concentrações de *Black Carbon* em comparação com os outros. A concentração média de BC no período seco foi aproximadamente 67% maior que a média de todo período estudado, ao passo que a concentração de BC no período chuvoso foi aproximadamente 52% abaixo da média geral.

Variações sazonais semelhantes foram observadas por outros estudos. Por exemplo, SANTOS et al., 2014, utilizando técnicas de gravimetria e refletância, entre abril de 2012 e agosto de 2013, na região do pantanal, encontraram uma concentração máxima de *Black Carbon* de $0,189 \mu\text{gm}^{-3}$ no mês de setembro de 2012.

As concentrações de *Black Carbon* são influenciadas pelas fontes antropogênicas (SHARMA et al., 2018) e pelas condições meteorológicas do local. Alguns estudos (DUMKA et al., 2018; MAGALHÃES NETO et al., 2017) apontam que a emissão de BC, proveniente de fontes antropogênicas, em escala global, é atribuída à combustão de biocombustíveis (~20%), combustíveis fósseis (~40%) e à queima aberta de biomassa, que inclui incêndios florestais e queima de resíduos agrícolas (~40%). Essas frações variam dependendo se a área for urbana ou rural. As emissões veiculares dominam em ambientes urbanos e a queima de biomassa em áreas rurais. Esta alta concentração de BC sugere que o ar está principalmente poluído pelas atividades antrópicas.

Uma prática comum no Pantanal de Mato Grosso, é o uso do fogo para limpar pastagens, limpar áreas agrícolas e expandir as fronteiras da pecuária. Na Figura 3, observa-se o monitoramento dos Focos de Queimadas na região do Pantanal, para os anos de 2017 a 2019, através dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

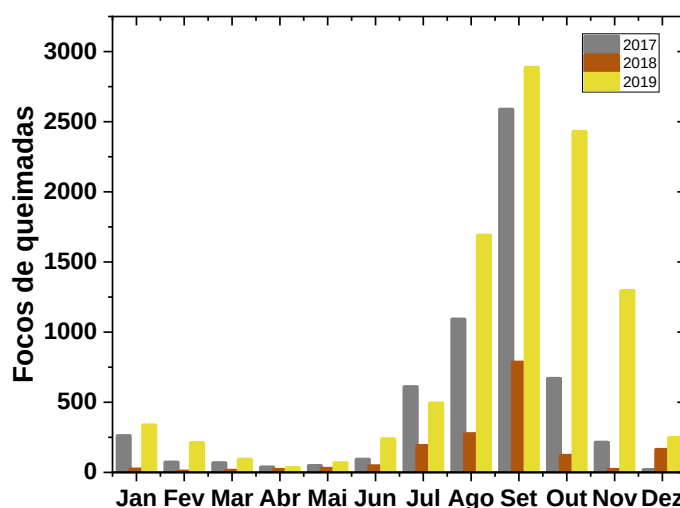


Figura 3-Monitoramento dos focos de queimadas no Pantanal (2017-2019). **Fonte:** Elaborado pela autora.

Observa-se que durante os meses da estação seca, em especial agosto e setembro, quando a incidência de chuvas é muito menos frequente, as contagens dos

focos de queimadas são elevadas. À medida que os focos de queimadas reduzem, os valores da concentração de BC diminuem.

4.1.1 Relação do BC com as variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas e as mudanças sazonais, influenciam fortemente as concentrações de BC do local. A figura 4 mostra a variação dos parâmetros meteorológicos como a temperatura e a umidade relativa do ar. Devido à falta de dados para o ano de 2017, considerando a temperatura e umidade relativa do ar, as análises foram feitas apenas para o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2019.

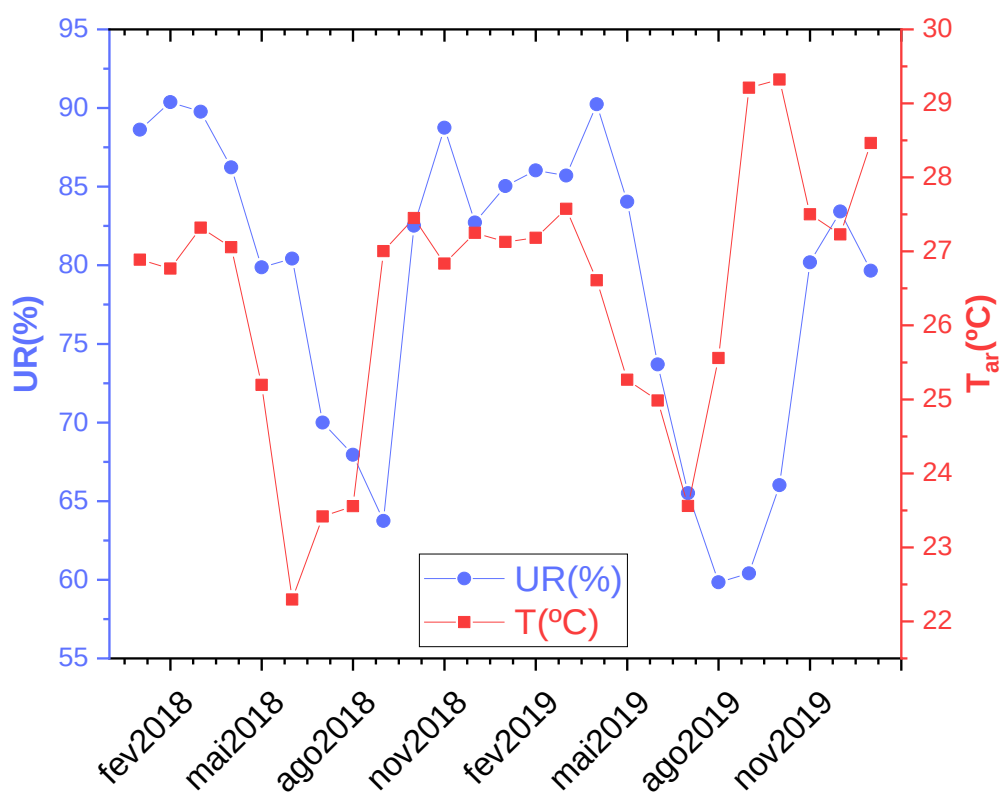


Figura 4-Variação média mensal da temperatura e umidade relativa do ar para os anos de 2018 e 2019. **Fonte:** Elaborado pela autora.

