



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

PAULO ANTUNES DIAS PEREIRA CALADO

DISSERTAÇÃO:

**Validação dos dados da espessura ótica dos Aerossóis dos
sensores MODIS e OMI e do modelo MERRA-2 através dos dados
observados da AERONET**

Maceió – AL
Outubro de 2021

PAULO ANTUNES DIAS PEREIRA CALADO

DISSERTAÇÃO

**Validação dos dados da espessura ótica dos Aerossóis dos sensores
MODIS e OMI e do modelo MERRA-2 através dos dados observados da
AERONET**

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia, área da Poluição Atmosférica.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano
Coorientador: Prof. Dr. Helber Barros Gomes

Maceió – AL
Outubro de 2021

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C141v Calado, Paulo Antunes Dias Pereira.
Validação dos dados da espessura ótica dos aerossóis dos sensores MODIS e OMI e do modelo MERRA-2 através dos dados observados da AERONET / Paulo Antunes Dias Pereira Calado. – 2021.
89 f. : il.

Orientador: Glauber Lopes Mariano.
Coorientador: Helber Barros Gomes.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.
Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió.

Bibliografia: f. 78-89.

1. Sensoriamento remoto. 2. Espessura ótica. 3. Aerossóis. I. Título.

CDU: 528.8



ATA DE APRESENTAÇÃO PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos oito dias do mês de outubro do ano de dois mil e vinte e um, às nove horas, por Videoconferência, Campus A. C. Simões da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), perante a Banca Examinadora composta pelo Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano– Orientador, Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes- Membro Interno, Prof. Dra. Ericka Voos Chagas Mariano - Membro Externo ao Programa e Prof. Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias- Membro Externo-, o senhor ***Paulo Antunes Dias Pereira Calado*** sob a orientação do Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano–, apresentou publicamente, uma dissertação intitulada: “**VALIDAÇÃO DOS DADOS DA ESPESSURA ÓTICA DOS AEROSSÓIS DOS SENSORES MODIS e OMI E DO MODELO MERRA-2 ATRAVÉS DOS DADOS OBSERVADOS DA AERONET.**” número de série, **MET-UFAL-MS-184** como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Meteorologia, área de concentração: Processos de Superfície Terrestre. Após a apresentação, e, seguindo o regimento do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFAL no seu Artigo 19, a Banca Examinadora considerou o ***Paulo Antunes Dias Pereira Calado*** *aprovado*. Ainda de acordo com o parágrafo único do Artigo 19, o Diploma de Mestre em Meteorologia - área de concentração Processos de Superfície Terrestre será expedido a requerimento do concluinte, anexado a no mínimo 07 (sete) cópias da versão definitiva da dissertação, satisfeitas as modificações indicadas pelos relatores e Banca Examinadora. Eu, Fabrício Daniel dos Santos Silva, Coordenador do Curso de Mestrado em Meteorologia da UFAL, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos componentes da Banca Examinadora.

Maceió-AL, 08 de outubro de 2021.

Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva
(Coordenador)

Documento assinado digitalmente



Glauber Lopes Mariano
Data: 11/10/2021 11:04:44-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano
(Orientador)

Documento assinado digitalmente



Helber Barros Gomes
Data: 11/10/2021 11:22:52-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Helber Barros Gomes
(Coorientador)

Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes
(Membro Interno)



Documento assinado digitalmente
Heliofabio Barros Gomes
Data: 11/10/2021 12:30:45-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profa. Dra. Ericka Voos Chagas Mariano
(Membro Externo ao Programa)



Documento assinado digitalmente
Ericka Voss Chagas Mariano
Data: 21/01/2022 19:22:49-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias
(Membro Externo)



Documento assinado digitalmente
WENDELL RONDINELLI GOMES FARIAS
Data: 21/01/2022 20:01:10-0300
CPF: 981.908.574-87
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

“Is our skin to keep the world out

Or our bodies in?”

Trenton Todd Woodley (Hands like houses)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, José Antunes Pereira Calado e Marli Dias Calado, por nunca terem duvidado da minha escolha, proporcionando todo suporte para que eu seguisse até aqui.

A minha namorada Bruna Lais de Melo Cavalcante, por sempre acreditar em mim, pela cumplicidade, pela paciência e principalmente pelo amor em todos os momentos que precisei me ausentar para me dedicar ao trabalho

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a minha família e a alguns dos meus professores do ICAT que me ajudaram a chegar até aqui. Gostaria de agradecer em especial ao professor Dr. Glauber Lopes Mariano e a Dr. Ericka Voss, por terem me escolhido como seu orientado no quinto semestre da graduação, me ensinando e ajudando em tudo que eu conheço sobre Ciência hoje. Ao professor Dr. Helber Barros Gomes, pela orientação, parceria.

Gostaria de agradecer também aos professores Drs. Wendell R. G. Farias, Ericka Voss, e Heliofábio Barros Gomes por terem aceitado participar da Banca Examinadora.

O ICAT me levou a conhecer ótimas pessoas que deixaram tudo um pouco mais fácil, então gostaria de agradecer também por toda a ajuda, companheirismos e amizade aos meus amigos da graduação Jeová Ramos, Ismael Guidson, nós fizemos os melhores trabalhos em cima da hora do bloco, e fizemos as melhores reuniões do CA, aos meus amigos que vieram através de uma tragédia na minha vida chamada "Física", Fernanda Liz, Mayara Christine Correia Lins, Glenda Cristine de Oliveira Silva e Mário Henrique Guilherme dos Santos Vanderlei que se tornaram amigos que vou levar pra vida toda. Em especial gostaria de agradecer a uma das pessoas que mais me ensinou e com certeza a que mais me ajudou desde a graduação até o mestrado, o meu amigo Rodrigo Junior.

A UFAL e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do ICAT por me concederem a oportunidade de formação. Em especial, gostaria de agradecer também ao projeto Desenvolvimento de modelagem do sistema Terrestre (CAPES) que é coordenado pelo, Dr. Dirceu Luis Herdies, o qual concedeu-me uma bolsa de estudo.

Resumo

Das variáveis relacionadas à poluição atmosféricas os aerossóis são uma das principais responsáveis por afetar o balanço de radiação, causando mudanças na atmosfera resultando em alterações climáticas a longo prazo. Por suas características serem muito variadas sua distribuição na atmosfera é heterogênea, tornando específicos os meios de medição, existem algumas formas de estudar essas características e/ou propriedades, uma destas é pela análise da Espessura Óptica, a qual é responsável por quantificar a atenuação da radiação em um meio contendo material opticamente ativo, por isso sensoriamento remoto é uma das ferramentas mais eficazes. O objetivo do presente estudo é comparar dados da espessura óptica dos aerossóis de três fontes distintas aos dados de superfície da AERONET (*Aerosol Robotic Network*), duas delas obtidas através de sensoriamento remoto utilizando os sensores MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) e OMI (*Ozone Monitoring Instrument*) e a terceira utilizando os dados de reanálise do MERRA-2 (*Modern Era Retrospective-Analysis for Research*). Para isso serão usadas observações independentes de 4 estações da AERONET avaliando a qualidade da espessura óptica das outras fontes de dados através de métodos estatísticos como BIAS, RSME e Pearson, foram observadas as principais áreas com maiores valores sobre a América do Sul para o período de 2005 a 2019 e apontado possíveis motivos para os resultados obtidos. Das três fontes de dados utilizadas na comparação com o observado o sensor MODIS obteve destaque ao apresentar os melhores resultados. O sensor OMI obteve duas das piores correlações observadas durante todo o estudo, sempre superestimando os dados das estações. A estação da AERONET onde as 3 fontes de dados que obtivam as melhores correlações foi a da Alta Floresta. Em contrapartida a que obteve os piores resultados foi a estação de CEILAP RG.

Palavras chave: Sensoriamento Remoto, Espessura óptica, Aerossóis.

Abstract

Of the variables related to air pollution, aerosols are one of the main factors responsible for affecting the radiation balance, causing changes in the atmosphere resulting in long-term climate changes. Since their characteristics are very varied, their distribution in the atmosphere are heterogeneous, making the measurement means specific, there are some ways to study these characteristics and / or properties, one of which is the analysis of the Optical Thickness, which is responsible for quantifying the radiation attenuation in a medium containing optically active material, so remote sensing is one of the most effective tools. This study aims to compare data on aerosol optical thickness from three different sources to the surface data from AERONET (Aerosol Robotic Network), two of them obtained through remote sensing from MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) and OMI (Ozone Monitoring Instrument) and the third using reanalysis data from MERRA-2 (Modern Era Retrospective-Analysis for Research). For this, the independent observations from 4 stations of the AERONET will be used, evaluating the quality of optical thickness of other data sources through statistical methods such as BIAS, RSME and Pearson, the main areas with the highest values over South America for the period were observed 2005 to 2019 and pointed out possible reasons for the results obtained. Of the three data sources used in the comparison with what was observed, the MODIS sensor was highlighted by presenting the best results. The OMI sensor obtained two of the worst correlations observed throughout the study, always overestimating the station data. The AERONET station where the 3 data sources has obtain the best correlations was Alta Floresta. On the other hand, the one that obtained the worst results was the CEILAP RG station.

Key words: Remote Sensing, Optical thickness, Aerossol.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema da distribuição de tamanho das partículas de aerossóis.	23
Figura 2 - Efeitos direto (esquerda) e indireto (direita) dos aerossóis na atmosfera.....	25
Figura 3 - Número anual de pontos quentes detectados pelo satélite AQUA no continente da América do Sul entre 2003 e 2017. A linha de regressão não indica tendência linear significativa. Fonte: Adaptado de WHITE, 2019	29
Figura 4 -Valores médios de profundidade óptica dos Aerossóis sobre a América do Sul em agosto (a, d), setembro (b, e) e outubro (c, f) de 2012, obtidos via MODIS (a, b, c) e via modelo (d e f). Fonte: adaptado de ALMEIDA, 2016	30
Figura 5 - Concentrações de PM _{2.5} medidas na cidade de Londrina durante os eventos. Painel superior, primeiro evento em 18 de agosto de 2016. Painel abaixo, segundo evento em 13 de setembro de 2016. Fonte: adaptado de MARTINS et al. (2018).	32
Figura 6 - Processos de deposição úmida e seca	34
Figura 7 - Distribuição de EOA sobre Banizoumbo comparando OMI, AERONET com fração de nuvem e água precipitável para (a) 2014 (b) 2015 (c) 2016 (d) 2017 (e) 2018.....	35
Figura 8 - Gráfico de dispersão entre a espessura óptica dos aerossóis do modelo MERRA-2 e os do fotômetro solar em 10 estações. A barra de cores representa a densidade de pontos que variam da porcentagem mais baixas (azul) ao 100% (amarelo).	36
Figura 9 - CMCA da PM _{2.5} dos sensores MODIS (a), MISR (b), SeaWiFS (c) e OMI (d) e PM _{2.5} de superfície (pontos coloridos nas figuras). O valor "R" no painel é o coeficiente de correlação entre as duas séries temporais. Ambas as séries temporais exibem ciclos sazonais verão-inverno distintos. Os mapas espaciais indicam boa concordância no leste dos EUA, mas uma concordância menor para as áreas centrais e ocidentais. Fonte: adaptado de LI, 2015	38
Figura 10 - Mapa Político da América do Sul. Fonte: Elaborado pelo autor com dados do IBGE, 2020	40
Figura 11 - Médias anuais da espessura óptica dos aerossóis no ano de 2005 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de	

sensoriamento remoto e do modelo com os dados observados nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 49

Figura 12 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2006 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observados nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 50

Figura 13 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2007 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 51

Figura 14 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2008 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 52

Figura 15 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2009 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 53

Figura 16 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2010 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 54

Figura 17 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2011 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c)

e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 55

Figura 18 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2012 do sensor MODIS (a), dos dados de reanalise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 56

Figura 19 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2013 do sensor MODIS (a), dos dados de reanalise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 57

Figura 20 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2014 do sensor MODIS (a), dos dados de reanalise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 58

Figura 21 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2015 do sensor MODIS (a), dos dados de reanalise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 59

Figura 22 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2016 do sensor MODIS (a), dos dados de reanalise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

..... 60

Figura 23 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2017 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).	61
Figura 24 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2018 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).....	62
Figura 25 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2019 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).....	63
Figura 26 - Médias mensais de espessura ótica dos aerossóis dos sensores MODIS e OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2 na região da América do Sul do mês de janeiro ao mês de março para o todo o período de 2005 a 2019.	65
Figura 27 - Médias mensais de espessura ótica dos aerossóis dos sensores MODIS e OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2 na região da América do Sul do mês de abril ao mês de junho para o todo o período de 2005 a 2019	66
Figura 28 - Médias mensais de espessura ótica dos aerossóis dos sensores MODIS e OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2 na região da América do Sul do mês de julho ao mês de setembro para o todo o período de 2005 a 2019	67
Figura 29 - Médias mensais de espessura ótica dos aerossóis dos sensores MODIS e OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2 na região da América do Sul do mês de outubro ao mês de dezembro para o todo o período de 2005 a 2019	68
Figura 30 - Comparação entre MODIS, OMI e MERRA-2 com os dados observados na AERONET para o período de 2005 a 2019 na estação de CEILAP BA. No Painel consta o “BIAS”, o “RMSE” e o coeficiente de correlação	

(R) do MODIS (vermelho), do MERRA-2 (roxo) e do OMI (azul) em relação aos dados da AERONET.....	73
Figura 31 - Gráfico de dispersão entre a espessura ótica dos aerossóis do MODIS(a), do MERRA-2(b) e do OMI(c) com os dados da estação de Ceilap BA da AERONET	73
Figura 32 - Comparação entre MODIS, OMI e MERRA-2 com os dados observados na AERONET para o período de 2005 a 2019 na estação de ALTA FLORESTA. No Painel consta o “BIAS”, o “RMSE” e o coeficiente de correlação (R) do MODIS (vermelho), do MERRA-2 (roxo) e do OMI (azul) em relação aos dados da AERONET.	74
Figura 33 - Gráfico de dispersão entre a espessura ótica dos aerossóis do MODIS(a), do MERRA-2(b) e do OMI(c) com os dados da estação de Alta Floresta da AERONET.	74
Figura 34 - Comparação entre MODIS, OMI e MERRA-2 com os dados observados na AERONET para o período de 2005 a 2019 na estação de CEILAP RG. No Painel consta o “BIAS”, o “RMSE” e o coeficiente de correlação (R) do MODIS (vermelho), do MERRA-2 (roxo) e do OMI (azul) em relação aos dados da AERONET.	75
Figura 35 - Gráfico de dispersão entre a espessura ótica dos aerossóis do MODIS(a), do MERRA-2(b) e do OMI(c) com os dados da estação de Ceilap RG da AERONET.....	75
Figura 36 . Comparação entre MODIS, OMI e MERRA-2 com os dados observados na AERONET para o período de 2005 a 2019 na estação de CUIBA MIRANDA. No Painel consta o “BIAS”, o “RMSE” e o coeficiente de correlação (R) do MODIS (vermelho), do MERRA-2 (roxo) e do OMI (azul) em relação aos dados da AERONET.	76
Figura 37 - Gráfico de dispersão entre a espessura ótica dos aerossóis do MODIS(a) do MERRA-2(b) e do OMI(c) com os dados da estação de Cuiaba Miranda da AERONET.	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Concentrações médias de $PM_{2,5}$ e BC de 24 horas para o primeiro e o segundo evento 32

Tabela 2- Lista dos países da América do Sul e suas respectivas áreas; média anual de focos de calor; área dividida pela média anual de focos de calor (densidade); e, frequência de incidência. Fonte: Adaptad de WHITE, 2019.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolo	Descrição
AB	Alta da Bolívia
AERONET	<i>Aerosol Robotic Network</i>
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BC	<i>Black Carbon</i>
BIAS	Erro Médios
BRAMS	<i>Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System</i>
CH ₄	Metano
CH ₂ O	Metanal
CMCA	<i>Combined Maximum Covariance Analysis</i>
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CV	Cavado do Nordeste
ENOS	El niño Oscilação Sul
EOA	Espessura Ótica dos Aerossóis
EUA	Estados Unidos da América
GEOS-5	<i>Geometry Engine, Open Source 5</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSI	<i>Gridpoint Statistical Interpolation</i>
H ₂ O	Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JBN	Jato de Baixos Níveis
MERRA-2	<i>Modern Era Retrospective-Analysis for Research 2</i>
MISR	<i>Multi-angle Imaging SpectroRadiometer</i>
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

NMHC	Hidrocarbonetos Não Metano
O ₂	Oxigênio
OMAERUV	<i>OMI/Aura Near UV</i>
OMI	<i>Ozone monitoring Instrument</i>
PM	<i>Particulate Matter</i>
PW	<i>Precipitable Water</i>
r	Coeficiente de Correlação de Pearson
RMSE	Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio
SeaWiFS	<i>Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor</i>
SF	Sistemas Frontais
TSM	Temperatura de Superfície do Mar
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES	9
ÍNDICE DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo Geral	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Espessura ótica dos aerossóis	22
3.2 O efeito dos aerossóis no balanço de radiação	24
3.3 Queimadas	25
3.4 Transporte dos aerossóis na América do sul.....	29
3.5 Deposição úmida e seca	33
3.6 Estudos Relacionados.....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 Área de estudo	39
4.2 Dados utilizados (MODIS, OMI, MERRA-2 e AERONET)	40
4.3 Lei de Beer	43
4.4 Tratamento de dados	44
4.5 Validação Estatística	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1 Análise da média anual do período de 2005 a 2019	46
5.16 Análise da média mensal do período de 2005 a 2019.....	64
5.17 Análise anual do sensor MODIS	69
6. CONCLUSÃO	77
6.1 Sugestões para trabalhos futuro	78
6.2 Limitações.....	78

7.	REFERÊNCIAS	79
----	-------------------	----

1. INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo a humanidade começou a se deparar com questões a respeito da poluição, como quanto de determinada substância é necessária para concluir-se que uma determinada área está poluída, se a poluição é antropogênica ou natural e como isso afeta todas as vidas ao redor, sendo o ar, um dos elementos mais agredidos (Braga, 2001). Os gases de efeito estufa tem como fontes mais expressivas a queima de combustíveis fósseis através dos automóveis e a queima de biomassa através das queimadas, que liberam além, de gases (CO₂, CO, CH₄, NMHC e etc.) uma grande quantidade de material particulado (LIOUSSE C. et al. 2004).

Criado por Schumauss em 1920, o termo aerossol designa as suspensões relativamente estáveis de partículas sólidas ou gotículas dispersas num gás com dimensões inferiores a 100 µm, mas tamanhos superiores aos das moléculas individualizadas. Tais suspensões são com muita frequência designadas como aerocolóides, matéria particulada ou simplesmente partículas e incluem poeiras, fumos, cinzas, nevoeiros e “sprays” (RENOUX et., al 1998).

Segundo ARTAXO (2006) as partículas de aerossóis em suspensão na atmosfera afetam fortemente o balanço radiativo da atmosfera, o clima, a química da atmosfera, a visibilidade, e a saúde das pessoas expostas às altas concentrações de partículas, desde a escala local até a escala regional e global. As partículas primárias são emitidas por múltiplas fontes naturais ou antropogênicas, abrangendo os processos de combustão, as erupções vulcânicas, os fogos florestais, as emanações derivadas de certas atividades industriais, o “spray” marinho e alguns materiais biológicos (Alves, 2005).

Segundo ALMEIDA (2009) caracterizar os aerossóis opticamente é uma forma de se conhecer e entender seus diferentes tipos. A análise destas características é de suma importância, uma vez que estas podem auxiliar a definir o aerossol presente em um determinado local. Uma das formas é observando as fontes emissoras deste aerossol que tem como principais fontes: processos de combustão, emissões gasosas terrestres, emissões vulcânicas, poeiras de meteoritos, poeiras transportadas pelo vento, entre outros.

No caso da América do Sul os aerossóis tem um comportamento baseado nas estações, ao ter um grande aumento de seus valores nas estações secas como já era esperado pelo aumento da quantidade de queimadas e pelo fato dos aerossóis serem usados como núcleos de condensação na estação chuvosa, e à medida que acontecem as precipitações, sendo “lavados” da atmosfera como aponta o estudo realizado por ALMEIDA (2016). Já na questão do transporte, as plumas de aerossóis na América do sul, são usualmente transportadas devido a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas frontais e o sistema de pressão Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), além da circulação de grande escala (RECUERO et al. 2004).

A distribuição de aerossóis é heterogênia na atmosfera, pois as diferenças de tamanho, de propriedades químicas, de fontes emissoras e de tempo de vida médio tornam bem específico o processo de coleta de dados, fazendo desses os motivos para o uso de sensoriamento remoto para tal tarefa (KAUFMAN et al. 2003).

Além do uso sensoriamento remoto simplificar a coleta de dados também oferece a opção de uma abordagem multi-sensor que segundo LI (2015) tem a vantagem de observar fenômenos a partir de diferentes medições obtendo assim uma análise mais profunda, refinando seus resultados e encontrando os pontos fortes e fracos de cada sensor.