A temperatura do ar, assim como a umidade relativa apresentaram variações sazonais. No ano de 2018, a média da temperatura do ar oscilou entre 22,29 °C no mês de junho e 27,45 °C no mês de outubro. A média da temperatura do ar do período chuvoso e seco foram respectivamente, 27,08 °C e 24,28 °C. No ano de 2019, a média da temperatura do ar ficou entre 23,55 °C no mês de julho e 29,32 °C no mês de outubro. Na estação chuvosa a média foi de 27,35 °C e na estação seca 25,69 °C.

A umidade relativa ficou entre 63,73% em setembro e 90,37% em fevereiro no ano de 2018, sendo a média do período chuvoso 86,94% e do período seco 72,40 %. Em 2019 a média da umidade relativa variou entre 59,83% em agosto e 90,24% em abril. O período chuvoso apresentou uma média de 84,17% e o período seco 68,74% da umidade relativa do ar.

Para uma melhor compreensão da relação entre as variáveis meteorológicas e a concentração de BC, foram plotados gráficos de correlação linear da temperatura do ar e da umidade relativa do ar com a concentração de BC.

Ao analisar o gráfico de dispersão entre a T_{ar} ($^{\circ}C$) e a concentração de BC (figura 5a), observa-se que ambos estão fracamente correlacionados, ou seja, $R = 0,275$. Por outro lado, há uma forte correlação negativa entre a UR e a concentração de BC, $R = -0,759$ (figura 5b) indicando que a alta umidade relativa durante a estação chuvosa favorece a deposição úmida das partículas de BC, e a baixa UR durante o período seco inibe a eliminação das partículas, contribuindo assim para a alta concentração de BC (NEGI et al., 2019). Estudos anteriores de várias partes do mundo apresentam resultados semelhantes. Por exemplo: um estudo realizado na encosta Sul do Himalaia ocidental da Índia, em 2016 e outro realizado em Karichi no Paquistão, de 2006 a 2008, também encontraram uma correlação negativa entre a UR e a concentração de BC (PANDEY et al., 2020).

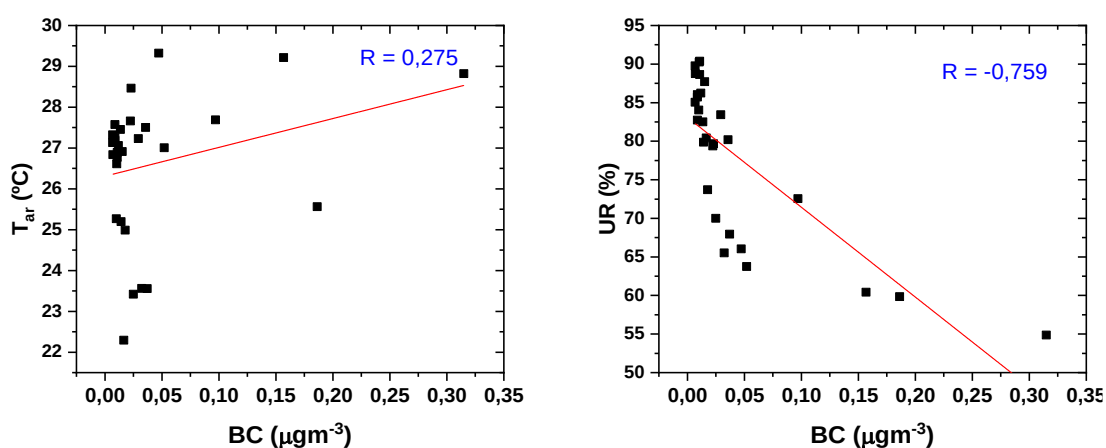


Figura 5- a) correlação entre a temperatura do ar e a concentração de Black Carbon. b) Correlação entre a umidade relativa do ar e a concentração de Black Carbon. **Fonte:** elaborado pela autora.

4.2 VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA

No gráfico abaixo, figura 6, são plotadas as médias mensais da emissividade atmosférica, estimada a partir da equação de Brutsaert, para o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2019.

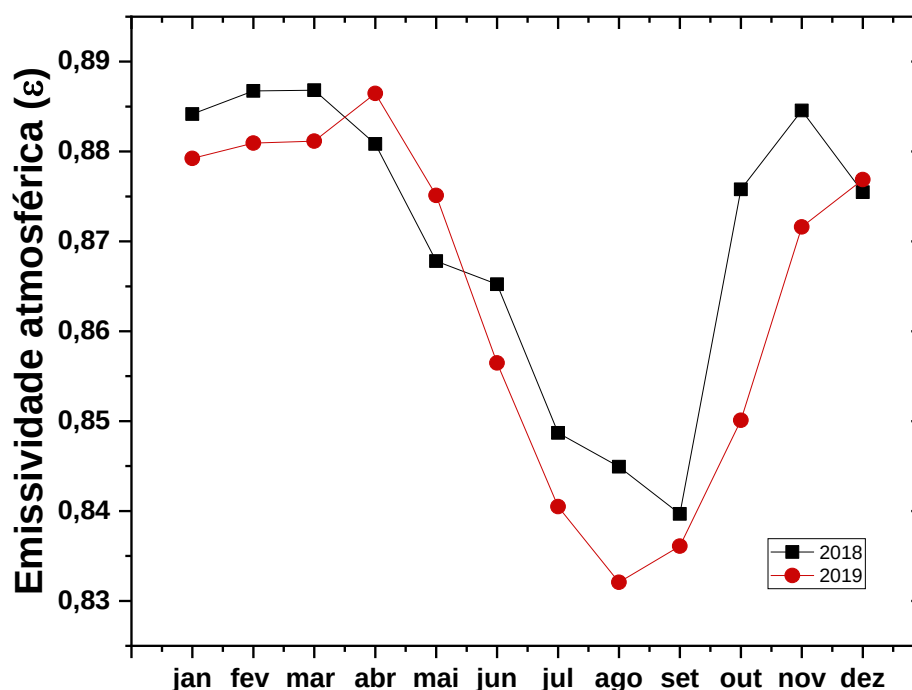


Figura 6-Variação média mensal da emissividade atmosférica para os anos de 2018 e 2019.

Fonte: Elaborada pela autora.

No ano de 2018 a média mensal da emissividade atmosférica (adimensional) oscilou entre aproximadamente 0,88 e 0,83. Os meses chuvosos tiveram os maiores valores da emissividade atmosférica em comparação com os meses do período seco. Setembro registrou o menor valor da emissividade atmosférica.

Em 2019 observa-se um padrão de comportamento semelhante ao ano anterior. O valor da emissividade atmosférica variou de 0,88 a 0,83, sendo agosto o mês com o menor valor da emissividade atmosférica.

A variação sazonal da emissividade atmosférica está representada nas figuras 7 e 8.

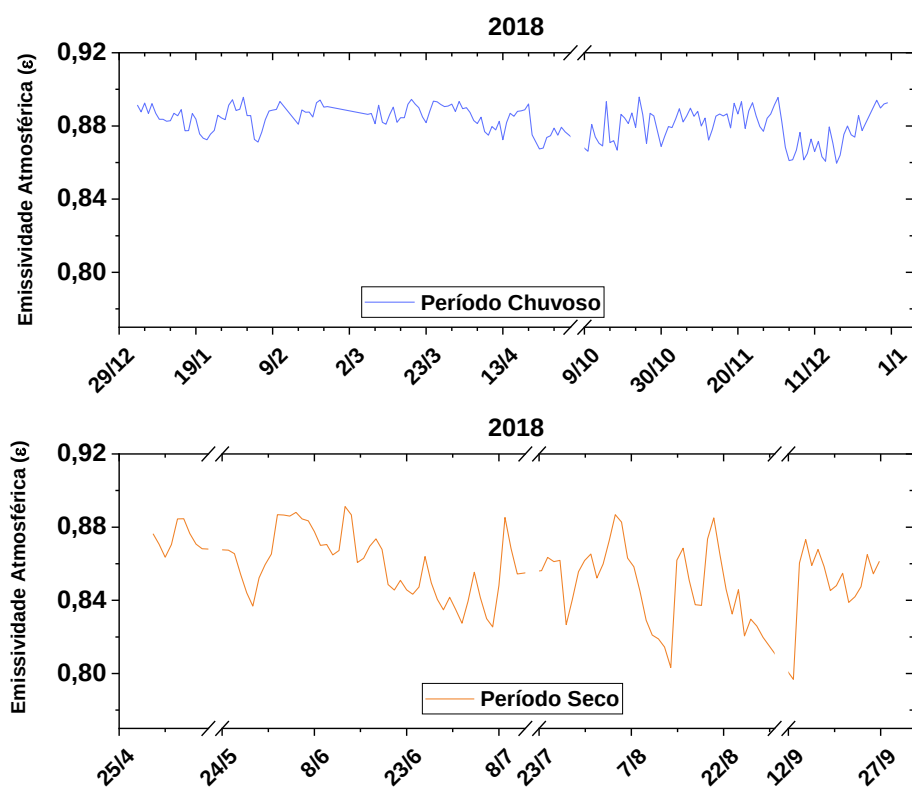


Figura 7-Variação sazonal da emissividade atmosférica para o ano de 2018. **Fonte:** elaborada pela autora.

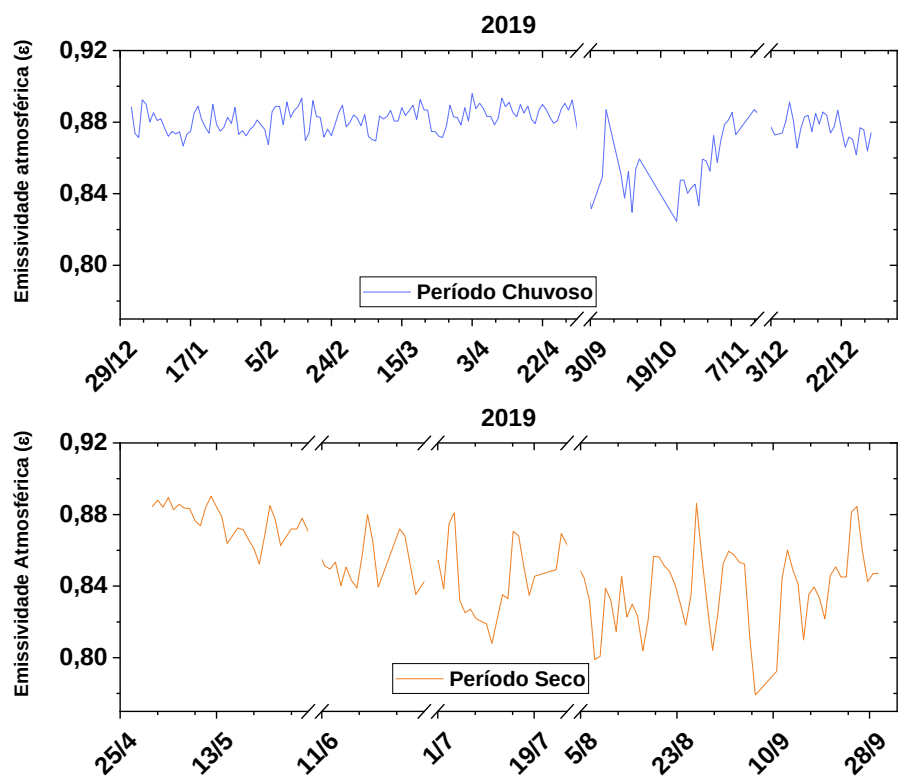


Figura 8-Variação da sazonal da emissividade atmosférica para o ano de 2019. **Fonte:** Elaborada pela autora.

No período chuvoso do ano de 2018, a emissividade atmosférica apresentou sutis variações. As médias diárias oscilaram entre aproximadamente 0,86 e 0,89. Já no período seco as variações foram mais acentuadas, ficando entre 0,79 e 0,88. A média do período chuvoso foi de 0,88 e a média do período seco foi 0,85. O período chuvoso de 2019 registrou a média de 0,87 e a média do período seco foi de 0,84.