O objetivo desse estudo é realizar uma análise multi-sensor e comparar dados da espessura ótica dos aerossóis de três fontes distintas escolhidas por fornecerem séries de dados completas do período de 2005 a 2019. Duas fontes das três são de dados de sensoriamento remoto dos sensores OMI (*Ozone monitoring Instrument*) e MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) com a última sendo os dados de reanálise do modelo MERRA-2 (*Modern Era Retrospective-Analysis for Research*) que inclui a assimilação de EOA do sensor MODIS (Aqua e Terra) dos satélites Terra e Aqua, aos dados observados nas estações da AERONET (*Aerosol Robotic Network*).

Portanto, será usado observações de 4 estações da AERONET (Alta Floresta, Ceilap RG, Ceilap BA e Cuiaba Miranda, as únicas que possuem uma série de dados completa) para avaliar a qualidade dos dados de espessura ótica do OMI, MODIS e MERRA-2 e assim observar as principais

áreas com maiores valores sobre a América do Sul para o período de 2005 a 2019 e apontar possíveis motivos para os resultados obtidos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Validar os dados de espessura ótica dos aerossóis do sensoriamento remoto obtidos dos sensores OMI e MODIS e os de reanálise fornecidos pelo MERRA-2, com os dados observados nas estações da AERONET, para a região da América do Sul.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar as áreas e os períodos de máximo e mínimo valor de Espessura Ótica sobre a região da América do Sul no período de 2005 a 2019;
- Utilizar as observações da AERONET para avaliar a qualidade da espessura ótica do OMI, do MODIS e do MERRA-2;
- Validar estatisticamente a espessura ótica dos aerossóis dos sensores e do MERRA-2 através dos cálculos do Erro Médio (BIAS), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Correlação de Pearson (r);

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Espessura ótica dos aerossóis

Os aerossóis são por definição partículas sólidas ou líquidas suspensas na atmosfera, os quais podem ter inúmeras formas, composições químicas, tamanhos, variando de dezenas de micrômetros a poucos nanômetros (SEINFELD e PANDIS, 1998). A forma mais fácil de entender a espessura ótica atmosférica é como a soma de todas as contribuições individuais de agentes atmosféricos. Os aerossóis atmosféricos podem ter origens naturais diversas como por queimadas, vulcões, ação erosiva dos ventos sobre a superfície dos solos e oceanos ou nas reações químicas entre as moléculas dos gases com seu diâmetro entre 0,01 e 10 μm . No oceano, algumas microalgas produzem enxofre que pode ser convertido em sulfato. Assim como existem plantas que produzem gases que reagem com outras substâncias e assim produzem aerossóis (NASA, 2013).

Já as origens antropogênicas são em grande parte as atividades tecnológicas e industriais como os transportes, a combustão de carvão, o processamento de cimentos, a metalurgia e a incineração de resíduos (ALVES, 2005). Segundo DA SILVA (2001) as características dos aerossóis dependem de alguns fatores como, por exemplo, o local de origem. A maior parte deles são aerossóis marinhos, em seguida se tem os aerossóis antropogênicos que podem ser divididos em urbanos e rurais.

Embora a medição de distribuição de tamanho dos aerossóis seja uma tarefa realizada com relativa facilidade em pesquisas de campo e às vezes até remotamente, através do uso de satélites, os materiais particulados possuem diferentes fontes de produção, que influenciam diretamente nas suas composições como, por exemplo, as fumaças emitidas pelas fábricas, escapamento de automóveis, por queimadas, partículas de poeira originada por ação do vento, sais marinhos emitidos pela agitação dos mares, todos tem composições distintas. Além desse fato, temos as várias combinações de diferentes elementos químicos, misturados de formas diferentes, além destas mesmas propriedades terem uma variação com o passar do tempo (envelhecimento do aerossol) (DUSEK et al. 2006; ANDREAE e ROSENFELD, 2008) através das transformações químicas e físicas (WARD e COTTON,

2011). Vários autores descrevem as partículas de acordo com sua forma, tamanho e composição química. Toxicologistas referem-se a aerossóis como ultrafinos, finos e de material particulado grosso, já os meteorologistas os consideram como materiais particulados (PM), PM_{2,5} (partículas de diâmetro inferior a 2,5 micrometros) ou PM₁₀ (partículas de diâmetro inferior a 10 micrometros) (NASA, 2013) na figura 1 podemos observar uma destas forma de descrição.

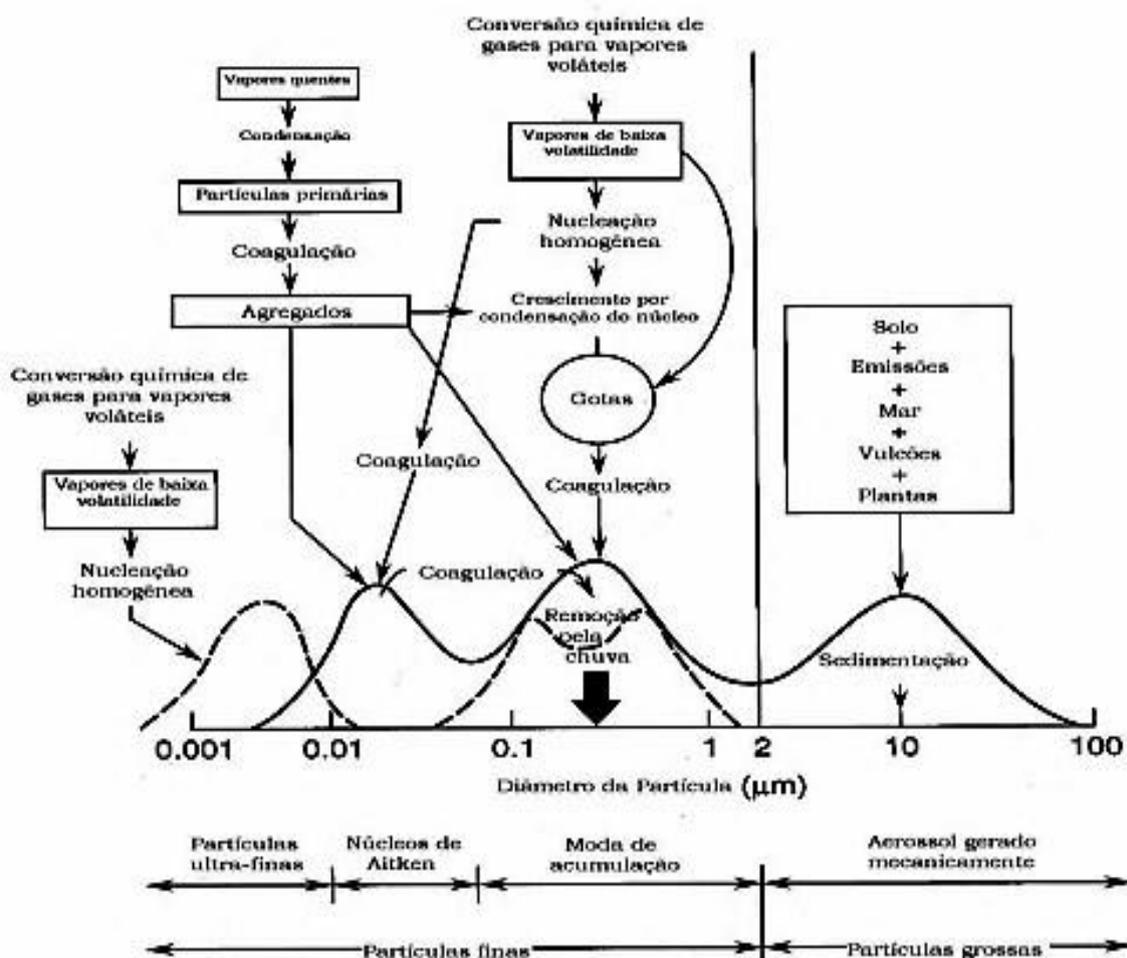


Figura 1 - Esquema da distribuição de tamanho das partículas de aerossóis.

Fonte: Adaptado de FINLAYSON-PITTS e PITTS, 1999.

3.2 O efeito dos aerossóis no balanço de radiação

Ao atravessar à atmosfera a radiação solar sofre modificações que definem o espectro e a intensidade na superfície (FERREIRA e OLIVEIRA, 2006). O aumento da concentração de material particulado na atmosfera exerce um efeito de fundamental importância no balanço radiativo terrestre (YAMASOE et al. 1998, 2000; IPCC 2001; SCHAFER et al. 2002).

Segundo ARTAXO et al. (2006) o efeito direto dos aerossóis no clima consiste nos mecanismos que afetam diretamente o fluxo de radiação solar na superfície, dependendo das propriedades intrínsecas das partículas de aerossóis e da refletividade da superfície e podem levar tanto ao aquecimento quanto ao resfriamento. Como no caso da poeira, oriunda de desertos, sobre o oceano em condições sem nuvens, suas perturbações no balanço de radiação solar resultam em um forte efeito de resfriamento local que pode ser maior que 60 Wm^2 durante eventos de deslocamento de poeira importantes (HAYWOOD et al. 2001). A complexidade das interações entre as partículas atmosféricas e o meio ambiente é alta, pois elas desempenham um papel essencial no processo de formação de nuvens e no balanço energético do planeta, e podem causar efeitos adversos à saúde humana quando em altas concentrações (BARBOSA et al. 2004).

Segundo ARTAXO, et al. (2006) as alterações importantes no balanço de radiação na superfície ocorrem como consequência da grande quantidade de partículas lançadas na atmosfera durante as queimadas, erupções vulcânicas, deslocamento intenso de poeira etc. Como podemos observar na figura 2 os aerossóis atmosféricos afetam o clima diretamente, através da absorção e espalhamento da radiação solar, e indiretamente, alterando os mecanismos de formação de nuvens (ALMEIDA et al. 2006).

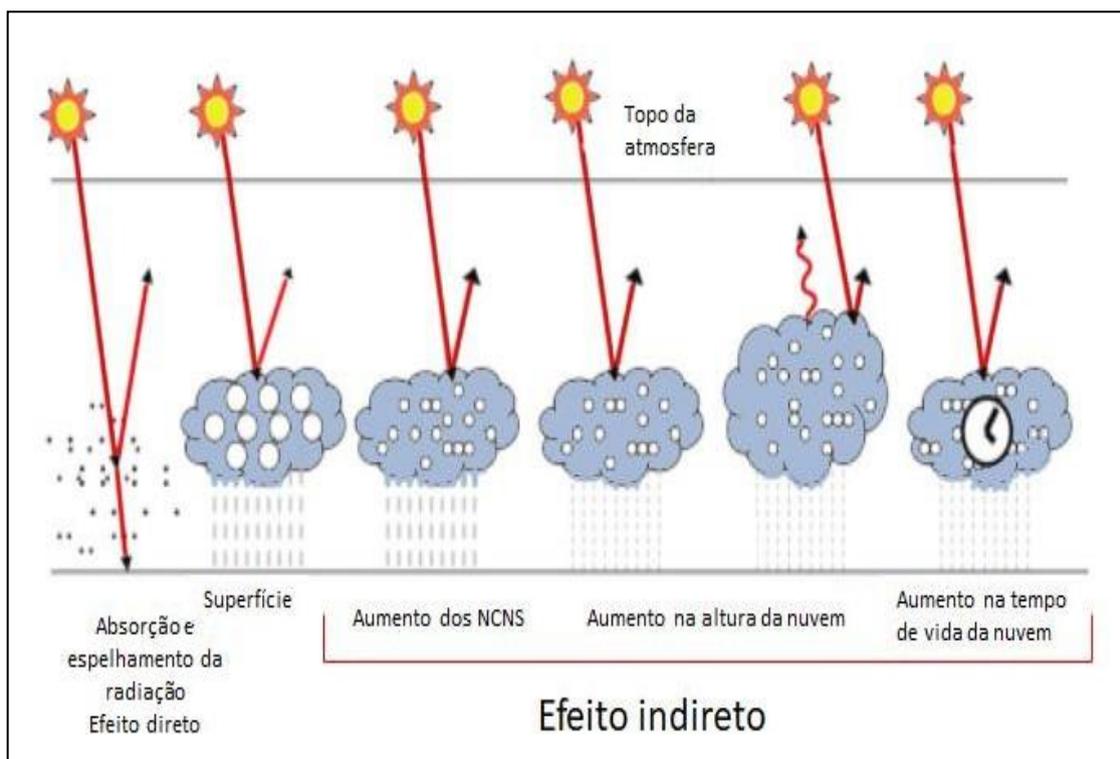


Figura 2 - Efeitos direto (esquerda) e indireto (direita) dos aerossóis na atmosfera.

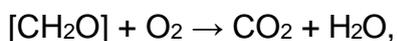
Fonte: Adaptado de IPCC, 2007.

Alguns aerossóis, como o black carbon, são emitidos diretamente por processos de combustão incompleta do carbono (ALBUQUERQUE, 2005) absorvem luz solar e, deste modo, aquecem a atmosfera, mas também resfriam a superfície (ANDREAE et al. 2004). Os aerossóis interagem com a luz solar (ANDREAE et., 1997), influenciando o balanço de energia do sistema Terra-atmosfera.

3.3 Queimadas

Nas últimas cinco décadas, as queimadas têm sido extensivas e persistentemente, sempre associada às questões do desmatamento generalizado e na degradação florestal (CRUTZEN e ANDREAE, 1990; BUSTAMANTE et al. 2016). As emissões de queima de biomassa injetam uma quantidade considerável de oxidantes e aerossóis na atmosfera, modificando a composição e a reatividade atmosféricas e, portanto, perturbando o clima regional, a água e os ciclos biogeoquímicos (ANDREAE et al. 2004; BOWMAN et al. 2009).

As queimadas são processos onde ocorre queima de biomassa, que decorrente de ações humanas ou razões naturais. Segundo ANDREAE (1991), a reação química responsável por representar a queima de matéria orgânica produzindo água e dióxido de carbono, é:



onde o elemento $[\text{CH}_2\text{O}]$ representa a composição média da biomassa.

Ao se falar no território brasileiro, é interessante falar sobre a questão das queimadas subsequentes na Amazônia, pois o balanço radioativo terrestre está profundamente ligado à emissão e transporte de partículas de aerossóis atmosféricos (FORSTER et al. 2007). Durante o período entre julho e outubro conhecido como estação seca ocorrem nas regiões Amazônica e Brasil Central, queimadas antropogênicas em áreas de Cerrado e de Floresta Tropical em grande quantidade, (COUTINHO et al. 2002). De acordo com PAIXÃO, (2011) as queimadas subsequentes acontecem logo após o desmatamento da área e o desenvolvimento da pecuária, pois o capim possui adaptações aos danos causados pelo fogo e podem brotar novamente após a queima.

O principal material orgânico que compõe os aerossóis de queimadas são os *black carbon*, além de muitos outros compostos traços inorgânicos que possuem uma variação na concentração de acordo com a eficiência da queima da biomassa (REID et al. 2004; MARTIN et al. 2013). Quase metade da fração solúvel em água é orgânica, enquanto que no restante inorgânico, a maior parte de sua solubilidade se deve à presença de sais solúveis (ANDREAE e ROSENFELD, 2008).

A estabilidade termodinâmica é um dos fatores predominantes para a posição final em que estas matérias se encontrarão ao serem lançadas na atmosfera. As fontes emissoras associadas à queima de biomassa emitem gases e partículas com temperaturas superiores as da atmosfera do ambiente e assim tendo uma flutuação positiva que transporta estes materiais verticalmente para cima (FREITAS et al. 2005).

A floresta amazônica, além das emissões de queimadas, é uma importante fonte natural de gases traço, aerossóis e vapor de água para atmosfera global por causa da sua localização tropical e seu intenso

metabolismo, (ANDREAE e CRUTZEN, 1997). A intensa atividade convectiva leva estes constituintes atmosféricos para grandes altitudes, onde podem ser transportados e percorrer grandes distâncias (ANDREAE et al. 2001; FREITAS et al. 2005).

Grande parte dos inventários de emissões de incêndio utiliza locais ativos de incêndio e área queimada para estimar as emissões de gases traços e aerossóis liberados na atmosfera (MAO et al. 2014). Além disso, os produtos globais para áreas de queimada não são adequados para estimar a área de pequenos incêndios devido às limitações de seus algoritmos (GIGLIO et al. 2006, 2010; RANDERSON et al. al. 2012).

Segundo o estudo realizado por WHITE (2019) que realizou uma detecção de focos de calor na América do Sul para um período de 15 anos (de 2003 a 2017) utilizando o sensoriamento remoto como ferramenta, mais especificadamente o sensor MODIS do satélite AQUA, considerando o tamanho dos países da América do Sul, o Paraguai foi o país com a maior ocorrência de focos de calor por área, com uma média anual de um detectado a cada 20 km². De acordo com a classificação proposta por WHITE e WHITE (2016), Paraguai, Bolívia, Brasil e Venezuela podem ser classificadas como países com incidência de incêndios florestais “muito alta” (com 1 foco de calor por ano a cada 75 km² ou menos detectado pelo satélite AQUA). Utilizando os mesmos critérios de classificação, Argentina, Colômbia e o Peru podem ser classificados na categoria de incidência de incêndios florestais “Alta”, enquanto o Equador, Guiana e Chile no grupo “Médio” e os demais países na categoria “Baixa” (Tabela 2).

Tabela 1 - Lista dos países da América do Sul e suas respectivas áreas; média anual de focos de calor; área dividida pela média anual de focos de calor (densidade); e, frequência de incidência. Fonte: Adaptado de WHITE, 2019.

País	Tamanho (km ²)	Média anual de Hot spot	Média anual densidade do HS	Frequência
Paraguay	406,750	20,737	20	Muito Alto
Bolivia	1,098,580	31,747	35	Muito Alto
Brazil	8,511,965	195,596	44	Muito Alto
Venezuela	912,050	19,047	48	Muito Alto
Argentina	2,766,890	34,122	81	Alto
Colombia	1,138,910	13,475	85	Alto
Peru	1,285,220	8,924	144	Alto
Ecuador	283,560	1,869	152	Médio
Guyana	214,999	948	227	Médio
Chile	756,950	2,657	285	Médio
Uruguay	176,220	516	341	Baixo
French Guian	91,000	233	391	Baixo
Suriname	163,270	380	430	Baixo

O autor ainda menciona que a análise temporal anual considerando todos os focos de calor detectados no continente da América do Sul entre 2003 e 2017, indica que 2004 foi o ano com a maior detecção, enquanto 2013 foi o mais baixo. Nenhuma tendência significativa foi detectada considerando todo o continente ($r^2 = 0,03$; $p = 0,81$) (Figura 3).

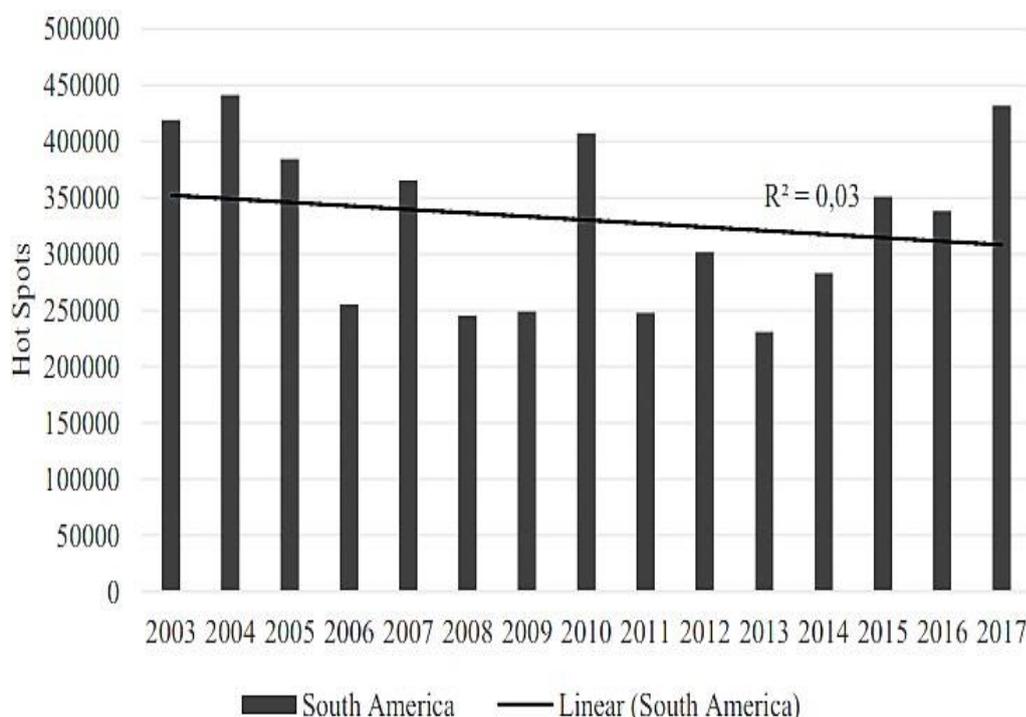


Figura 3 - Número anual de pontos quentes detectados pelo satélite AQUA no continente da América do Sul entre 2003 e 2017. A linha de regressão não indica tendência linear significativa. Fonte: Adaptado de WHITE, 2019.