A variação sazonal da emissividade atmosférica mostra-se coerente com outros estudos. Curado (2011) estimou a emissividade atmosférica através da equação de Brutsaert, no Pantanal Mato-Grossense, no período de janeiro a setembro de 2008. Obteve uma média de 0,88 para a estação chuvosa e 0,82 para a estação seca. Silva et al., 2019 analisaram o desempenho de vários métodos para estimar a emissividade atmosférica, incluindo o modelo de Brutsaert, para a região do Cerrado Campo Sujo, na baixada Cuiabana, os valores oscilaram de 0,80 à 0,91 para o ano de 2009. Outro estudo realizado em Santo Antônio do Leverger, Mendonça (1996), durante a estação seca de 1994, obteve uma média diária de emissividade atmosférica de 0,85.

A estimativa da emissividade atmosférica, conforme retratado na equação 12, depende da umidade relativa e da temperatura do ar, logo, espera-se que as variações da emissividade atmosférica acompanhem as variações da temperatura do ar e da umidade relativa.

Os valores mais altos da emissividade atmosférica são observadas durante a estação chuvosa, em comparação com o período seco, indicando que no período chuvoso a eficiência de emissão da radiação pela atmosfera é maior que no período seco. Na estação chuvosa o teor de umidade relativa do ar, que indica a quantidade de vapor de água presente na atmosfera, é mais elevado. O vapor de água desempenha um papel fundamental na atmosfera, principalmente como fonte de precipitação e formação de nuvens (GURBUZ, 2021). Devido a isto a estação chuvosa do Pantanal Mato-Grossense é marcada por grande nebulosidade. As nuvens são fortes absorvedoras da radiação de ondas longas ocasionando assim o aumento da temperatura do ar (QUERINO, 2016), o que implica nos valores mais altos da emissividade atmosférica neste período.

Outro ponto importante é que o vapor de água é um agente termorregulador, devido a isso as variações de temperatura foram mais sutis e consequentemente a

variação da emissividade atmosférica no período chuvoso foi sutil ao passo que no período seco as variações foram mais bruscas.

4.3 EMISSÃO DE ENERGIA DA ATMOSFERA

A variação média mensal da emissão atmosférica para os anos de 2018 e 2019 é mostrada na figura 9. Observa-se um comportamento padrão nos dois anos estudados, apresentando os maiores valores durante a estação chuvosa e os menores durante a estação seca, o que era esperado visto que a emissão atmosférica depende da emissividade atmosférica, portanto suas variações acompanham as variações da emissividade atmosférica (CURADO, 2013). No ano de 2018 as variações da emissão atmosférica oscilaram entre $371,29 \text{ W.m}^{-2}$ no mês de agosto e $409,84 \text{ W.m}^{-2}$ no mês de março. Em 2019 a média mensal oscilou entre $369,35 \text{ W.m}^{-2}$ no mês de julho e $408,61 \text{ W.m}^{-2}$ no mês de março.

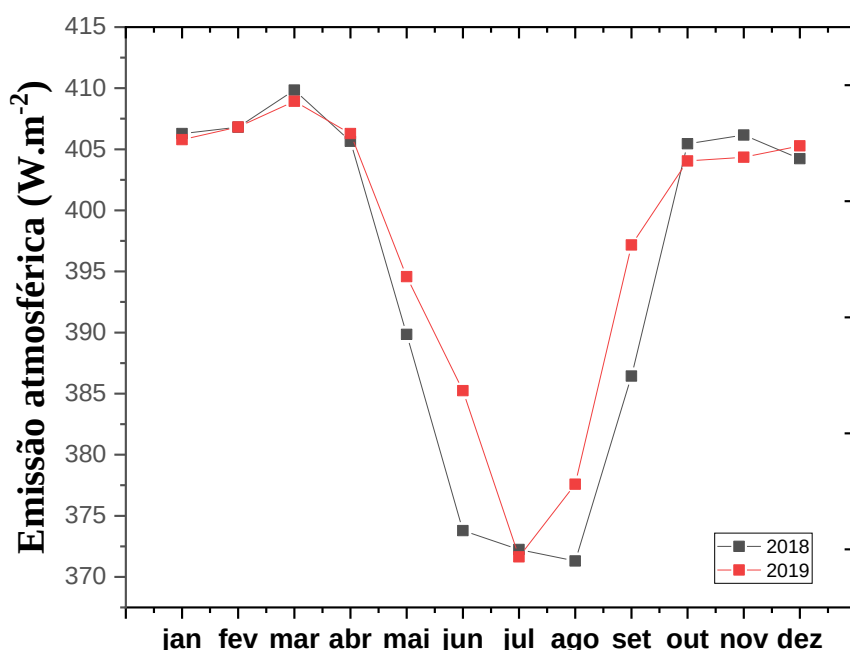


Figura 9-Variação média mensal da emissão atmosférica para os anos de 2018 e 2019.

Fonte: Elaborada pela autora.

As variações sazonais da emissão atmosférica são mostradas nas figuras 10 e 11 respectivamente. Observa-se que no período seco as variações são mais acentuadas ao passo que no período chuvoso as variações são mais suaves.