3.4 Transporte dos aerossóis na América do sul

Segundo FREITAS et al. (2005), as fontes emissoras associadas as queimadas emitem partículas com temperaturas mais elevadas que as do ambiente; isto ocasiona um levantamento destas partículas. A estabilidade é um dos fatores principais para a altura destas partículas. Outro fator é a interação entre a fumaça e o ambiente, pelos turbilhões que fazem com que o ar frio penetre para dentro das plumas de fumaça, para diluí-las e reduzir sua flutuação. Os mesmos autores ainda ressaltam a importância de sistemas convectivos rasos e não precipitantes que se formam no topo da Camada Limite Planetária que transportam gases e partículas para a baixa troposfera, ajudando na dispersão destes. Sistemas convectivos profundos e precipitantes agem de forma distinta, dependendo das características das partículas.

No caso do transporte dos aerossóis as circulações atmosféricas de escala global e sinótica influenciam de forma em que impactos radiativos de aerossóis aconteçam em locais bastante distantes de sua origem, como se pode observar no estudo realizado por POWDER (2003) onde a poluição

urbana e aerossóis oriundos de queimas de biomassa e de desertos foram observados a quilômetros de distância das regiões de suas fontes.

Ao observar o estudo realizado por ALMEIDA (2016) na América do Sul durante a estação seca utilizando dados do MODIS e dados do modelo BRAMS (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling*) System, foi possível observar que em setembro, no pico da estação seca, os valores de Espessura ótica dos aerossóis obtidos na região Amazônica foram consistentemente acima de 0,8 no canal de 550 nm, onde é possível ver, na saída do modelo, a pluma de fumaça sendo transportada para longas distâncias de seus locais de origem (figura 4).

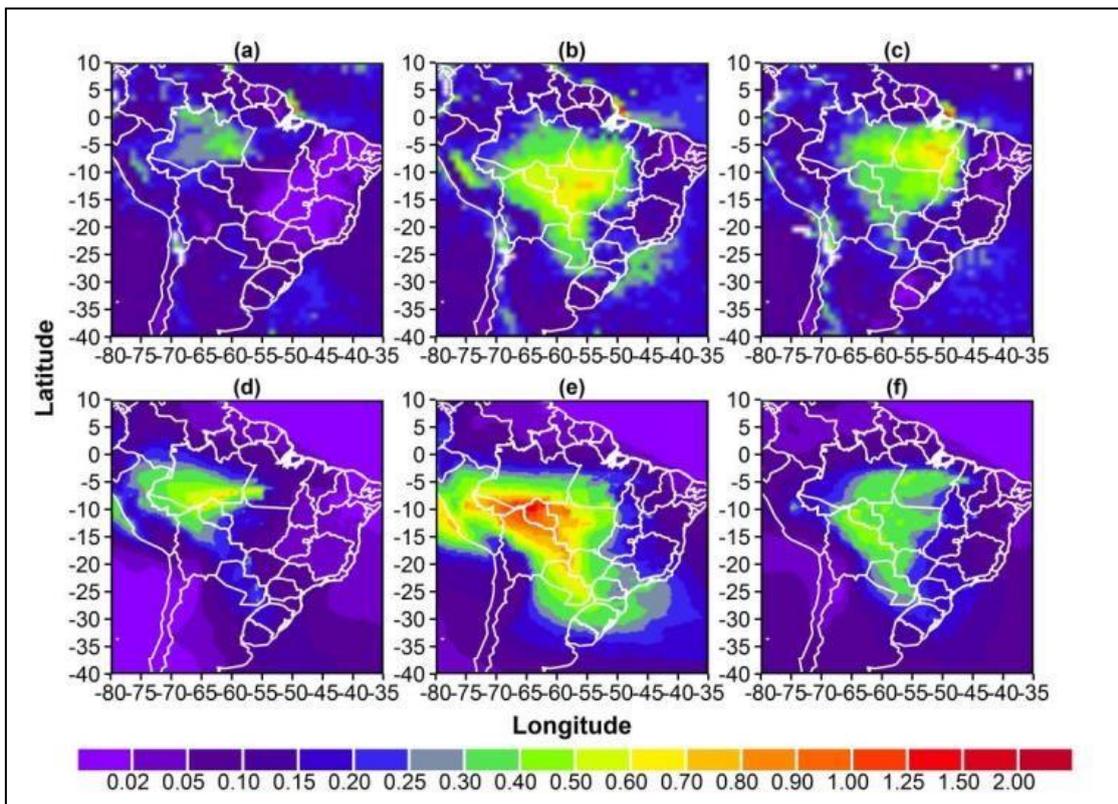


Figura 4 -Valores médios de profundidade óptica dos Aerossóis sobre a América do Sul em agosto (a, d), setembro (b, e) e outubro (c, f) de 2012, obtidos via MODIS (a, b, c) e via modelo (d e f).

Fonte: adaptado de ALMEIDA, 2016.

No estudo realizado por RECUERO et al. (2004) foi analisado o transporte de plumas de aerossóis durante a estação de queimadas no ano de 2002, nas regiões de Ji-Paraná e Brasil Central, para algumas regiões da América do Sul. Foi constatado que as partículas de queima de biomassa são transportadas devido a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas

frontais e sistemas de pressão como a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), além da circulação de grande escala.

O transporte de larga escala afeta a qualidade do ar de vários lugares do mundo. Por exemplo, aerossóis produzidos na Ásia podem ser transportados para até a América do Norte e assim contribuem substancialmente para o aumento dos níveis de poluentes atmosféricos (LIN et al. 2012; COOPER et al. 2015; VERSTRAETEN et al. 2015).

Mesmo em áreas remotas da Amazônia e oceanos, onde as concentrações de aerossóis são geralmente muito baixas, os transportes de longa distância podem ser responsáveis por grande parte da contribuição de certos componentes, como evidenciado há muito tempo por ANDREAE, 1983; BETZER et al. 1988; SWAP et al. 1992.

Diversas técnicas diferentes são aplicadas para confirmar transporte de longo alcance como fonte importante da concentração local de poluentes (CUSPILICI et al. 2017; YADAV et al. 2017). Essas estimativas são baseadas em dados de satélite, de observações de aeronaves e de superfície, bem como modelos (FREITAS et al. 2009; ROSÁRIO et al. 2013; UNO et al. 2016; WANG et al. 2017).

No estudo de transporte de longo alcance realizado por MARTINS et al. (2018) para identificar as influências diretas do Jato de baixos níveis (JBN) no transporte de aerossóis da região central do Brasil para a região sul do país, onde foram coletados dados de superfície, e de sensoriamento remoto num período de 16 a 20 de agosto e de 10 a 14 de setembro. Foram observados diferentes valores de material particulado nos dias com JBN (dia 17 e 18 de agosto e 12 a 14 de setembro) e dias sem JBN como podemos observar na figura 5 e na tabela 2.

A Tabela 1 mostra um resumo da média diária dos níveis de $PM_{2.5}$ e de BC para os dois eventos citados acima. Com base nos valores médios diários de $PM_{2.5}$ observados antes (16 de agosto) e depois (19 e 20 de agosto) dos dias do evento, foi estimado um aumento de cerca de 70% nos níveis de $PM_{2.5}$ em relação à observação de 18 de agosto (pico do primeiro evento). Para o segundo evento, os valores de $PM_{2.5}$ não estão disponíveis para as 24 horas. Contudo, com base nos valores registrados durante as mesmas horas dos dias, a possível contribuição do transporte de longo alcance foi estimada em cerca de 87% para $PM_{2.5}$, levando em consideração os valores médios das manhãs

(28 $\mu\text{g m}^{-3}$ em 13 de setembro e 21,7 $\mu\text{g m}^{-3}$ em 14 de setembro) e tardes (3,4 $\mu\text{g m}^{-3}$ em 14 de setembro).

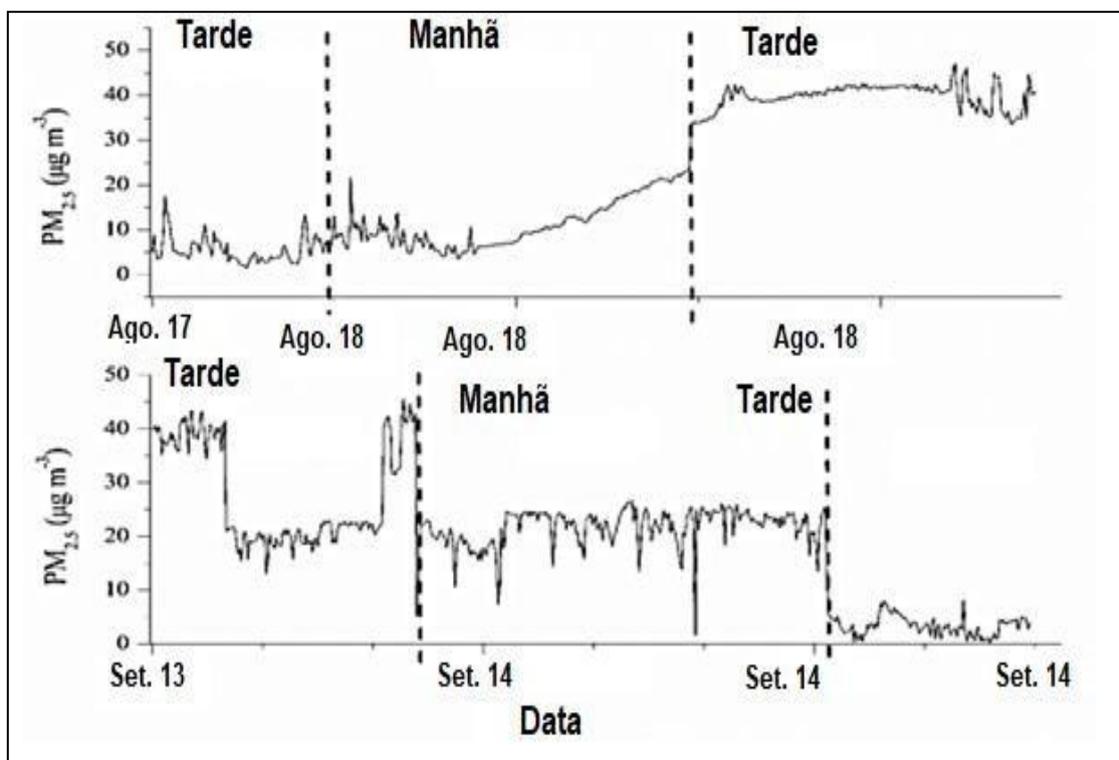


Figura 5 - Concentrações de $\text{PM}_{2,5}$ medidas na cidade de Londrina durante os eventos. Pannel superior, primeiro evento em 18 de agosto de 2016. Pannel abaixo, segundo evento em 13 de setembro de 2016. Fonte: adaptado de MARTINS et al. (2018).

Tabela 2 - Concentrações médias de $\text{PM}_{2,5}$ e *Black Carbon* de 24 horas para o primeiro e o segundo evento. Fonte: adaptado de Martins et al. (2018).

Event 1	$(\mu\text{g m}^{-3})$		
	$\text{PM}_{2,5}$	BC 370 nm	BC 880 nm
16/08/16	8.5	1.161	1.017
16/08/17	14.7	2.481	2.073
16/08/18	25.5	1.018	0.835
16/08/19	6.5	0.463	0.443
16/08/20	5.9	0.442	0.411

Event 2	$(\mu\text{g m}^{-3})$	
	BC 370 nm	BC 880 nm
16/09/10	0.515	0.397
16/09/11	0.842	0.640
16/09/12	1.645	1.221
16/09/13	2.436	1.852
16/09/14	0.985	0.674

3.5 Deposição úmida e seca

A remoção das substâncias emitidas para a atmosfera de forma direta é denominada como processo de deposição, esse processo pode ocorrer de duas formas distintas, deposição seca e deposição úmida. No caso da deposição úmida o processo acontece de duas formas: limpeza no interior das nuvens através da precipitação, quando os poluentes são removidos durante produção de uma gotícula de nuvem que posteriormente precipitará e por limpeza abaixo da nuvem conhecido como lavagem, quando o poluente é capturado na trajetória percorrida pela gotícula. Partículas grandes serão removidas por estes mecanismos com mais facilidade do que as partículas pequenas de mesma composição química (HOSKER e LINDBERG, 1982). Já a deposição seca ocorre quando os gases e partículas são transportados da atmosfera para a superfície sem que aconteça chuva.

Os fatores que regem a deposição seca de partículas ou gases são: as propriedades químicas das espécies depositadas, da natureza da superfície e o nível de turbulência atmosférica. A turbulência da atmosfera, especialmente nas camadas próximas à superfície, governa a taxa nas quais as espécies serão depositadas (SEINFELD e PANDIS, 2006). Os processos de deposição estão ilustrados na Figura 5. Os processos de deposição úmida e seca mantêm um fluxo interno de nutrientes na Bacia Amazônica que é altamente desenvolvido (LARA et al. 2001), as partículas de aerossóis transportam muito dos nutrientes essenciais para a floresta, e fazem parte do eficiente mecanismo de ciclagem de nutrientes da floresta (ARTAXO e HANSSON, 1995; OKIN et al. 2004).

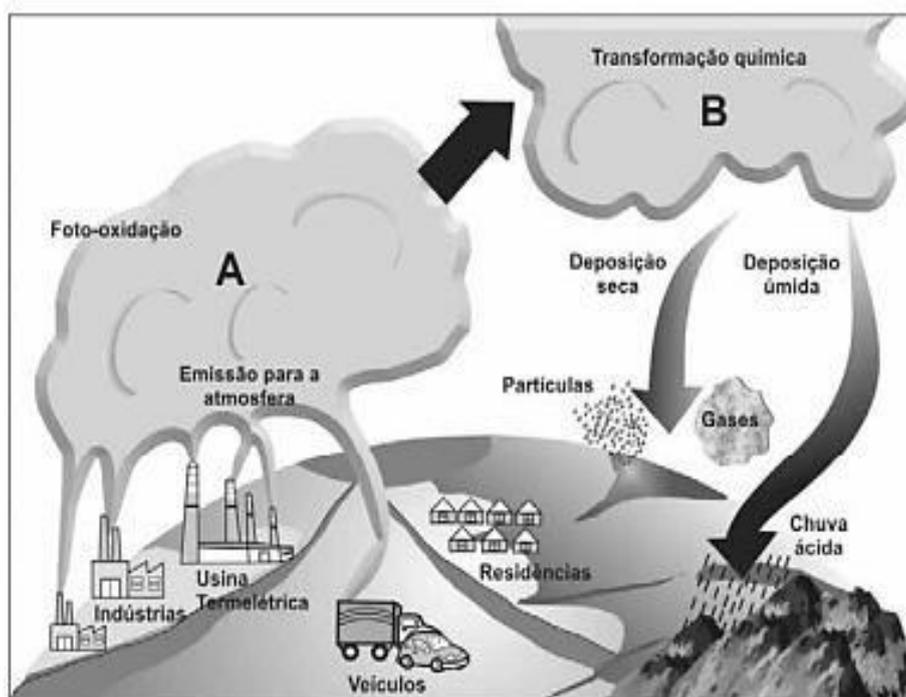


Figura 6 - Processos de deposição úmida e seca

Fonte: Adaptado de Embrapa (1996)

3.6 Estudos Relacionados

Segundo o trabalho efetuado por ANORUO (2020) para validar as variações sazonais e espaço-temporais do OMI e da AERONET de EOA sobre Banizoumbou na Nigéria (lat:13,54 e lon:2,66), utilizando o período de 2014 a 2018 (Figura 7a-e) a EOA tem um impacto notável na área devido a sua localização estratégica que é afetada pela alta deposição e varia principalmente durante a monção (junho-agosto). De acordo com a análise do autor, a medição sazonal tem padrões semelhantes, mas depende fortemente do ano. Ao observar o ano de 2014 (Figura. 7a), os resultados mostram uma superestimação da interação da EOA do sensor OMI com a fração de nuvem indicando que a observação baseada no solo (AERONET) é mais precisa do que a do em satélite, embora, as diferenças de comprimento de onda não sejam muito grandes em correlação com fração de nuvem e água precipitável. Na maioria dos casos, o OMI registra altos valores de EOA, mas com uma moderada correlação ($R = 0,45$) com dados AERONET.

A Figura. 7b indica que os meses de junho, julho e agosto são meses de chuvas fortes, enquanto os meses secos são dezembro, janeiro e fevereiro. O resultado da correlação obtido para AERONET (440 nm) com água precipitável

(PW - *Precipitable Water*) é de $r = -0,22$, com um erro padrão de 0,05. A correlação para OMI (442 nm) com PW é de 0,44 com um erro padrão de 1,31. A interpretação física deste resultado apontou que a AERONET tem uma correlação negativa com PW indicando um ligeiro aumento quando ocorrem valores mais baixos de EOA. Isso indica claramente que a umidade tem um bom efeito no comportamento dos aerossóis.

Ao usar técnicas estatísticas para avaliar medição anual e sazonal de ambos os sensores de EOA (Figura. 7c), a correlação do EOA da AERONET com a fração da nuvem é de $r = -0,62$, e com PW de $r = -0,56$, enquanto a do OMI é 0,12 e 0,51. Isso também corresponde à Figura. 7d com valores de correlação de 0,36, 0,13 e 0,34, 0,62. O resultado obtido da correlação do OMI com a cobertura de nuvens é de 0,51 (moderadamente fraca), enquanto com AERONET é uma correlação fraca ($r = 0,20$). No entanto, a correlação com água precipitável é de 0,32 (correlação fraca) para OMI e -0,18 (fraca negativa) para AERONET.

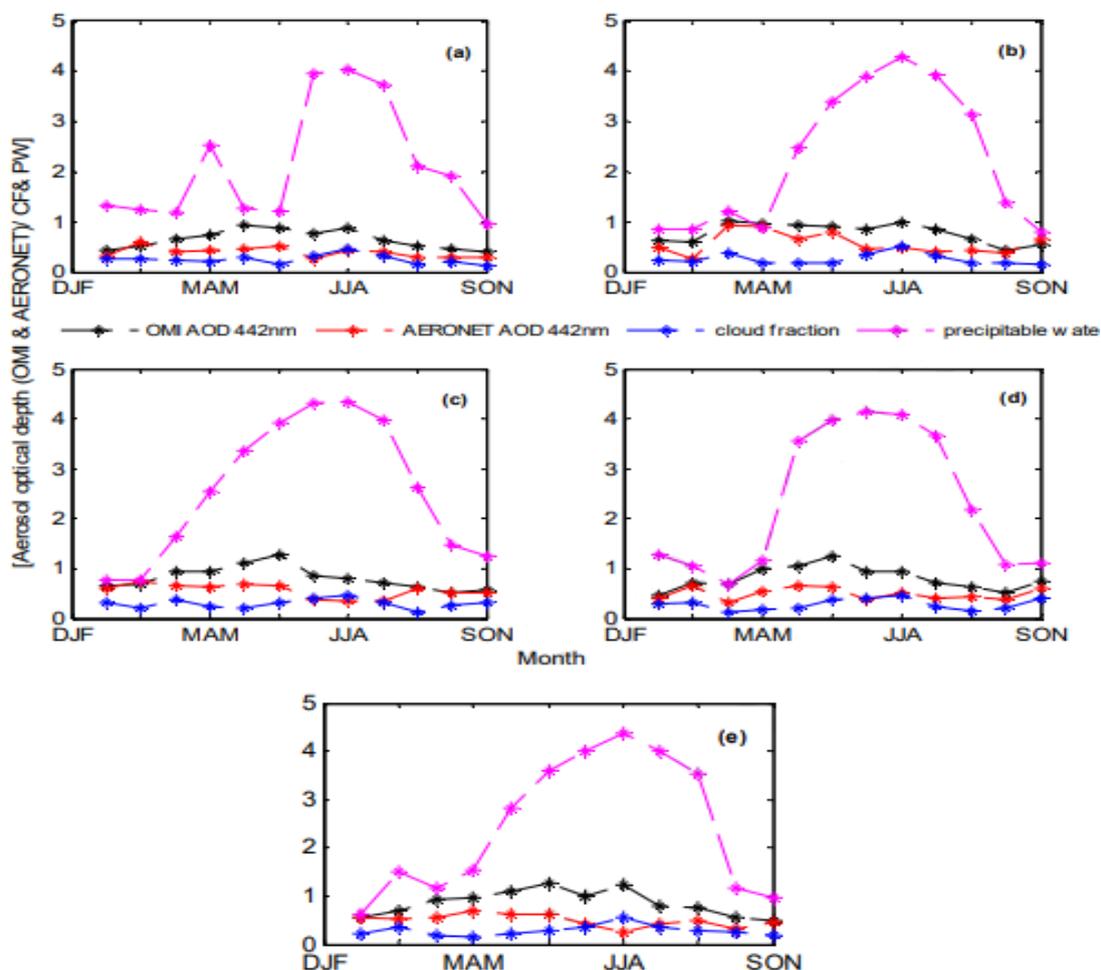


Figura 7 - Distribuição de EOA sobre Banizoumbo comparando OMI, AERONET com fração de nuvem e água precipitável para (a) 2014 (b) 2015 (c) 2016 (d) 2017 (e) 2018.

Alguns dos estudos que efetuaram uma comparação entre dados de superfície e os oriundos do MERRA-2, como o de SONG (2018) que foi efetuado na região da planície do norte da China (Figura 8). As medições de superfície da concentração horária de $PM_{2.5}$ foram coletadas em 81 estações na planície do norte da China. O autor destaca, que embora a espessura ótica dos aerossóis do MERRA-2 geralmente apresente bons resultados quando comparado aos dados da CARSNET (*Chinese Aerosol Research Network*) com um coeficiente de correlação de 0,77, existe uma certa deficiência dos produtos MERRA-2 sobre a região estudada (Figura 8).