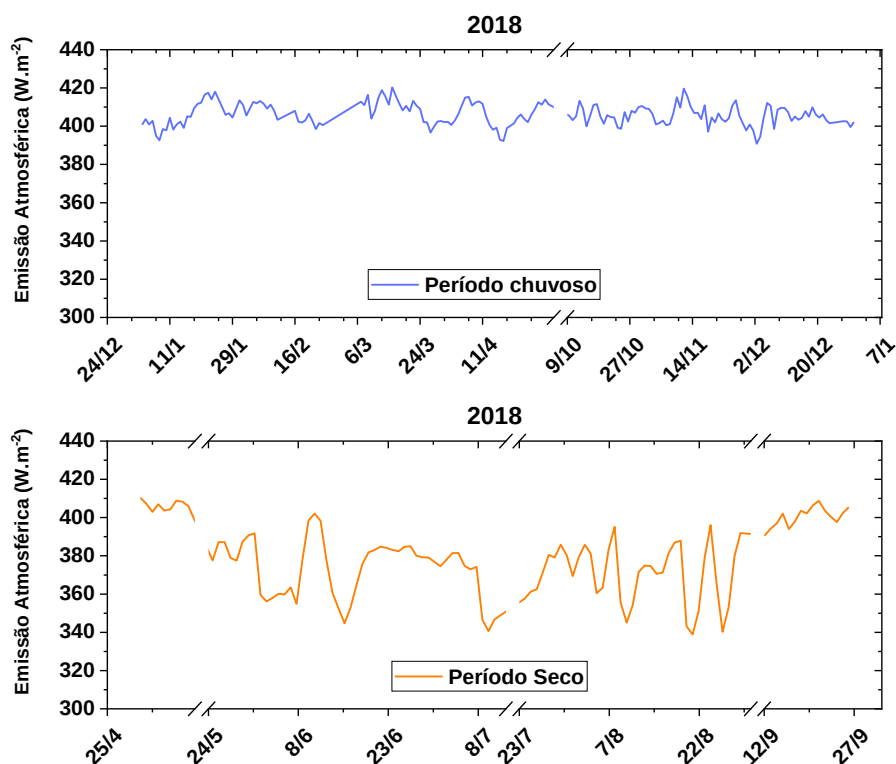


Figura 10-Variação sazonal da emissão atmosférica para o ano de 2018. **Fonte:** Elaborado pela autora.

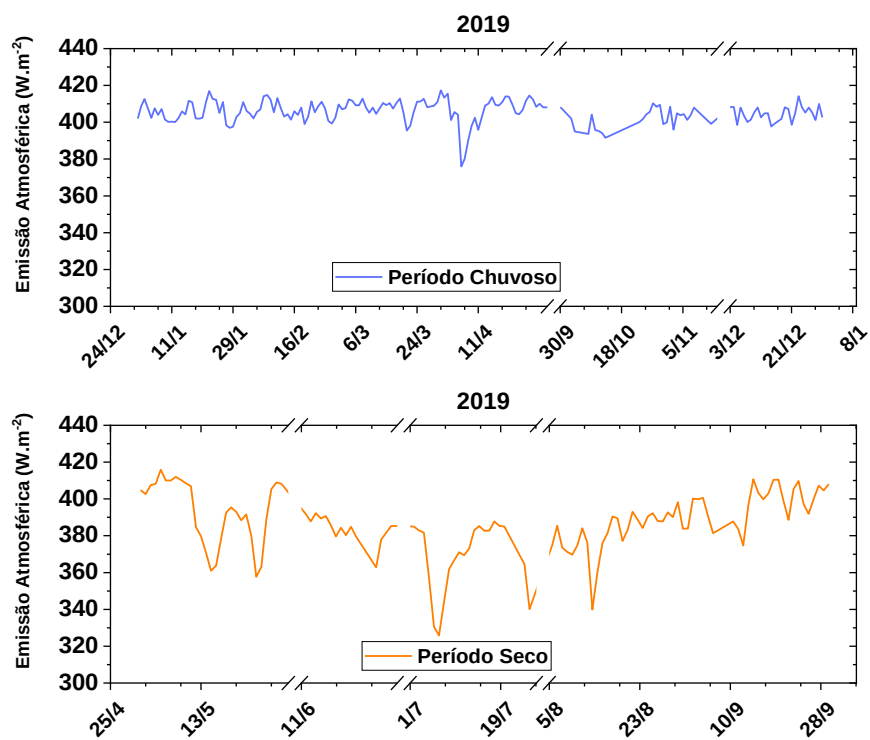


Figura 11- Variação sazonal da emissão atmosférica para o ano de 2019. **Fonte:** Elaborada pela autora.

4.4 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE *BLACK CARBON* NA EMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA

A fim de compreender a influência da concentração de *Black Carbon* na emissividade atmosférica do Pantanal Mato-Grossense obtida através da equação de Brutsaert, analisamos a variação de uma variável em relação a outra e também a correlação entre essas duas variáveis.

As figura 12 e 13 exibem a variação da concentração de *Black Carbon* em relação a emissividade atmosférica. Observa-se que as duas variáveis exibem padrões de variações contrárias em todo o período estudado.

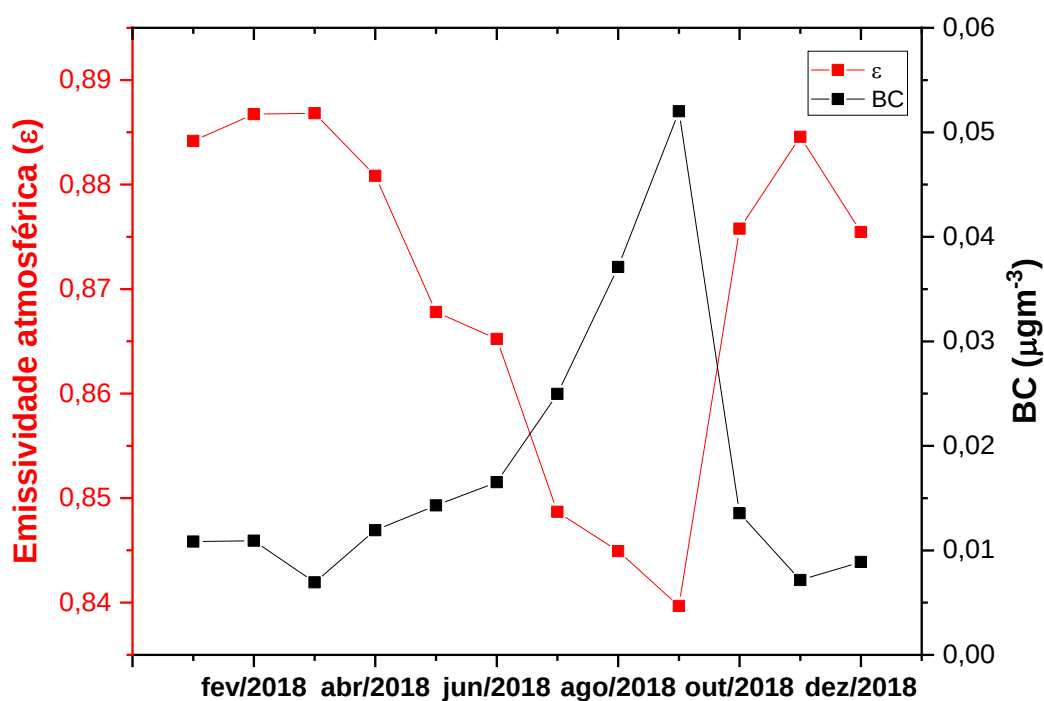


Figura 12- Variação da concentração de *Black Carbon* em relação a emissividade atmosférica para o ano de 2018. **Fonte:** Elaborada pela autora.