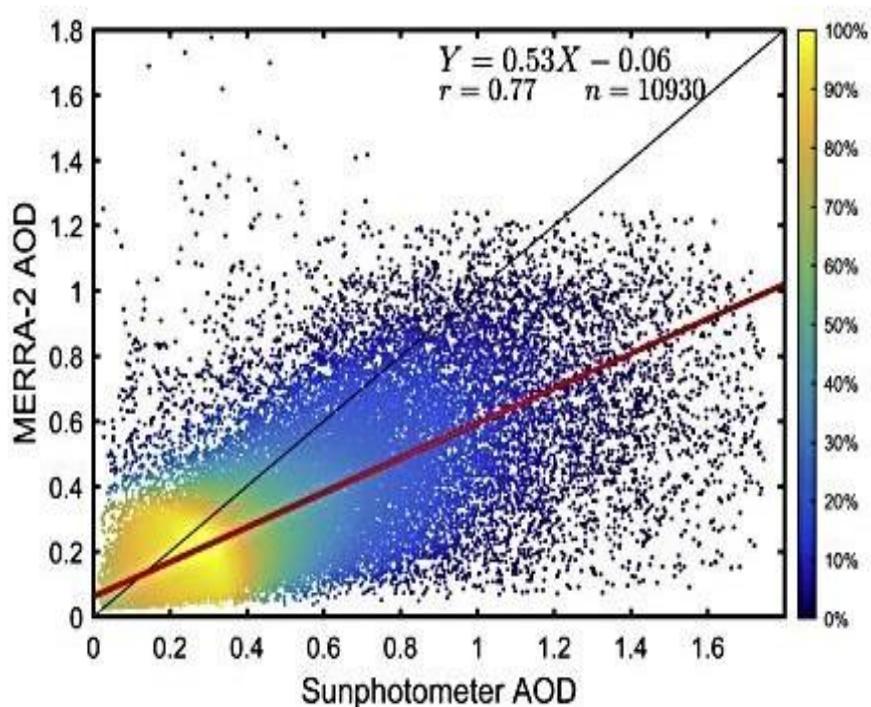


Figura 8 - Gráfico de dispersão entre a espessura ótica dos aerossóis do modelo MERRA-2 e os do fotômetro solar em 10 estações. A barra de cores representa a densidade de pontos que variam da porcentagem mais baixas (azul) ao 100% (amarelo).

Já no trabalho realizado por LI (2015) é efetuada a comparação dos dados de espessura ótica de 4 sensores distintos (MODIS, MISR, SeaWiFS e OMI, respectivamente) aos dados de superfície da AERONET. A resolução original de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ das grandes foi redimensionada para $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Foram selecionadas 52 estações nos EUA sobre o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2010.

Para a comparação, foi utilizada pelo autor a CMCA (*Combined Maximum Covariance Analysis*, LI et al. 2014c). Essa técnica se baseia na análise combinada de componentes Principais (CPCA, LI et al. 2014b) e na análise de covariância máxima (MCA, LI et al. 2014a), e incorpora efetivamente dados de satélite espacialmente mapeados e observações do solo na decomposição espectral.

Cada modelo de CMCA compreende um padrão espacial para cada campo de dados de satélite e uma série temporal compartilhada para todos os campos de dados de satélites e para o $PM_{2.5}$ de superfície (Figura 8). Observa-se que a correlação entre a serie temporal dos dados de espessura ótica dos satélites (curva preta no painel inferior) e os da AERONET na superfície (curva vermelha no mesmo painel) é de 0,89. Com relação aos dados de satélite, uma variabilidade espacial baixa é encontrada em todos os quatro mapas espaciais. Apesar de algumas diferenças internas, os quatro conjuntos de dados de satélite indicam fortes sinais positivos na região leste dos EUA, na comparação com o $PM_{2.5}$ de superfície (pontos coloridos na figura). MISR e OMI também mostram resultados positivos para o resto continente, enquanto o MODIS e o SeaWiFS têm anomalias positivas na costa oeste, mas sinais neutros em outros lugares.

Em resumo, a comparação entre a espessura ótica dos aerossóis via satélite e o os dados de $PM_{2.5}$ de superfície foi positiva, tendo como as melhores representações as dos sensores MODIS e OMI, com destaque para o MODIS em pequena escala e para o OMI em grande escala.

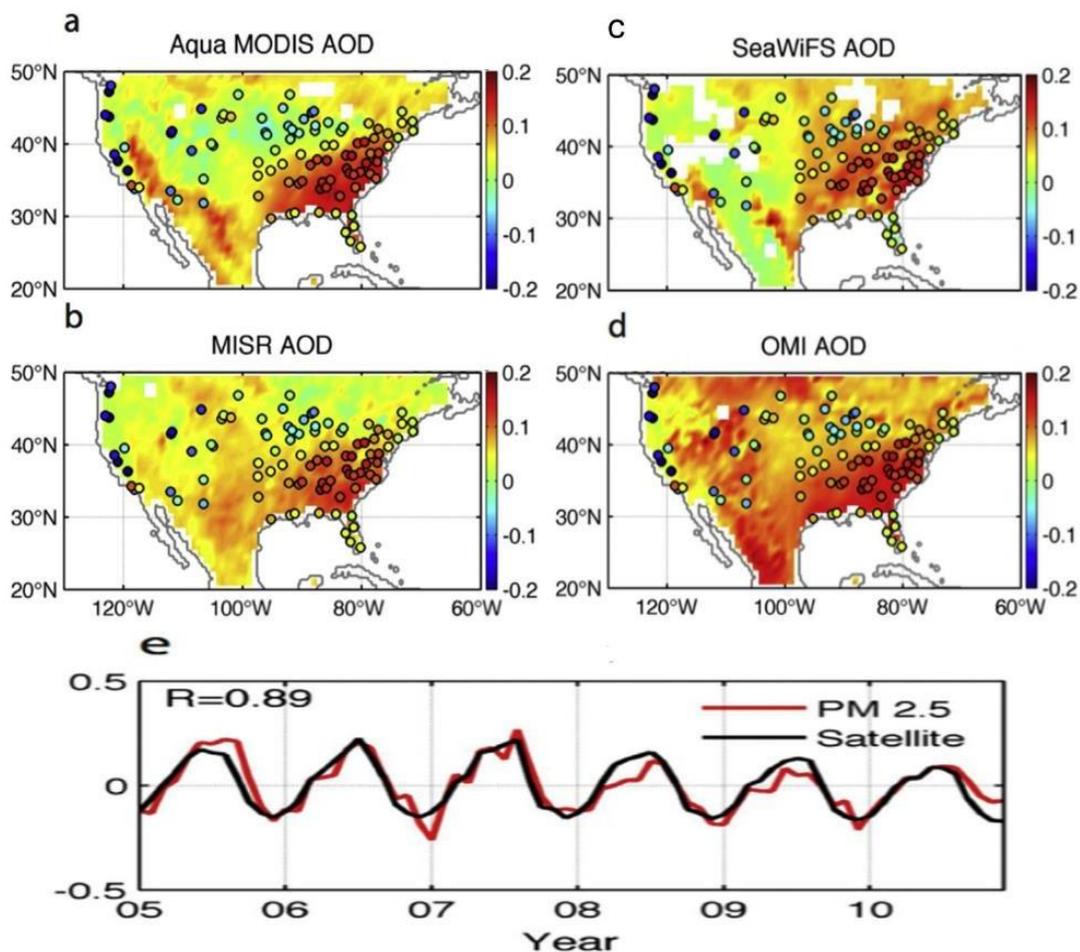


Figura 9 - CMCA da PM_{2.5} dos sensores MODIS (a), MISR (b), SeaWiFS (c) e OMI (d) e PM_{2.5} de superfície (pontos coloridos nas figuras). O valor "R" no painel é o coeficiente de correlação entre as duas séries temporais. Ambas as séries temporais exibem ciclos sazonais verão-inverno distintos. Os mapas espaciais indicam boa concordância no leste dos EUA, mas uma concordância menor para as áreas centrais e ocidentais. Fonte: adaptado de LI, 2015.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

Para a análise da espessura ótica dos aerossóis será utilizado o período de dados que corresponde aos anos de 2005 a 2019 em toda a extensão do continente sul-americano (60°S 20°W) como demonstrado na figura 9.

A América do Sul possui características climatológicas definidas através dos relevos como a exemplo dos Andes e de sistemas, tais como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (KODAMA, 1992 ; CARVALHO et al. 2004), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (UVO, 1989), a Alta da Bolívia e o cavado do Nordeste (AB/CV) (LENTERS e COOK, 1997), as Altas Subtropicais do Atlântico e do Pacífico (RODWELL e HOSKINS, 2001), os sistemas frontais (SF) (ANDRADE, 2005), o Jato de Baixos Níveis (JBN) (MARENGO et al. 2004).

Já com relação às principais fontes emissoras de aerossóis segundo ALVES (2005), destaca-se as partículas primárias emitidas por múltiplas fontes naturais e antropogênicas, abrangendo os processos de combustão, as erupções vulcânicas, os fogos florestais, as emanações derivadas de certas atividades industriais e viárias, o “spray” marinho e alguns materiais biológicos.

Segundo KHONDOKER et al. (2018) ao realizar um estudo detalhado sobre as áreas da América do sul, constatou que as principais áreas emissoras de aerossóis antropogênicos, são as megacidades (São Paulo, Buenos Aires e Etc.) que tem como produção principal a queima de combustíveis fósseis e a atividade industrial. Já os naturais destacam-se as queimadas, que podem acontecer de forma natural ao longo de todo o continente principalmente na região central do Brasil.

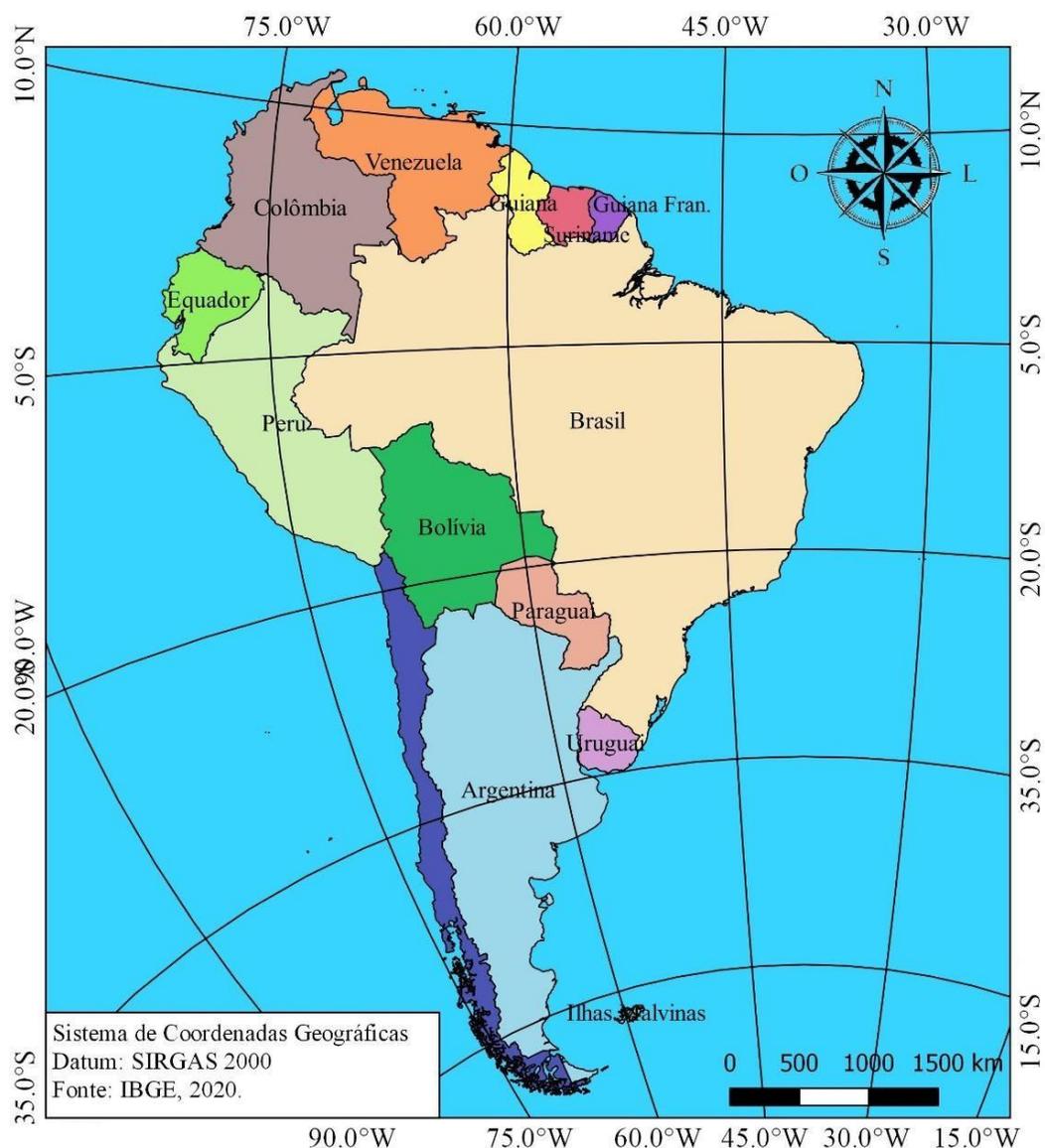


Figura 10 - Mapa Político da América do Sul. Fonte: Elaborado pelo autor com dados do IBGE, 2020.

4.2 Dados utilizados (MODIS, OMI, MERRA-2 e AERONET)

Os sensores de satélites podem quantificar várias propriedades atmosféricas medindo o comprimento de onda, angular e polarização desta energia refletida e emitida (Kaufman et al. 2002a). O sensor MODIS tem 36 bandas que variam de 0,4 a 14,4 μm com três resoluções espaciais diferentes (250, 500 e 1000 nm), medindo EOA sobre a terra em comprimentos de onda com resolução de 550 m e extrapolados para um comprimento de 0,55 μm (Ichoku et al. 2002). Um modelo dinâmico de aerossol adequado foi escolhido para inverter a radiância medida pelo satélite para gerar produtos de dados de

aerossol, toda a metodologia detalhada foi discutida por Kaufman et al. (1997b).

Os dados de espessura ótica dos aerossóis do sensor OMI (*Ozone monitoring Instrument*) instalados no satélite Aura, desde o seu lançamento em julho de 2004, trabalha utilizando o algoritmo OMAERUV que usa refletâncias pré-computadas da parte superior da atmosfera para medir a Espessura ótica dos aerossóis. O OMI também mede a pressão e a cobertura da nuvem, que fornece dados para derivar o ozônio troposférico. Os dados utilizados foram obtidos através do site disc.gsfc.nasa.gov com resolução temporal diária e resolução espacial de 1° por 1°.

Os dados de reanálise MERRA-2 que fornece dados desde 1980 e foi introduzida com a função de substituir o conjunto de dados MERRA-1 por causa dos avanços no sistema de assimilação que permitem a assimilar a radiação hiperespectral e observações de microondas, juntamente com conjuntos de dados de ocultação de rádio GPS. Resumidamente, o conjunto de dados MERRA-2 é produzido usando o modelo atmosférico GEOS-5 (sistema de assimilação de dados versão 5.12.4 (RIENECKER et al. 2008 e MOLOD et al. 2015) e o método de assimilação 3DVAR (*three-dimensional variational data analysis*) com pontos de grade interpolados (GSI) para esquemas de análises meteorológicas (WU et al. 2002; KLEIST et al. 2009). O GSI (*Gridpoint Statistical Interpolation*) usa uma análise incrementada com um procedimento de atualização a cada 6 h (BLOOM et al. 1996).

A rede AERONET é conjunto de estações de monitoramento de aerossol em solo estabelecidas pela NASA e amplamente expandidas por outras agências, institutos e parceiros universitários em todo o mundo (Holben et al. 1998). O objetivo deste programa é avaliar as propriedades óticas do aerossol e validar as medições de satélite de EOA. A rede impõe padronização de instrumentos, calibração e processamento. Consta nos instrumentos padronizados, um radiômetro CIMEL sol / céu que realiza medições de radiância direta e difusa do céu em oito canais espectrais dentro da faixa de 0,34 a 1,02 μm . As medições do céu são realizadas em 0,44-, 0,67-, 0,87- e 1,02- μm comprimentos de onda através de uma grande variedade de ângulos de dispersão do Sol, usando um perfil de aerossol constante para medir a distribuição de tamanho, função de fase e EOA (Holben et al. 1998). O

incerteza na medição de EOA em condições livres de nuvens é $\leq \pm 0,01$ para λ em 440 nm e $\leq \pm 0,02$ para comprimentos de onda mais curtos.

Das estações da AERONET (Figura 11) na região do estudo foram utilizadas apenas 4 das cerca de 50 disponíveis, Alta Floresta (lat: -56.204, lon: -9.871), Ceilap BA (lat: -58.606, lon: -34.655), Ceilap RG (lat: -69.32, lon: -51.611) e Cuiaba Miranda (lat: -56.171, lon: -15.831). Na América do Sul apenas essas estações tinham uma série contínua de dados com as demais com falhas de meses e até mesmo anos. É necessário também ressaltar que o comprimento de onda nos dados da AERONET é de 500nm, o mesmo do sensor OMI, porém o comprimento do sensor MODIS e do MERRA-2 é diferente, sendo respectivamente 550nm.

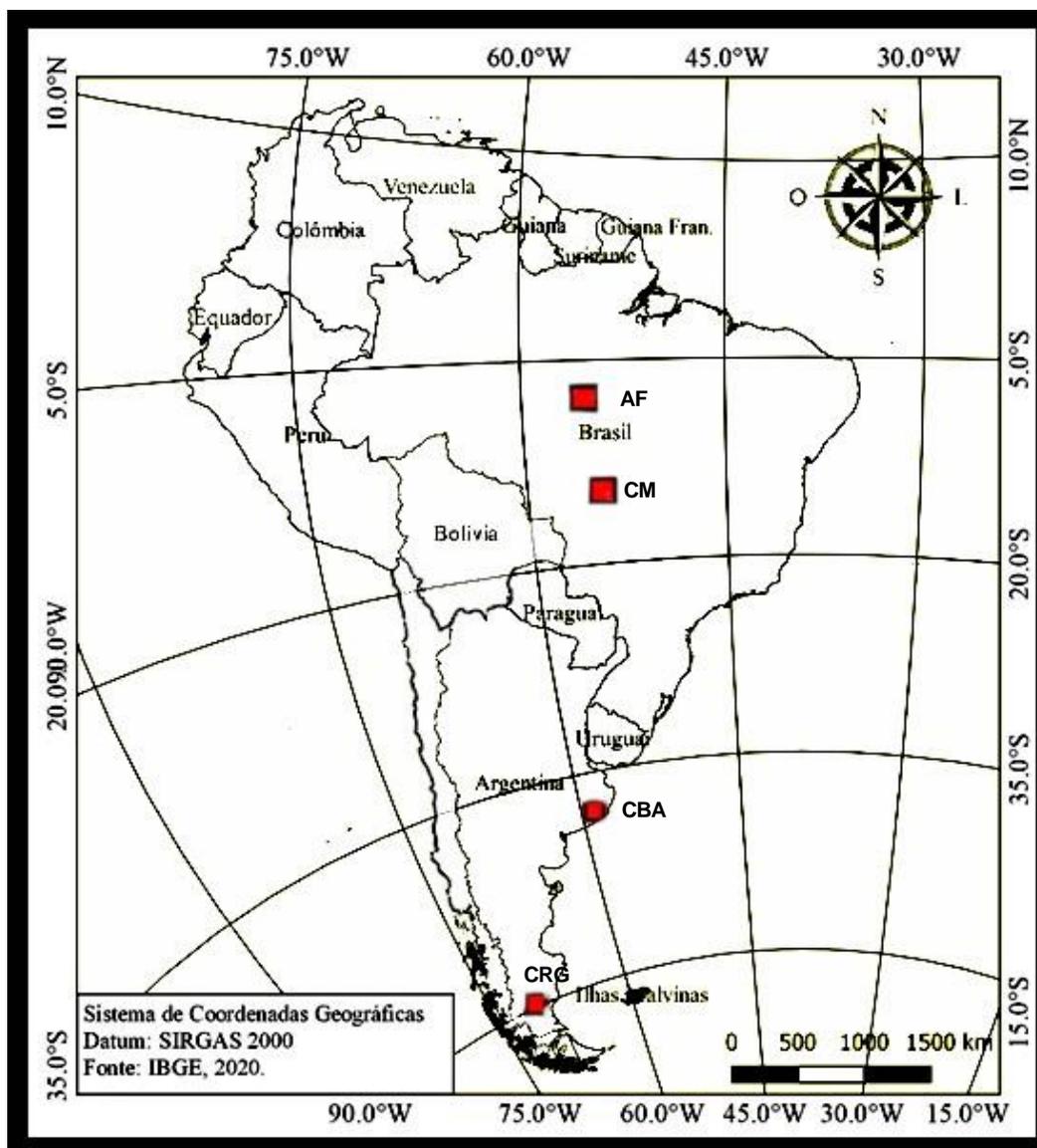


Figura 11. Mapa da América do Sul com as Localizações das estações Alta Floresta (AF), Cuiaba Miranda (CM), Ceilap BA (CBA), Ceilap RG (CRG). Fonte: autor com dados do IBGE, 2020.

4.3 Lei de Beer

A espessura ótica de um meio é por definição um conceito desenvolvido no século 18, descrito pela chamada Lei de Beer e relaciona a incidência de radiação que atinge o topo da atmosfera com a incidência na superfície (COULSON, 1975).

Ao se considerar a propagação da radiação em um comprimento de onda λ , através de uma determinada camada $d(x)$ perpendicular a um feixe de intensidade $F(\lambda)$, a extinção da radiação de um caminho transversal, infinitesimal, dx é proporcional à quantidade de matéria ao longo do caminho. Onde $b(x,\lambda)$ é o coeficiente de extinção e é proporcional à densidade do material em determinado meio (Equação 1). A extinção inclui o espalhamento e a absorção, ambos removem fótons do feixe. Contrastando com a absorção, a energia radiante espalhada se mantém na forma de radiação, mas a direção da radiação incidente é modificada. Dividindo a (equação 1) por dx e fazendo $dx \rightarrow 0$, temos a equação 2 que é conhecida como Lei de Beer. A absorção e o espalhamento ocorrem simultaneamente, isto porque, todas as moléculas e partículas absorvem e espalham.

A atenuação da radiação num meio real é expressa pela seção transversal de extinção (b) que é definida pela soma das seções transversais de absorção (ba) e o espalhamento (bs). A seção transversal de extinção é um fator de ponderação que indica a eficiência em todos os comprimentos de onda com que a molécula espalha ou absorve radiação, também pode ser compreendido em termos da probabilidade de uma molécula absorver ou espalhar um fóton incidente (ECHER e SOUZA,2001; SEINFELD e PANDIS, 2006).

$$F(x + dx, \lambda) - F(x, \lambda) = -b(x, \lambda) F(x, \lambda) dx \quad (1)$$

$$\frac{dF(x, \lambda)}{dx} = -b(x, \lambda) F(x, \lambda) \quad (2)$$

$$b = ba + bs \quad (3)$$

4.4 Tratamento de dados

Com principal intuito de simplificar o trabalho com grandes séries para a obtenção dos gráficos espaciais foi utilizado o software python (www.python.org), que se trata de uma linguagem muito poderosa por sua alta versatilidade, oferecendo uma grande variedade de opções como modelagem linear e não-linear, testes estatísticos clássicos, análise de séries temporais, classificação, agrupamento e etc (LUTZ, 2001). No caso desse trabalho foi utilizado para teste estatísticos como o Erro médio (BIAS), a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), a Correlação de Pearson (r) e para a análise das series temporais, médias mensais e anuais. Cada tipo de análise no python é feito através da utilização de pacotes, cada um com uma função específica, que servirão para trabalhar os dados obtidos através do site disc.gsfc.nasa.gov. Com esses dados foram calculados médias mensais e anuais para a análise. Para a geração e análise das médias encontradas sobre a área de estudo foram utilizados os pacotes geopandas, matplotlib, xarray, numpy, cartopy, statistics, entre outros.

4.5 Validação Estatística

Para fazer a avaliação dos dados do MODIS, OMI e MERRA-2 quantitativamente, foram calculados o Erro médio (BIAS) a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e a Correlação de Pearson (r), conforme descrito abaixo (WILKS, 2011).

O BIAS, considera uma determinada variável (X) com um sub-índice (M), como por exemplo: mostrar os dados do MODIS (XM) e os valores do AERONET (XO). Assim, o BIAS para a variável de interesse (X), será calculado para determinar área da segundo a Equação 4 (quanto mais próximo de zero for o valor do BIAS melhores serão os resultados):

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{Mi} - X_{Oi}) \quad (4)$$

No qual i representa o índice do ponto de grade e N o número total de pontos avaliados. O RMSE mede a dimensão dos erros, é necessário avaliar a

amplitude do erro para avaliar se o resultado é realmente positivo, o RMSE é calculado de acordo com a Equação 5:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{Mi} - X_{Oi})^2}$$
(5)

Foi calculado também o coeficiente de correlação espacial de Pearson (r, PEARSON, 1901), que leva em consideração a fase e a diferença entre duas variáveis (simulados e de sensoriamento), possibilitando comparar os valores de Espessura ótica das duas fontes de dados.

Descrito através da Equação 6:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{Mi} - X'_{Mi})(X_{Oi} - X'_{Oi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{Mi} - X'_{Mi})^2 \sum_{i=1}^N (X_{Oi} - X'_{Oi})^2}}$$
(6)

Onde X' indica a média em cada ponto, calculado através da Equação 7:

$$X' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i)$$
(7)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise da média anual do período de 2005 a 2019

Neste tópico serão analisadas as médias anuais para o período de 2005 a 2019 onde serão feitas as avaliações de cada uma das fontes de dados e a comparação com os dados de superfície da AERONET. As figuras 11-25 apresentam mapas com as médias anuais de EOA em toda a região da América do Sul fazendo uma comparação entre as saídas dos sensores OMI e MODIS e os dados de reanálise do MERRA-2, e histogramas comparando os dados das saídas com quatro estações da AERONET em locais distintos.

Observa-se dois padrões distintos durante os anos analisados, o primeiro deles ocorre nos anos de 2005, 2006, 2007, 2010, 2015 e 2017 com altos valores numa região localizada entre o centro oeste/Noroeste do Brasil, Norte da Bolívia e sul do Peru e com valores mais baixos no litoral do continente banhado pelo oceano Atlântico. Já o outro padrão que ocorre nos demais anos não apresenta resultados tão altos em nenhuma região e contém pequenas divergências entre as fontes de dados.

Ao observarmos o primeiro padrão, a comparação direta das médias anuais dos sensores e do modelo com as observadas nas estações de superfície da AERONET (Ceilap BA, Ceilap RG, Cuiaba Miranda e Alta Floresta), assim como o observado no estudo de LI (2015) o sensor MODIS é o que possui valores mais próximos aos observados da AERONET. Em contrapartida, os valores mais distantes do observado dos dados da AERONET são os do sensor OMI que com exceção da estação Cuiaba Miranda (2005, 2010, 2015 e 2017) apresenta sempre resultados superestimados. A estação onde as fontes de dados têm seu melhor desempenho em relação aos dados de superfície é a da Alta Floresta (com exceção dos anos de 2015 e 2017 onde a estação de Cuiaba Miranda aponta o melhor resultado) onde os dados de reanálise e os dos sensores tem pouca variação em comparação aos da AERONET.

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2005) analisando os dados de precipitação no setor sul da Amazônia para esse período, observou-se anomalias negativas durante a estação chuvosa de 2005 de 350 mm quando comparado com a média histórica (2.200 mm). Isto pode ter contribuído para os altos valores de EOA durante os anos de 2005 e 2006. O

desmatamento também é um dos principais fatores que contribui para o aumento de aerossóis, de monóxido de carbono (CO) e outros gases de efeito estufa na atmosfera. Em 2005 foi estimado aproximadamente 18.793 km² de desmatamento na região transformando todo o clima da região e induzindo várias queimadas (Fearnside, 2006). Já no ano de 2010 ao observar um estudo realizado pelo INPE (Marengo et al. 2011), onde é efetuada a análise da série histórica de dados de pluviosidade na região da bacia amazônica, destaca-se a seca ocorrida em 2010 como a mais drástica já registrada, superando a de 2005, até então considerada a maior do século. O estudo aponta que o processo teve início no começo do verão, devido a atuação de um El Niño, mas foi intensificado pelo aquecimento das águas tropicais do Atlântico Norte. O resultado foi uma estação seca que se estendeu por muitos meses, ocasionando alterações no ciclo hidrológico em ambas as regiões durante o ano de 2010, com essa variação acontece também uma alteração nos valores de EOA.

Em 2015 ocorreu El Niño que pode ter sido um dos mais fortes já registrados, comparados aos anos de 1997 e 1998 (PEGORIM, 2015). De acordo com Instituto de Meteorologia (INMET), em 2015, o mês de julho apresentou padrões característico do fenômeno El Niño, com uma precipitação abaixo da média na Região Norte e em parte da região Nordeste do Brasil o que influenciou diretamente na umidade impactando a EOA, pois como observado por ANORUO (2020) a umidade ou a falta dela influencia diretamente na concentração de aerossóis. Foi constatado também pelo INMET que a fase quente do El Niño manteve sua evolução, atingindo temperaturas positivas superiores a 2^o C na superfície do Oceano Pacífico (DE MOURAM et al. 2015). Segundo dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), de 8 a 15 de dezembro o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) persistiu na região equatorial do Oceano Pacífico com anomalias positivas de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) de 4^oC, chegando em até 5^o C (INPE, 2015).

Já no ano de 2017 apesar de não existir a ocorrência do El Niño, segundo o OVERLAND et al. (2018) de outubro de 2017 a setembro de 2018 foi o segundo período mais quente (depois de 2015-16) no registro observacional dentro do período aqui estudado, isso junto ao grande número focos de calor (WHITE, 2019), claramente causaram um impacto sobre a

concentrações de aerossóis, aumentando os valores da EOA no ano de 2017 sobre a região centro-oeste do Brasil.

No segundo padrão que ocorre nos demais anos (2008, 2009, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016, 2018 e 2019) existe um comportamento semelhante entre as três fontes de dados estudadas. Como exemplo, pode-se citar os valores mais baixos no litoral do continente banhado pelo oceano Atlântico. Já na questão das divergências a principal delas ocorre entre os sensores, pois os altos valores se localizam em regiões diferentes (para o OMI próximos a cordilheira dos Andes e para o MODIS em um ponto específico na Bolívia). No ano de 2013 ocorre um resultado distinto dos demais anos, enquanto o OMI repete os altos valores na região de costume e o sensor MODIS tem altos valores em uma região diferente na parte norte do continente sul-americano (Equador, Venezuela e Colômbia).

Ao observarmos a comparação direta das médias anuais dos sensores e do modelo com as observadas nas estações de superfície da AERONET, com exceção do ano de 2019 - onde o sensor OMI tem os melhores resultados - o MODIS é o que possui valores mais próximos aos observados em todas as estações do fotômetro solar. Em contrapartida, o OMI é o que demonstra os piores resultados, com a exceção da estação de Cuiaba Miranda onde o sensor OMI possui o melhor resultado nos anos de 2006, 2008, 2011, 2012, 2014, 2016, 2018, 2019. A estação onde os sensores apresentam valores mais próximos entre si durante todos os anos é a estação de Cuiaba Miranda com exceção dos anos de 2009 e 2011 onde a estação da Alta Floresta apresenta as melhores comparações. Alguns anos tiveram comportamentos particulares como por exemplo o ano de 2009 onde a estação de Cuiaba Miranda não demonstrou um bom resultado no sensor OMI como nos demais anos. O ano de 2016 foi o único onde os dados de reanálise do MERRA-2 obtiveram os melhores resultados em uma das estações (Alta da Floresta). Já nos resultados do ano de 2019 não temos a estação de Ceilap RG e com isso observamos uma diferença nos resultados. Em comparação direta das médias anuais dos sensores e do modelo com as observadas da AERONET, o OMI é o que possui valores mais próximos aos observados. Em relação aos valores mais distante em Cuiaba Miranda ocorre no sensor MODIS, e em Alta Floresta nos dados de reanálise do MERRA-2.

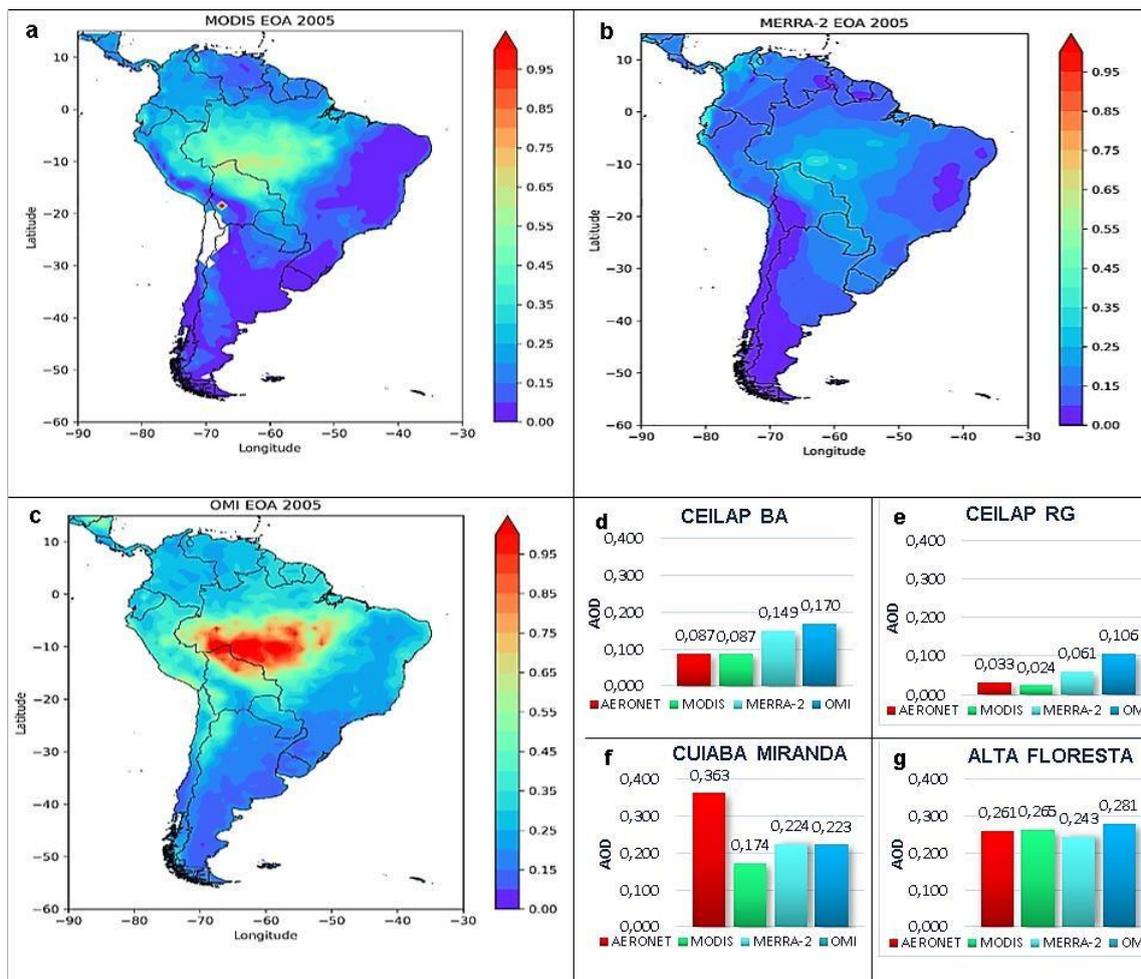


Figura 12 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2005 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observados nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

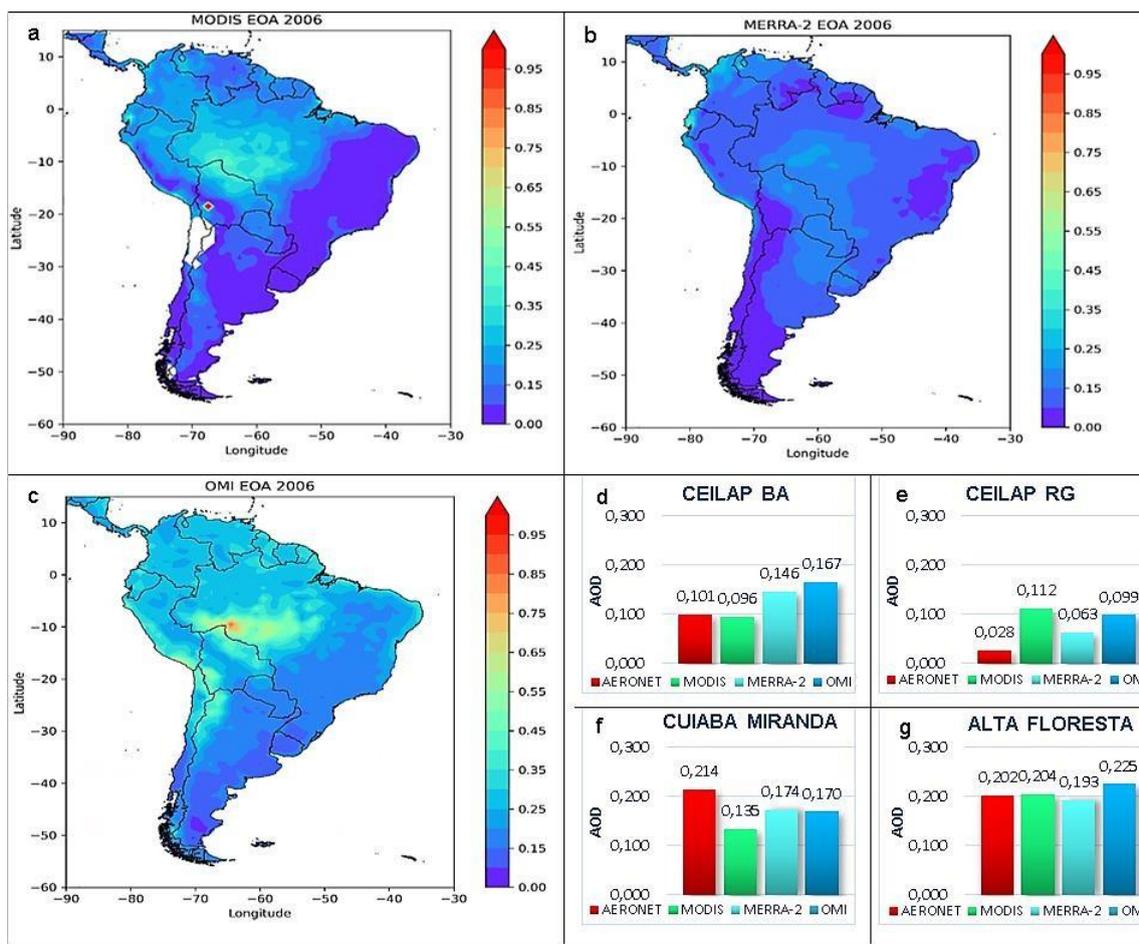


Figura 13 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2006 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observados nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

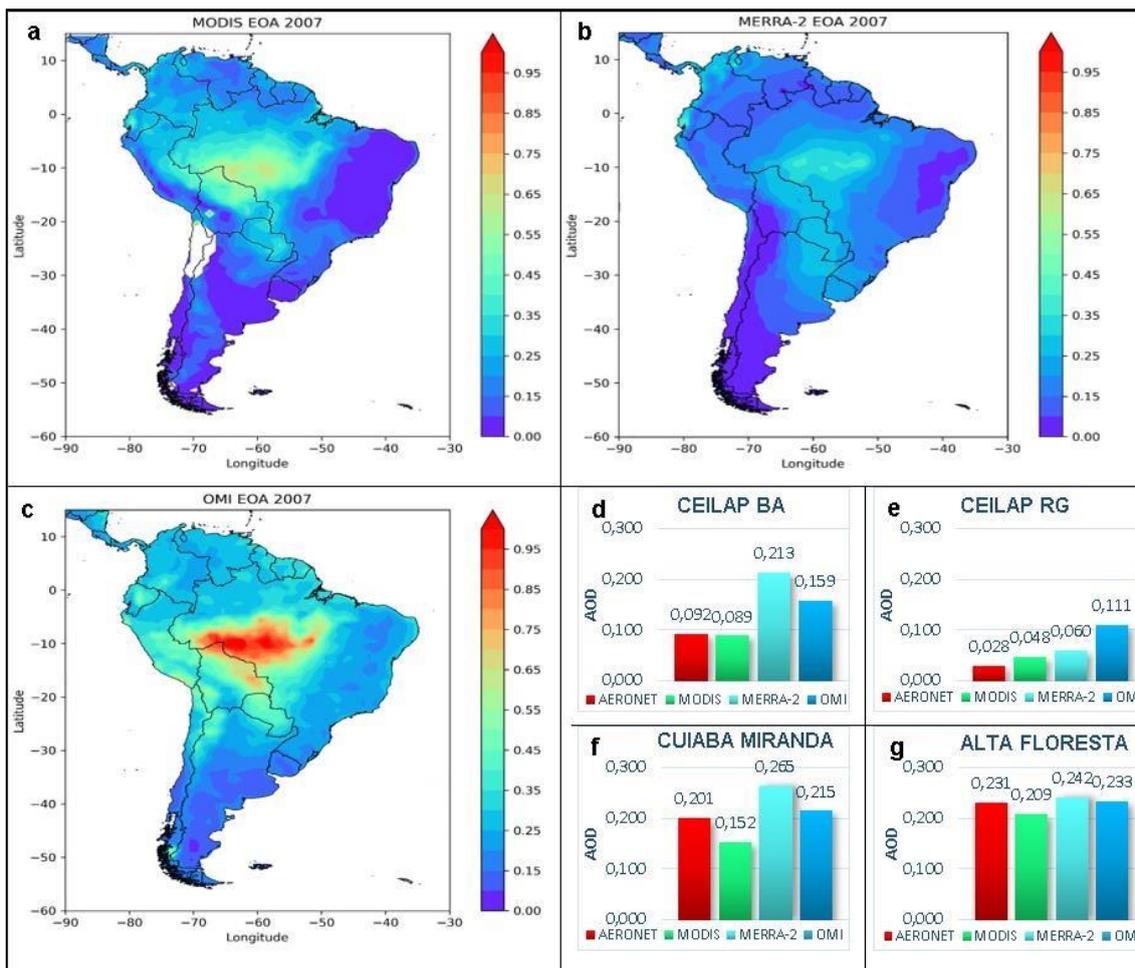


Figura 14 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2007 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