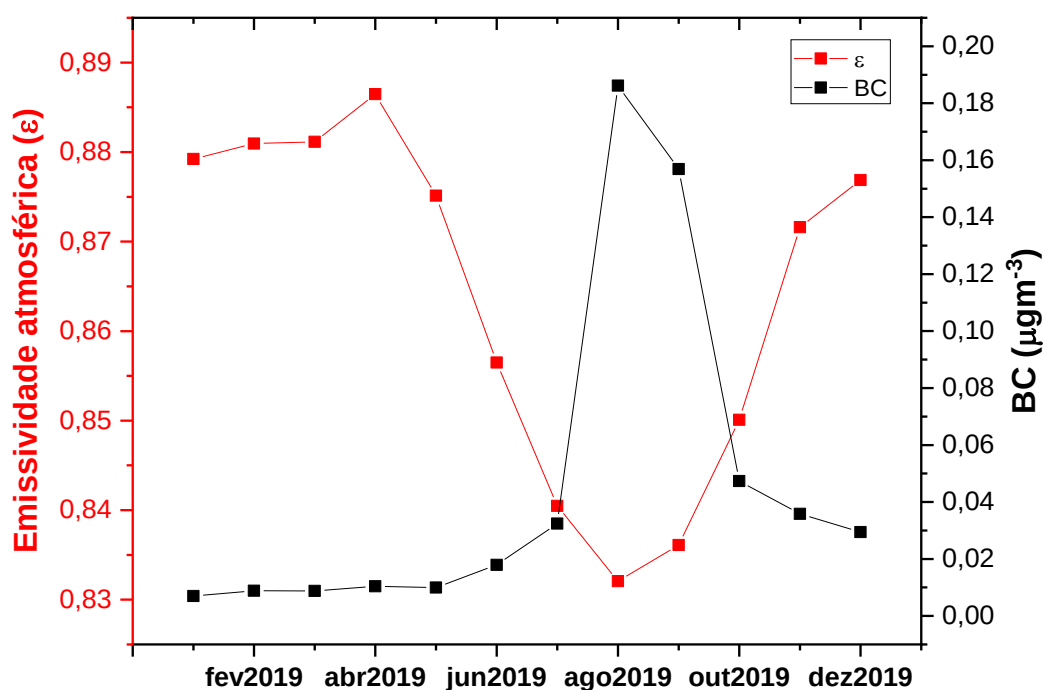


Figura 13-Variação da concentração de *Black Carbon* em relação a emissividade atmosférica para o ano de 2019. **Fonte:** Elaborada pela autora.

As figura 14 e 15 mostram a correlação entre a concentração de BC e a emissividade atmosférica.

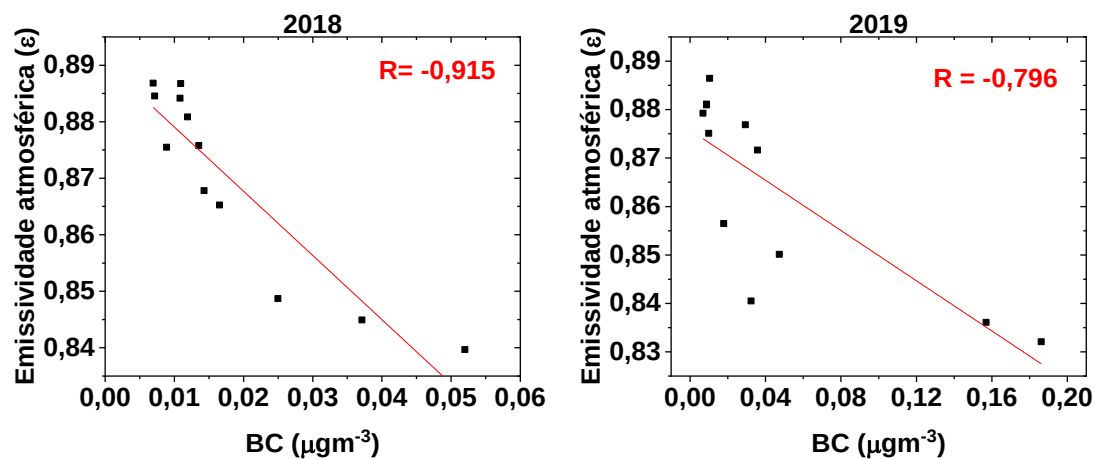


Figura 14-Correlação entre a concentração de *Black Carbon* e a emissividade atmosférica para os anos de 2018 e 2019 respectivamente. **Fonte:** Elaborada pela autora.

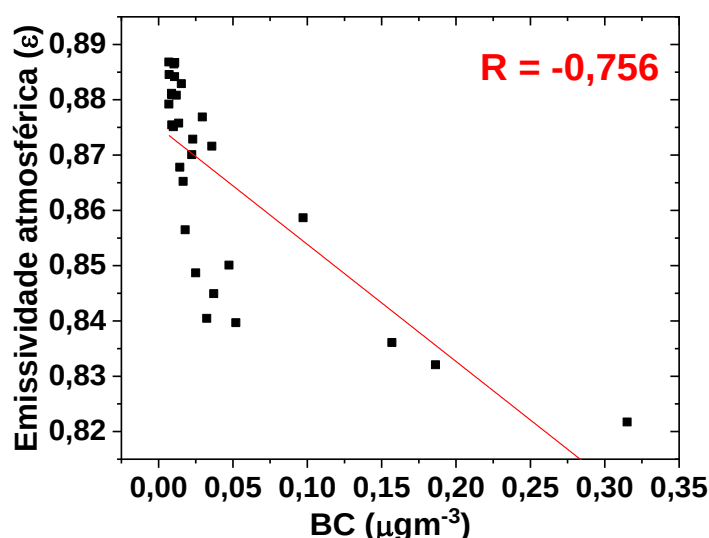


Figura 15-Correlação entre a concentração de *Black Carbon* e a emissividade atmosférica para todo o período estudado. **Fonte:** Elaborada pela autora.