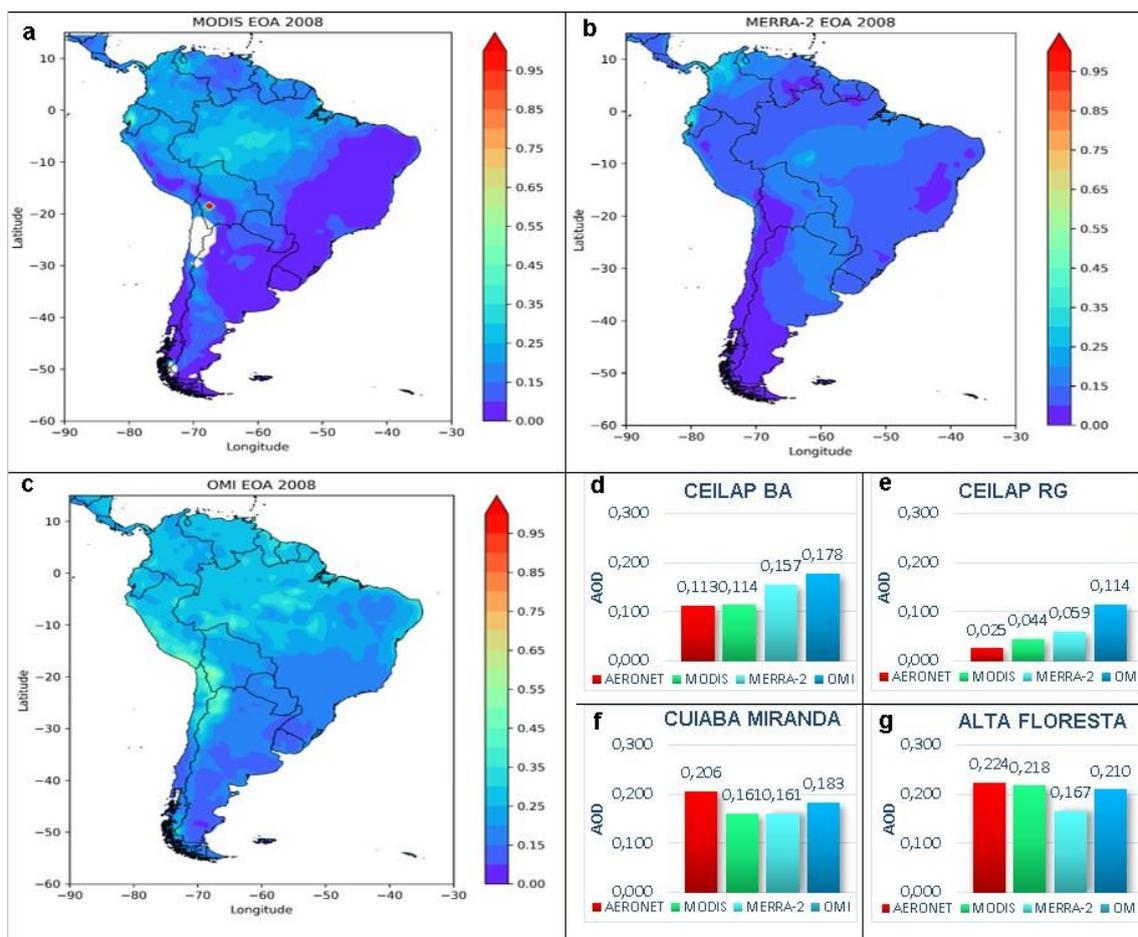


Figura 15 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2008 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

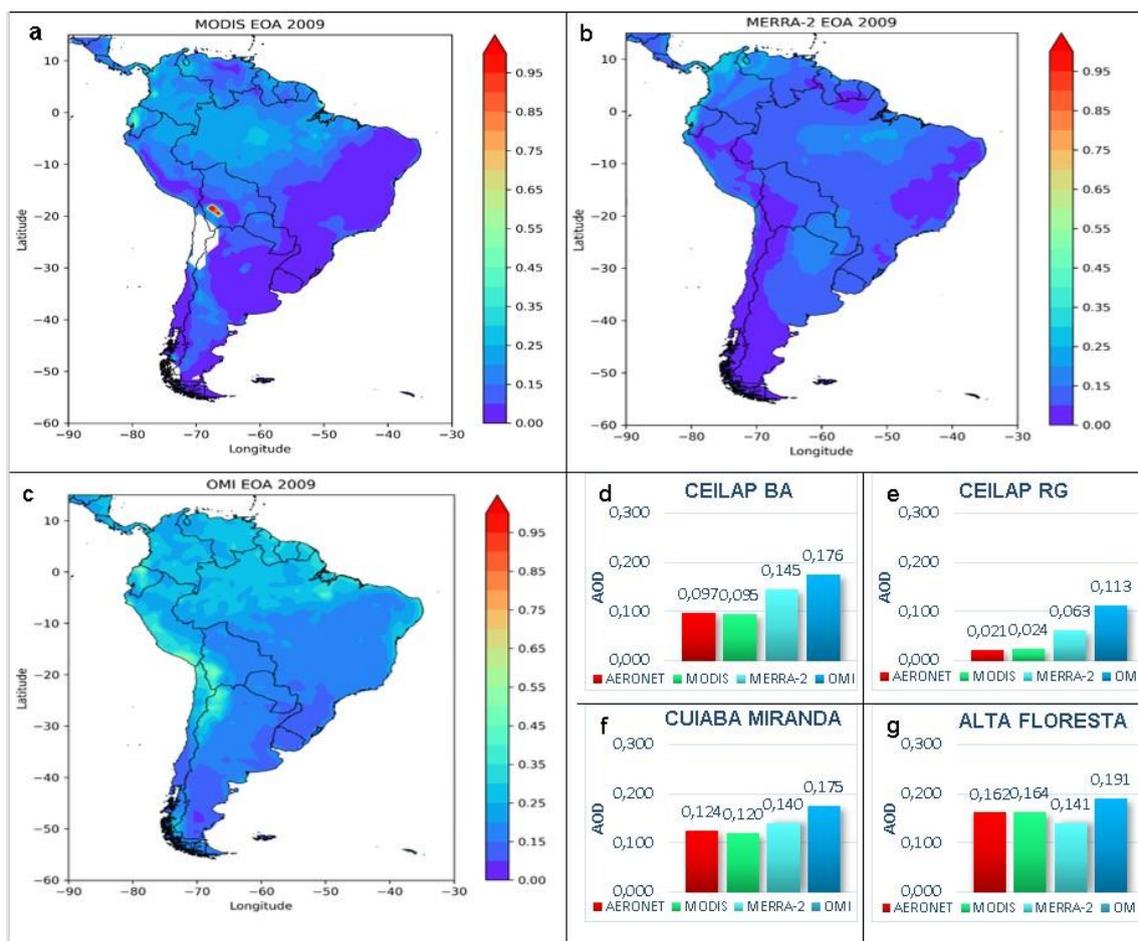


Figura 16 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2009 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

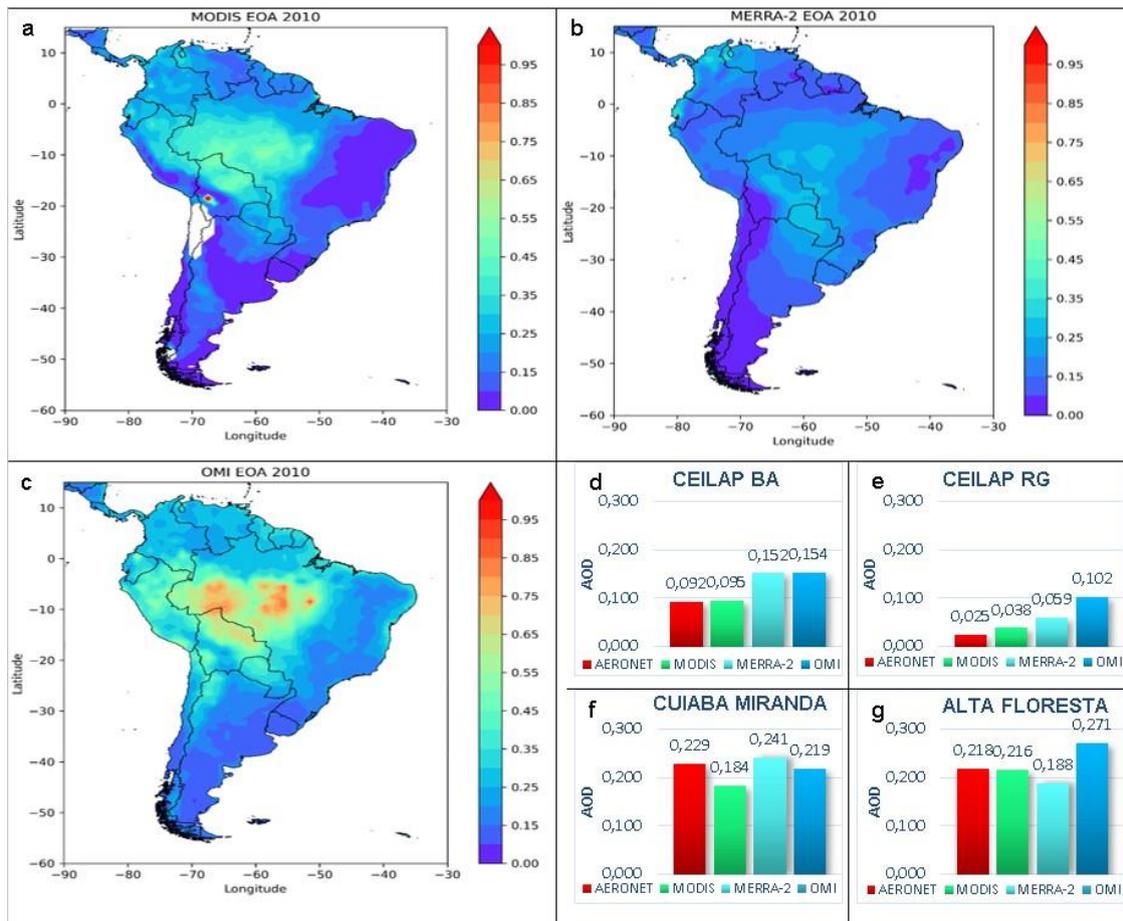


Figura 17 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2010 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

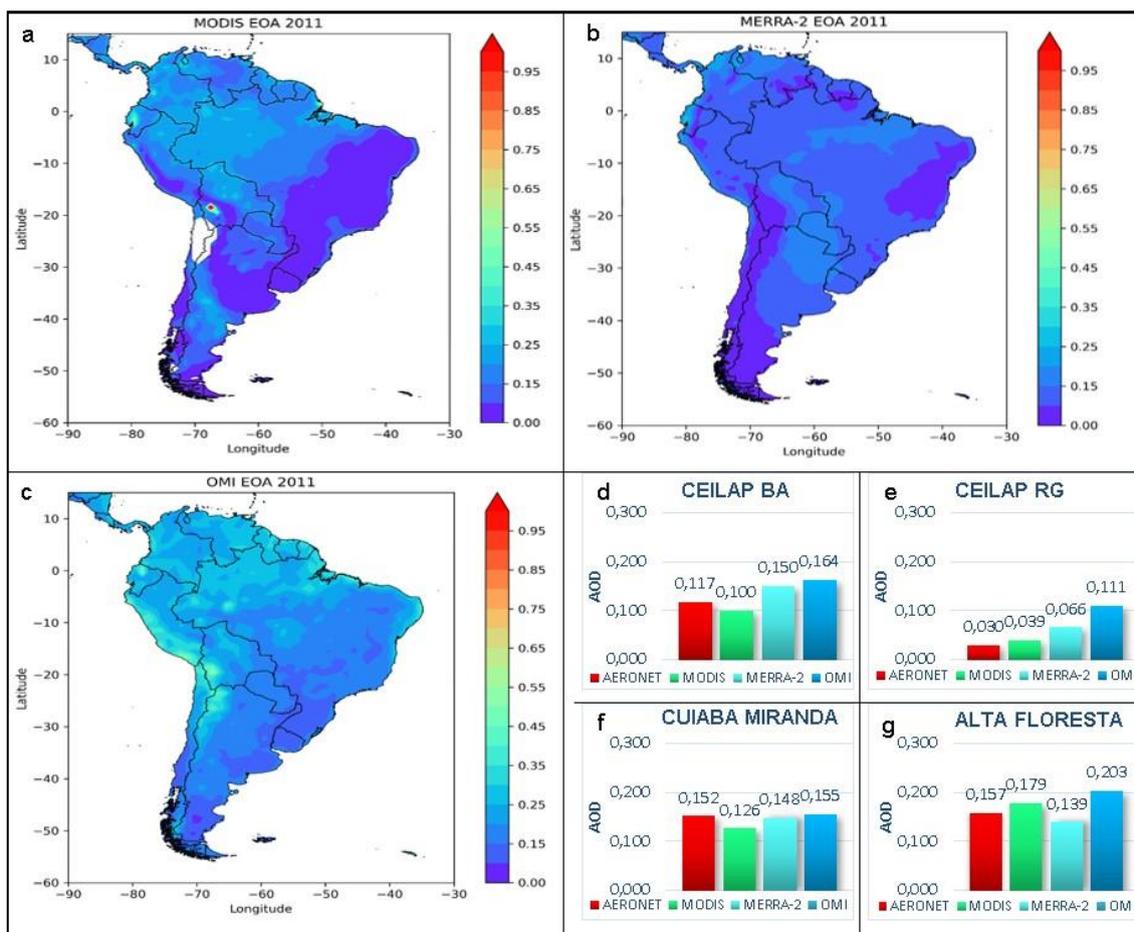


Figura 18 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2011 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

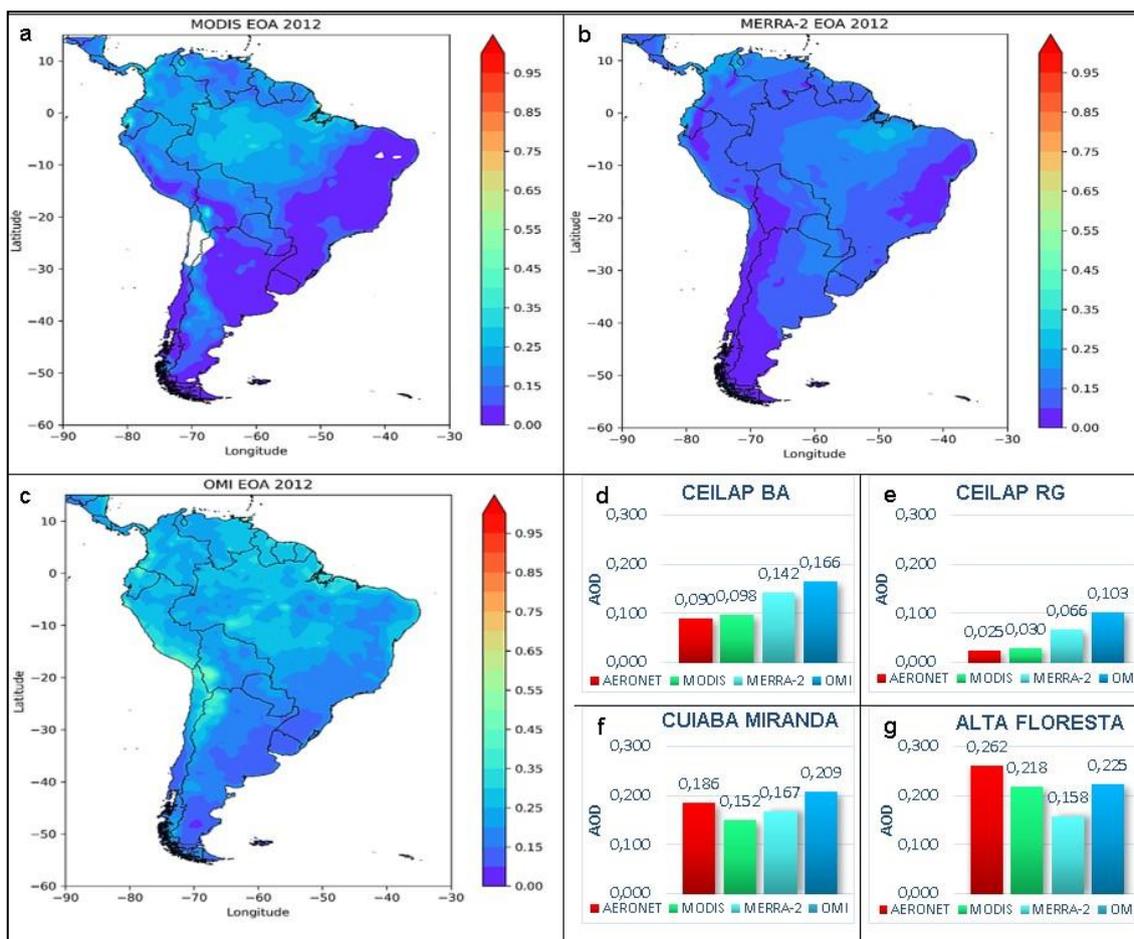


Figura 19 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2012 do sensor MODIS (a), dos dados de reanalise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

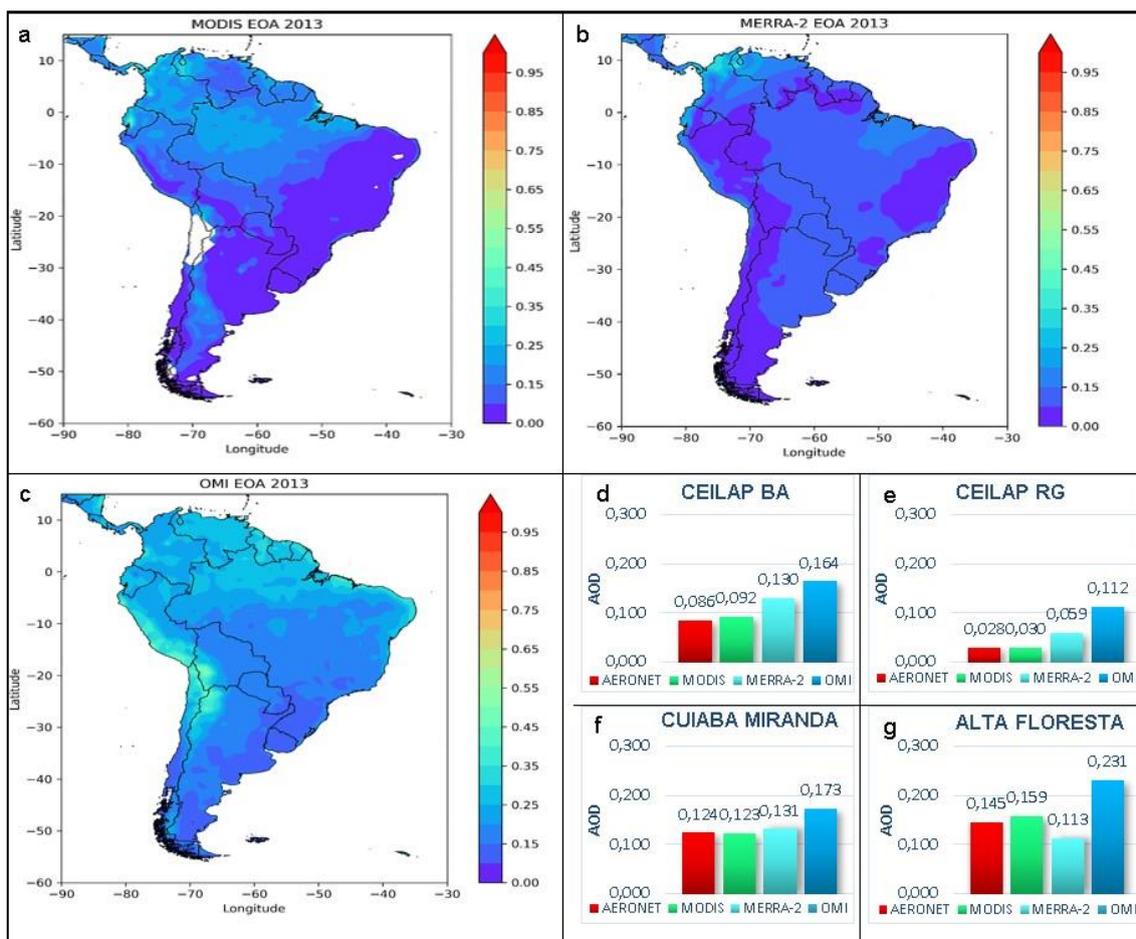


Figura 20 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2013 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