Uma forte correlação linear negativa entre as concentrações de BC e a emissividade atmosférica pode ser encontrada com um valor de $R = -0,915$ para o ano de 2018, $R = -0,796$ para o ano de 2019 e $R = -0,756$ para todo o período.

Uma possível explicação para esses resultados é o fato de que os aerossóis estão fortemente associados ao ciclo hidrológico, funcionam como núcleo de condensação de nuvens (NCN), podem modificar as suas propriedades microfísicas, suas propriedades radiativas, a cobertura total das nuvens e o seu ciclo de vida (ARTAXO et al., 2009; FORSTER et al., 2007; GULERIA; KUNIAL, 2019).

Durante a estação seca, devido a significativa emissão de queimadas no Pantanal Mato-Grossense, a estrutura das nuvens é modificada pela presença de *Black Carbon* (SANTOS, 2016). O aumento da concentração de *Black Carbon*, causa um aquecimento nas camadas atmosféricas, já que as partículas são fortes absorvedoras da radiação solar. Esse aquecimento traz como consequência uma camada atmosférica mais estável e seca, pois a umidade disponível no ar se distribui entre as partículas, podendo causar a diminuição e evaporação da nuvem inibindo assim a precipitação (GRIMM et al., 2012; JIN et al., 2005; ANDREAE et al., 2004). Por conta do fator de redução da umidade e consequentemente das nuvens pelo aumento da concentração de *Black Carbon* a emissividade atmosférica é menor. Já no período chuvoso, com alto teor de umidade e baixa concentração de BC a emissividade é maior.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo, foram realizadas medidas das concentrações do aerossol *Black Carbon* (2017, 2018 e 2019), e das variáveis meteorológicas Temperatura do ar e Umidade Relativa do ar (2017 e 2018) na Base Avançada de Pesquisas do Pantanal (BAPP) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), localizada no Parque SESC Baía das Pedras em Porto Cercado, Poconé – MT. Variações médias mensais e sazonais foram calculadas. Utilizou-se os dados da temperatura e umidade relativa do ar para estimar a emissividade atmosférica pela equação de Brutsaert, e esta última para estimar a emissão atmosférica através da lei de Stefan-Boltzmann.

Através da análise das concentrações de BC foi possível observar que as mesmas variaram sazonalmente no Pantanal Mato-Grossense. As maiores concentrações de BC foram observadas no período seco (maio a setembro) justamente quando as emissões provenientes da queima de biomassa aumentam significativamente na região (SANTOS,2016).

As concentrações de BC foram correlacionadas com as variáveis meteorológicas. Os resultados obtidos mostraram que a concentração de BC e a temperatura do ar possuem uma fraca correlação, ou seja, $R = 0,275$, ao passo que a concentração de BC e a Umidade Relativa possuem uma forte correlação negativa, ou seja, $R = -0,759$.

As variações sazonais da emissividade atmosférica e da emissão atmosférica, apresentaram os menores valores na estação seca e os maiores valores na estação chuvosa, indicando que o alto teor de umidade na atmosfera durante a estação chuvosa, faz com que a atmosfera tenha maior eficácia de emissão da radiação nessa época do ano devido ao vapor de água ser um forte absorvedor da radiação de ondas longas (CURADO et al.,2011).

As variações da concentração de BC e da emissividade atmosférica foram correlacionadas. Os resultados mostraram que as duas variáveis estão negativamente correlacionadas.

6 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDREAE, Meinrat O. et al. Smoking rain clouds over the Amazon. **science**, v. 303, n. 5662, p. 1337-1342, 2004.

ÅNGSTRÖM, Anders Knutsson. **A study of the radiation of the atmosphere: based upon observations of the nocturnal radiation during expeditions to Algeria and to California**. Smithsonian Institution, 1915.

ARTAXO, Paulo et al. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 1-22, 2006.

BIBI, Samina et al. Temporal variation of Black Carbon concentration using Aethalometer observations and its relationships with meteorological variables in Karachi, Pakistan. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 157, p. 67-77, 2017.

BIUDES, Marcelo Sacardi et al. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 202, p. 112-124, 2015.

BRUNT, David. Notas sobre radiação na atmosfera. I. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 58, n. 247, pág. 389-420, 1932.

BRUTSAERT, Wilfried. Em uma fórmula derivável para radiação de ondas longas de céus limpos. **Pesquisa de recursos hídricos**, v. 11, n. 5, pág. 742-744, 1975.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) - Resolução Nº 003/1990. **Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR**. Diário Oficial da União. 22 de agosto de 1990.

CRAWFORD, Todd M.; DUCHON, Claude E. An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 4, p. 474-480, 1999.

CURADO, L. F. A. **Estimativa sazonal da emissividade atmosférica no Pantanal Mato-Grossense**. 2011. 68p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

CURADO, L.F.A. **Estudo da inter-sazonalidade do fluxo de calor latente e sensível no Cerrado-Pantanal de Mato Grosso**. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

CURADO, Leone Francisco Amorim et al. **Estimativa sazonal da emissividade atmosférica através da Equação de Brutsaert no norte do Pantanal Mato-grossense**. *Ciência e Natura*, v. 33, n. 2, p. 167-180, 2011.

DA SILVA CARDOZO, Francielle et al. **Estimativa do impacto das queimadas e emissão dos gases do efeito estufa no Bioma Pantanal em 2010**. 2010

DA SILVA, João Dos Santos Vila; DE MOURA ABDON, Myrian. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 33, n. 13, p. 1703-1711, 1998.

DONATELLI, Reginaldo José et al. **Efeitos do fogo sobre comunidades de aves no Pantanal Mato-Grossense**. 2014.