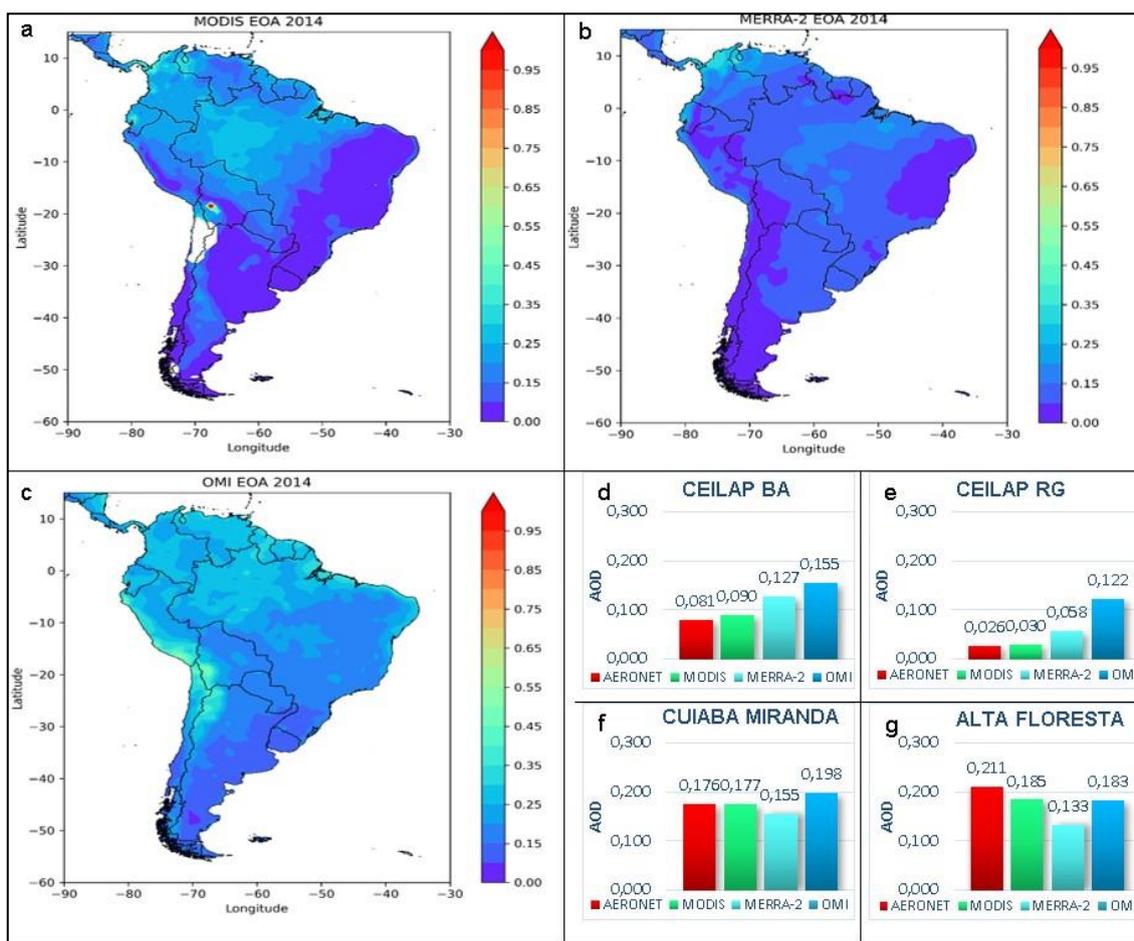


Figura 21 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2014 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

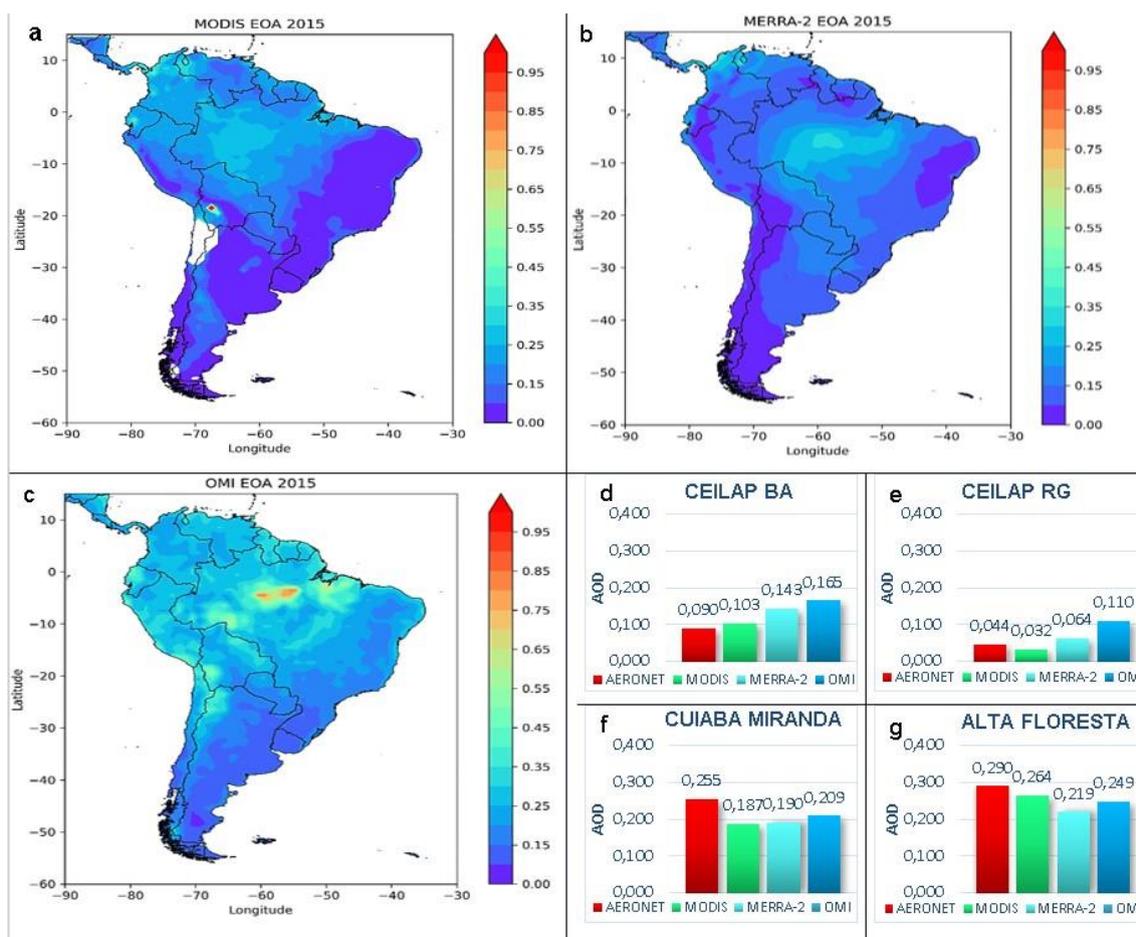


Figura 22 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2015 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

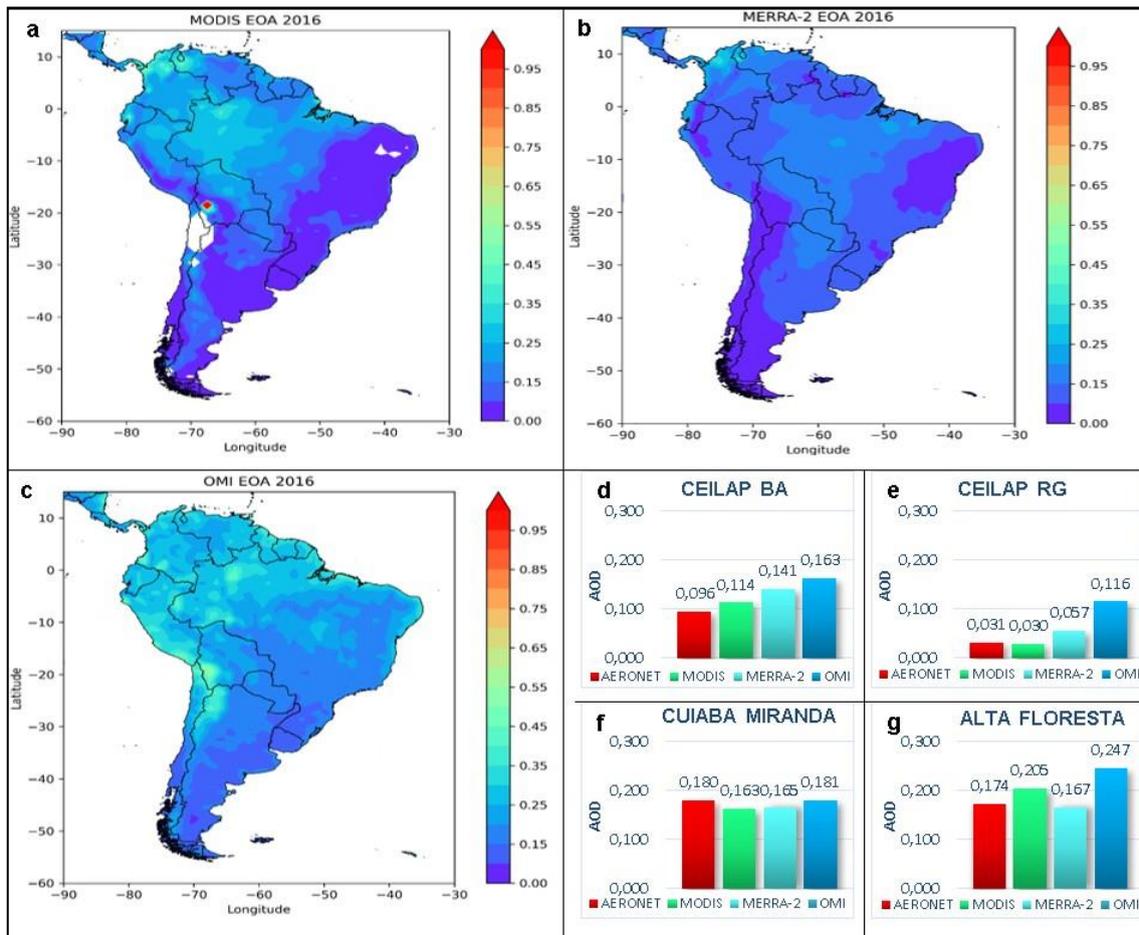


Figura 23 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2016 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

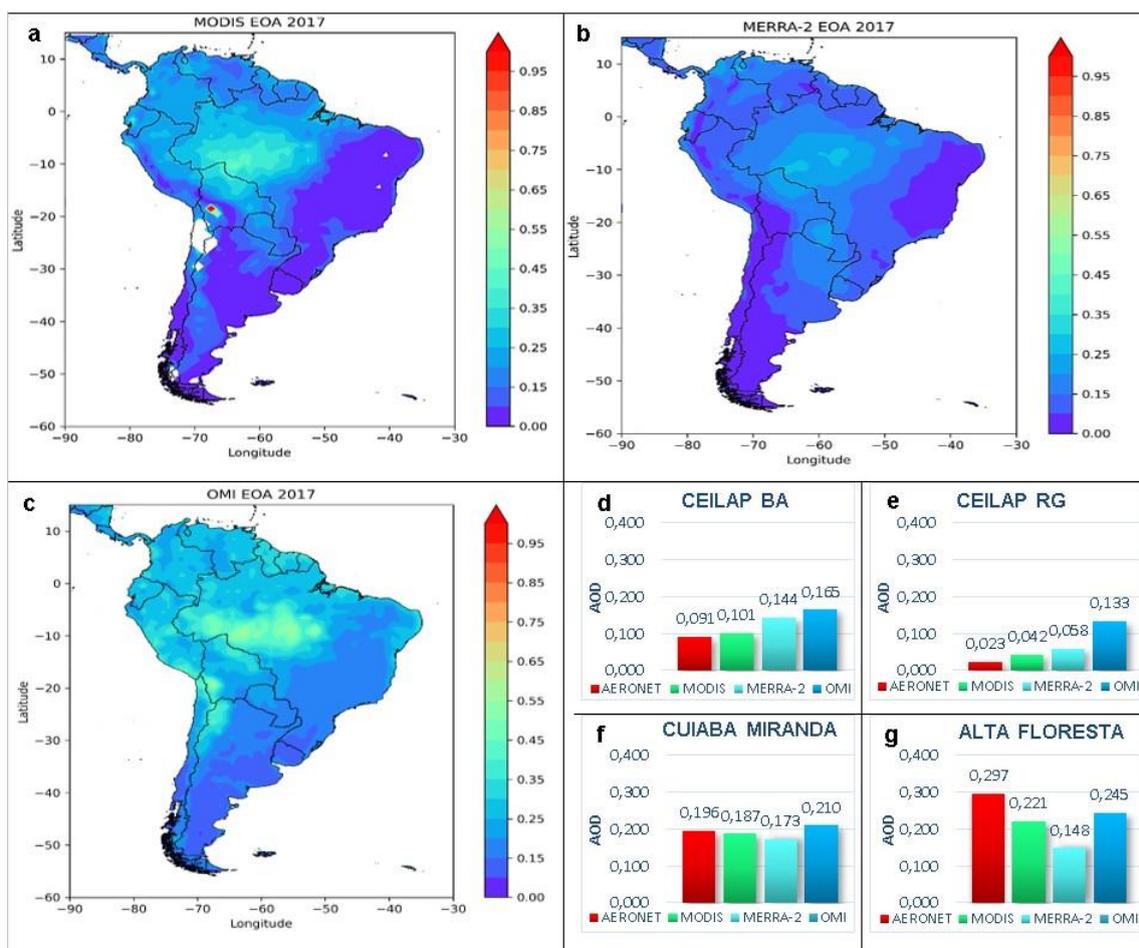


Figura 24 - Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2017 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

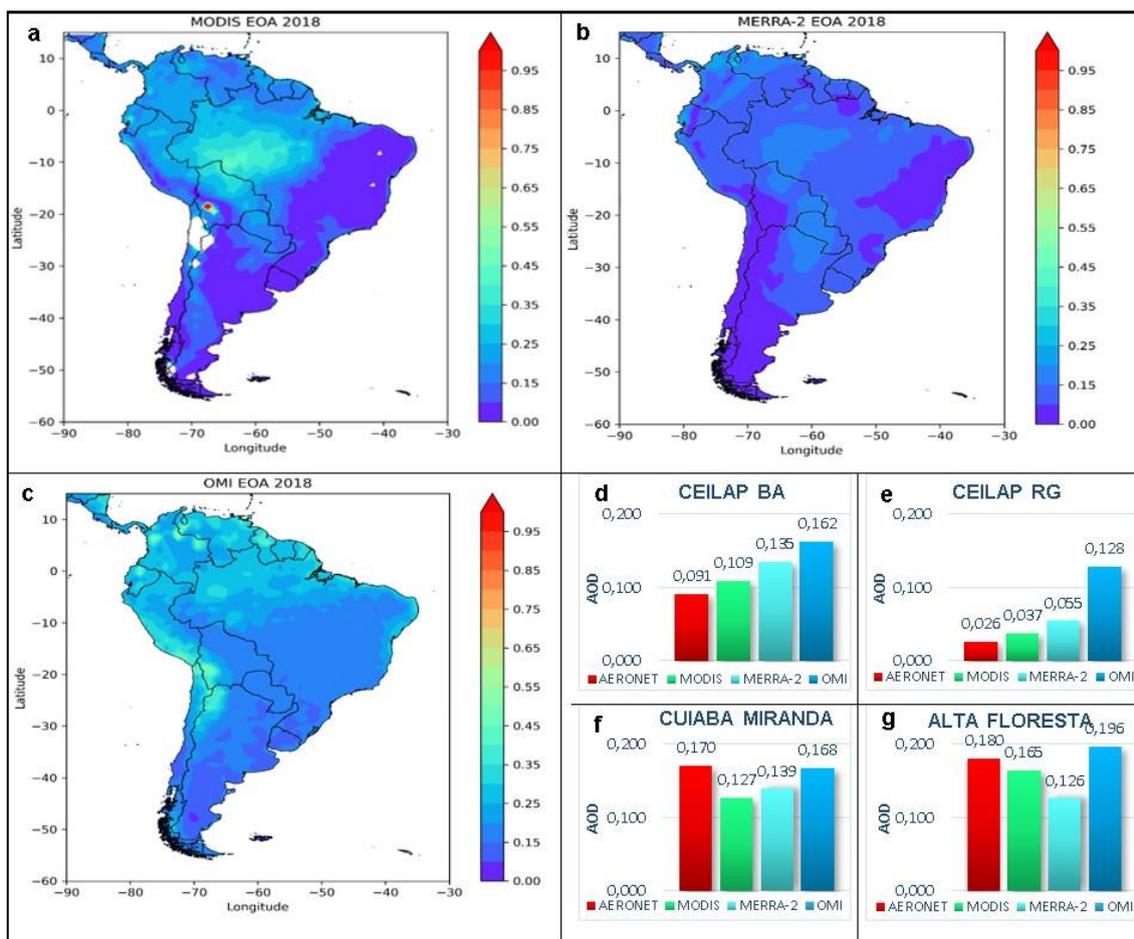


Figura 25- Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2018 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

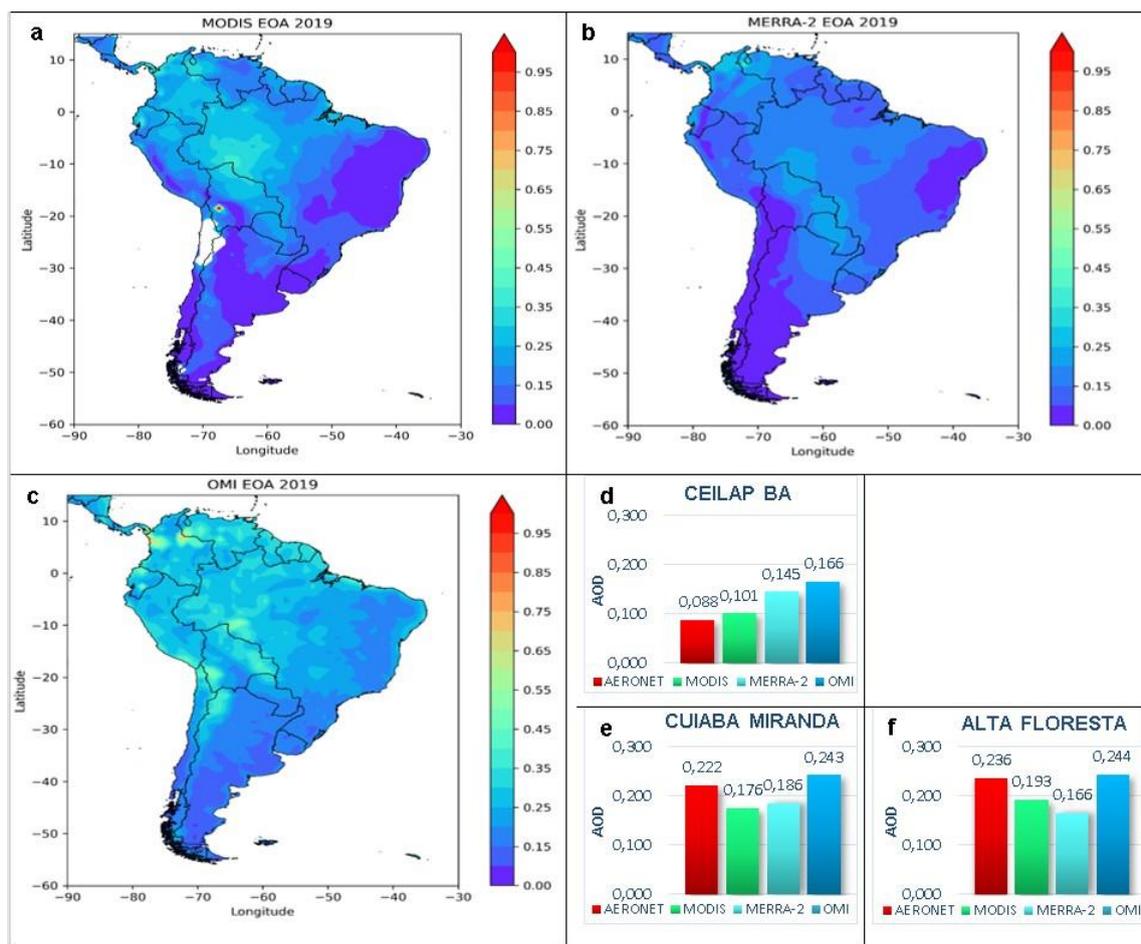


Figura 26- Médias anuais da espessura ótica dos aerossóis no ano de 2019 do sensor MODIS (a), dos dados de reanálise MERRA-2 (b), o sensor OMI (c) e os Histogramas de comparação das médias anuais dos dados de sensoriamento remoto e do modelo com os dados observado nas estações da AERONET: Ceilap BA (d), Ceilap RG(e), Cuiaba Miranda(f) e Alta Floresta(g).

5.16 Análise da média mensal do período de 2005 a 2019

Nas figuras 26- 29 são observadas as médias mensais de EOA no período de 2005 a 2019 para região da América do Sul segundo os dois sensores a bordo de satélites (MODIS e OMI) e os dados de reanálise MERRA-2. O padrão apresentado são valores mais baixos durante o ano (exceto pela região dos Andes onde observamos valores entre 0,55 a 0,85 durante todos os meses no sensor OMI). Entre o mês de agosto e o mês de novembro acontece uma mudança significativa nos valores possivelmente devido aos fatores anteriormente citados (anomalias negativas durante a estação chuvosa, desmatamento e maior ocorrência de queimadas). A maior dentre as médias mensais analisadas se encontra no mês de setembro com valores superiores a 0,95 nos sensores e próximos a 0,85 para os dados de reanálise, em toda a área em que se estende do centro-oeste/Norte do Brasil até a Bolívia.