DUMKA U.C., KRISHNA MOORTHY K., KUMAR R., HEDGE P., SAGAR R, PANT P., SINGH N., SURESH BABU S. Characteristics of aerosol *Black Carbon* mass concentration over a high altitude location in the Central Himalayas from multi-year measurements, *Atmospheric Research*, Volume 96, Issue 4, 2010, Pages 510-521.

DUMKA, U. C. et al. Assessment of biomass burning and fossil fuel contribution to *Black Carbon* concentrations in Delhi during winter. *Atmospheric Environment*, v. 194, p. 93-109, 2018.

FORSTER, Piers et al. Mudanças nos constituintes atmosféricos e no forçamento radiativo. Capítulo 2. In: **Climate Change 2007. The Physical Science Basis** . 2007

GRIMM, A. M.; SAMPAIO, G.; VON RANDOW, C.; REBELLO, E. R. G.; LACERDA, F. F.; DINIZ, F. de A. et al. Observações ambientais atmosféricas e de propriedades da superfície In: PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Grupo de Trabalho 1 - Base Científica das Mudanças

Climáticas. **Primeiro relatório de avaliação nacional sobre mudanças climáticas**. 2012.

GURBUZ, Gokhan. Sobre as variações do vapor de água precipitável decadal (PWV) sobre a Turquia. **Advances in Space Research**, 2021.

HIGHWOOD, Eleanor J.; KINNERSLEY, Robert P. When smoke gets in our eyes: The multiple impacts of atmospheric *Black Carbon* on climate, air quality and health. **Environment international**, v. 32, n. 4, p. 560-566, 2006.

IDSO, Sherwood B.; JACKSON, Ray D. Radiação térmica da atmosfera. **Journal of geophysical Research**, v. 74, n. 23, pág. 5397-5403, 1969.

IM, J.-S.; SAXENA, V. K.; WENNY, B. N. Temporal trends of *Black Carbon* concentrations and regional climate forcing in the southeastern United States. **Atmospheric Environment**, v. 35, n. 19, p. 3293-3302, 2001.

JIN, Menglin; SHEPHERD, J. Marshall; KING, Michael D. Urban aerosols and their variations with clouds and rainfall: A case study for New York and Houston. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D10, 2005.

KAHNERT, Michael; KANNGIEßER, Franz. Modelling optical properties of atmospheric *Black Carbon* aerosols. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 244, p. 106849, 2020.

KUNIYAL, Jagdish Chandra; GULERIA, Raj Paul. The current state of aerosol-radiation interactions: a mini review. **Journal of Aerosol Science**, v. 130, p. 45-54, 2019.

MAGALHÃES NETO, Newton de et al. Contribuição das queimadas na América do Sul para o derretimento das geleiras andinas: estudo de caso sobre o impacto do aerossol" *Black Carbon*" na geleira Zongo-Bolívia. 2017.

Mato-Grossense. 2011. 68p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto

MENDONÇA, Enicildo Del Duccas. **Estimativa da emissividade atmosférica em Santo Antônio do Leverger-MT**. 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NEGI, Pyar S.; PANDEY, Chhavi P.; SINGH, Narendra. *Black Carbon aerosols in the ambient air of Gangotri Glacier valley of north-western Himalaya in India. Atmospheric Environment*, v. 214, p. 116879, 2019.

PEREIRA, A.R.; Angelocci, L.R.; Sentelhas, P.C. *Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas*. Apostila. USP/ESALQ, 2007, 192 p.

PRATA, AJ Uma nova fórmula de onda longa para estimar a radiação de céu claro para baixo na superfície. *Jornal Trimestral da Royal Meteorological Society*, v. 122, n. 533, pág. 1127-1151, 1996.

QUERINO, CAS. Estimativa da Radiação de Onda Longa Atmosférica horária no estado de Mato Grosso. 2016 Tese (Doutorado em Física Ambiental) Universidade Federal de Mato Grosso. **Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, Mato Grosso**, 2016.

RAMACHANDRAN, S.; KEDIA, Sumita. Aerosol radiative effects over an urban location and a remote site in western India: seasonal variability. *Atmospheric environment*, v. 45, n. 39, p. 7415-7422, 2011.

SANDRADEWI, J. et al. A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer. *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 1, p. 101-112, 2008.

SANTOS, Anna Carolinna Albino et al. **Caracterização de aerossóis no Pantanal Mato-Grossense**. 2014.

SANTOS, S. A. et al. Plantas invasoras no pantanal: Como entender o problema e soluções de manejo por meio de diagnóstico participativo. **Embrapa Pantanal-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2006.

SAUCIER, Walter J. **Principles of meteorological analysis**. Chicago, Ill.: University of Chicago Press, 1955.

SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N. **Química e física atmosférica: da poluição do ar às mudanças climáticas**. John Wiley & Sons, 2016.

SHARMA, Milap Chand et al. Seasonal characteristics of *Black Carbon* aerosol mass concentrations and influence of meteorology, New Delhi (India). **Urban climate**, v. 24, p. 968-981, 2018.

SILVA, Jonh Billy et al. Evaluation of methods for estimating atmospheric emissivity in Mato-Grossense Cerrado. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 3, 2019.

SRIDHAR, V.; ELLIOTT, Ronald L. Sobre o desenvolvimento de um esquema simples de radiação de onda longa para baixo. **Meteorologia Agrícola e Florestal**, v. 112, n. 3-4, pág. 237-243, 2002.

SRIVASTAVA, A. “COVID-19 and air pollution and meteorology-an intricate relationship: A review.” *Chemosphere Volume 263* (Janeiro) 2021.

SWINBANK, W. CQJR. Radiação de ondas longas de céus limpos. **Jornal Trimestral da Royal Meteorological Society**, v. 89, n. 381, pág. 339-348, 1963.

TALUKDAR, Shamitaksha et al. Characteristics of *Black Carbon* concentration at a metropolitan city located near land–ocean boundary in Eastern India. **Atmospheric Research**, v. 153, p. 526-534, 2015.

Varejão-Silva, M. A.; **Meteorologia e Climatologia**, Versão Digital 2, Recife, 2006

ZHANG, Hua et al. Establishment of high-resolution aerosol parameterization and its influence on radiation calculations. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 243, p. 106802, 2020.