O padrão dos dados de EOA apresentados do MODIS é muito parecido com o do OMI com o mesmo período de altos valores começando em agosto e terminando em novembro. Destaca-se o período que se encontra entre o mês de fevereiro e o mês de abril com valores relativamente mais baixos (entre 0,55 e 0,65) na região norte do continente sul-americano (Peru, Colômbia e Venezuela) e os altos valores encontrados num ponto específico na Bolívia durante todo o ano, possivelmente devido a erro do sensor.

Nos dados de reanálise do MERRA-2 o mesmo padrão se repete com menor intensidade que os resultados dos sensores a bordo de satélites, principalmente quando comparado com os dados do sensor MODIS. O período entre fevereiro e abril apresenta valores entre 0,45 e 0,55 na região norte do continente sul-americano (Peru, Colômbia e Venezuela).

Apesar dos padrões serem todos parecidos, os valores apresentados são bem diferentes. Os valores estimados pelo sensor OMI são bem mais altos que os demais analisados, já os do MERRA-2 são os mais baixos encontrados. Porém, esses resultados não invalida os dados de reanálise, pois, seus resultados são bem próximos do sensor MODIS. Também são observados pontos de divergências entre as 3 fontes de dados como por exemplo o ponto de alto valores na Bolívia no sensor MODIS ou os altos valores do sensor OMI na região dos Andes.

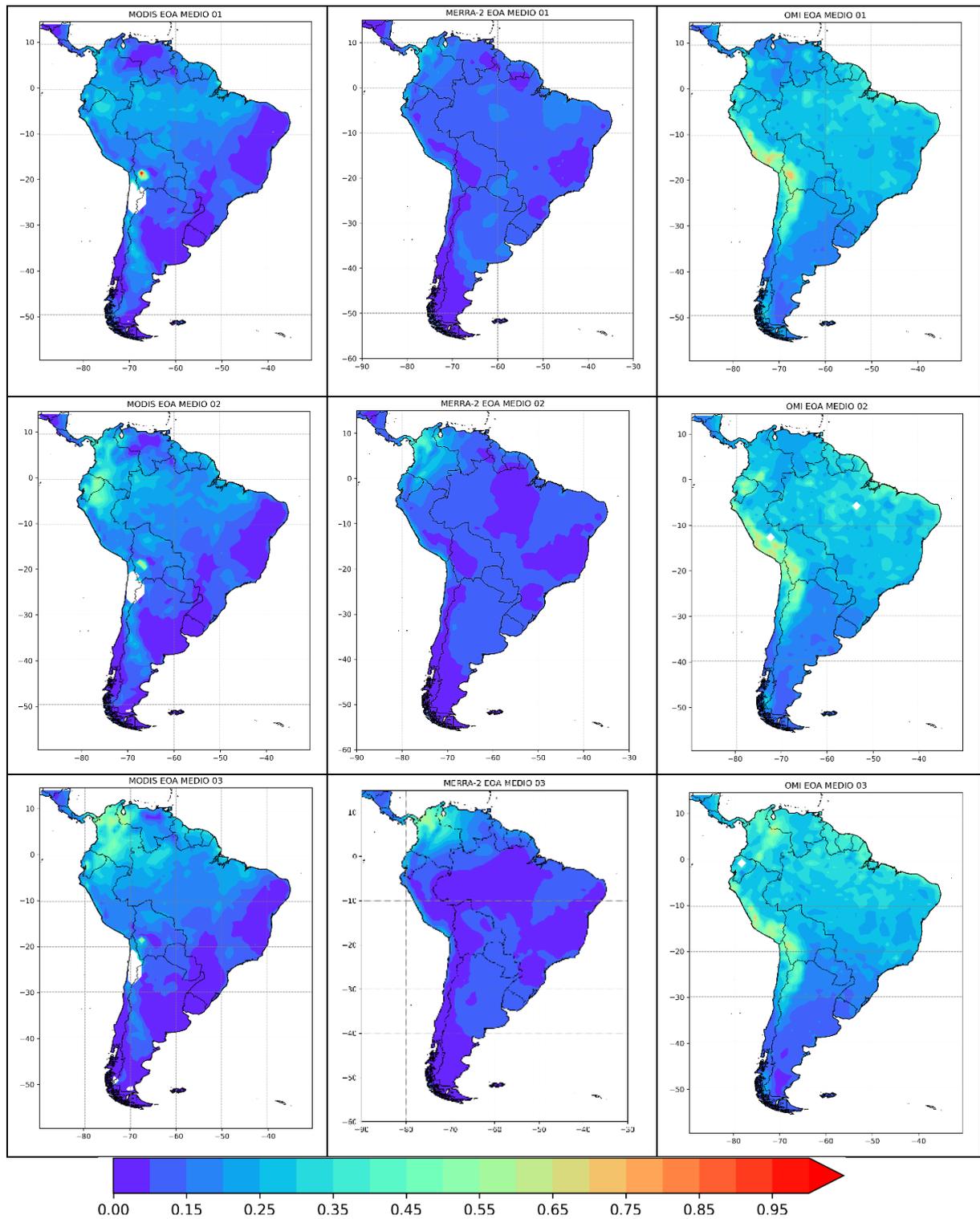


Figura 27 - Médias mensais de espessura ótica dos aerossóis dos sensores MODIS e OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2 na região da América do Sul do mês de janeiro ao mês de março para o todo o período de 2005 a 2019.

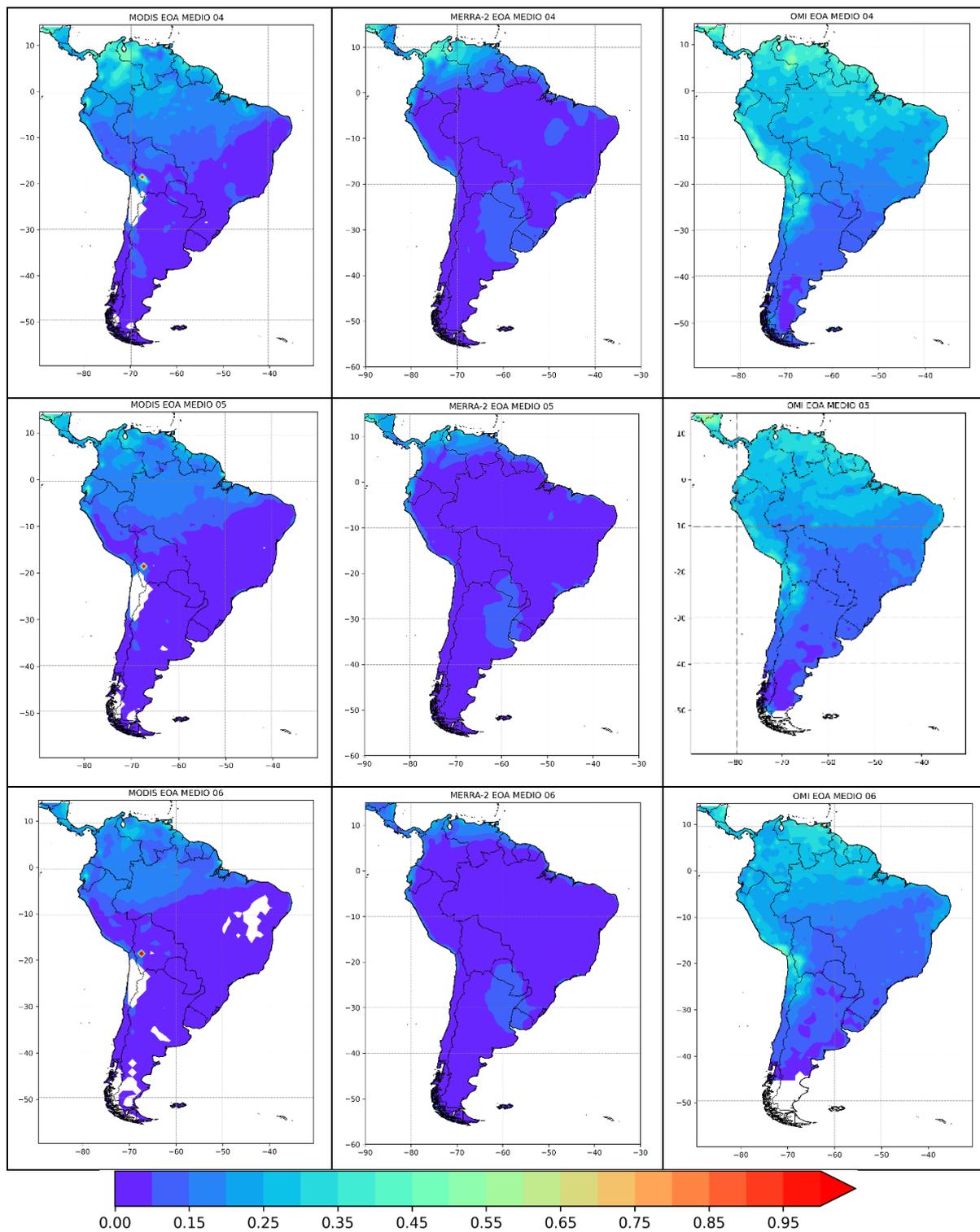


Figura 28 - Médias mensais de espessura ótica dos aerossóis dos sensores MODIS e OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2 na região da América do Sul do mês de abril ao mês de junho para o todo o período de 2005 a 2019.

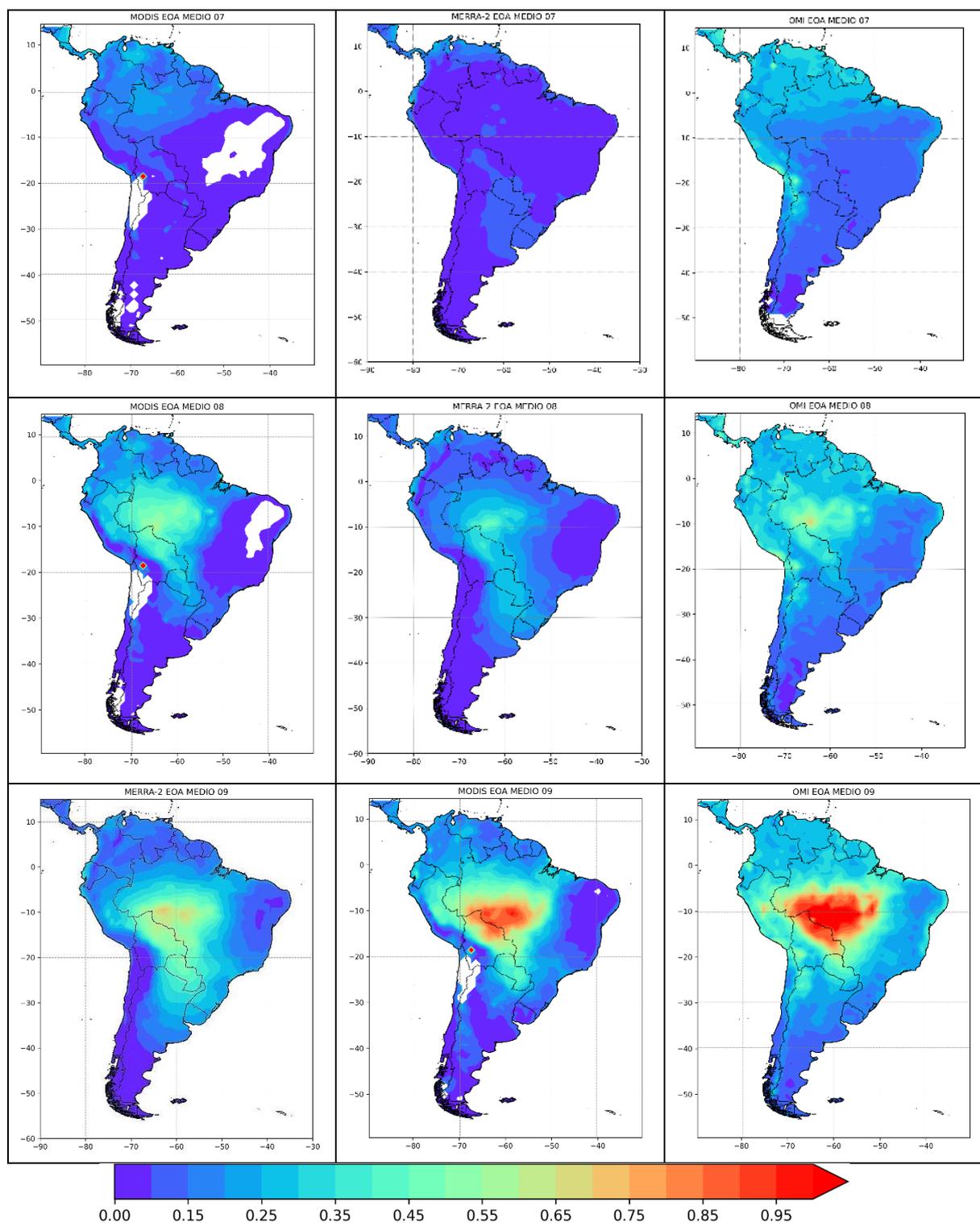


Figura 29 - Médias mensais de espessura ótica dos aerossóis dos sensores MODIS e OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2 na região da América do Sul do mês de julho ao mês de setembro para o todo o período de 2005 a 2019.

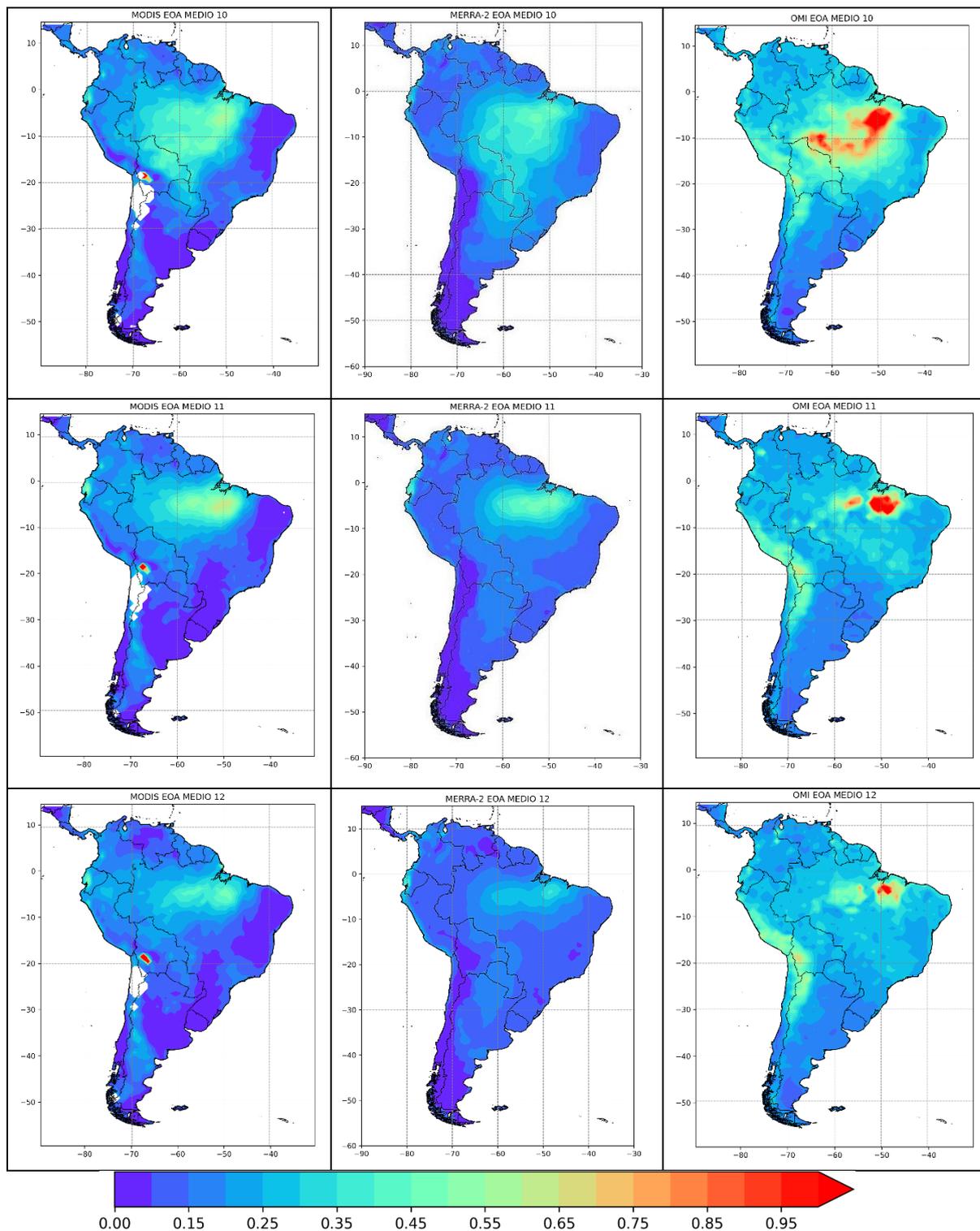


Figura 30 - Médias mensais de espessura ótica dos aerossóis dos sensores MODIS e OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2 na região da América do Sul do mês de outubro ao mês de dezembro para o todo o período de 2005 a 2019.

5.17 Análise anual dos sensores MODIS e OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2

Nas figuras a seguir serão analisadas quatro series temporais: as médias anuais dos dados observados nas torres da AERONET para as estações selecionadas (Alta Floresta, Ceilap BA, Ceilap RG e Cuiaba Miranda), médias anuais dos sensores MODIS, OMI e dos dados de reanálise do MERRA-2 junto ao BIAS, o RMSE e coeficiente de correlação de Pearson (R). As quatro estações foram escolhidas com base no período utilizado para este trabalho (2005 a 2019) sendo as demais estações dentro da região do estudo não utilizadas pelas falhas de dados presentes neste período.

Na figura 30 pode-se analisar a comparação das fontes de dados (MODIS, OMI e MERRA -2) com dados da estação de Ceilap BA. Ao observar os resultados percebe-se que o sensor MODIS tem o melhor resultado dentre as 3 fontes de dados, segue o padrão dos dados do observado, com exceção do ano de 2011, quando o sensor não reflete o observado pelos dados da AERONET. Identifica-se pelos dados da estação da AERONET o valor máximo de 0,117 (2011) e mínimo de 0,081 (2014) e para os dados de sensoriamento remoto do sensor MODIS o máximo de 0,114 (ano de 2008) e mínimo de 0,089 (ano de 2007) com correlação de 0,45 e BIAS de 0,0044.

No caso dos dados de reanálise do modelo MERRA-2 percebe-se que os valores estão sempre superestimados quando comparados com os dados da AERONET. Porém, observa-se um padrão entre os dados do modelo e da estação da AERONET com exceção do ano de 2007 onde os dados divergem em comparação a todos os outros. O valor máximo é de 0,213 (2007) e mínimo de 0,127 (2014) a correlação é de 0,2 com BIAS de 0,053 e RSME de 0,003.

O sensor OMI, apesar de possuir um comportamento anual parecido com o do observado pela AERONET, indica uma superestimativa ainda maior que o MERRA-2 ao longo dos anos (2007 onde MERRA-2 possui valores mais altos). Sendo o valor máximo de 0,178 (2008) e mínimo de 0,154 (2010) a correlação é de 0,43, BIAS de -0,070 e o RMSE é de 0,005. Na figura 31 podemos analisar a comparação das fontes de dados com os dados da AERONET obtidos da estação de Alta Floresta. Essa estação é a que apresentou os melhores resultados em relação a comparação aos dados de sensoriamento por satélite e os dados de reanálise. Ao observar os resultados

do sensor MODIS percebe-se um padrão similar aos dados da AERONET, sendo o primeiro representando com eficiência os dados observados. Tem-se para os dados da AERONET o valor máximo de 0,297 (2017) e mínimo de 0,145 (2013) e valor máximo é de 0,264 (2015) e mínimo de 0,159 (2013) para o sensor MODIS com correlação 0,80 (a melhor entre os resultados apresentados), BIAS de -0,011 e RSME de 0,0009.

Ao observar os resultados do modelo MERRA-2 percebe-se um padrão, porém os dados de reanálise estão sempre subestimados em relação aos resultados do sensor MODIS e ao observado, com exceção do ano de 2017 onde os dados de reanálise divergem do observado. No entanto, no restante da série temporal apresenta eficiência em apresentar o padrão dos dados observados, apesar da subestimativa existente em todos os anos. O valor máximo encontrado para a AERONET é de 0,242 (2007), mínimo de 0,113 (2013) e correlação de 0,50, BIAS de -0,046 e RMSE de 0,003.

Nos resultados do OMI percebe-se um padrão, apesar de do sensor superestimar em todos os anos, com o sensor conseguindo representar com muita eficiência os dados observados. O valor máximo de 0,271 (2010) e mínimo de 0,183 (2014) com correlação de 0,48, BIAS de 0,012 e RSME de 0,0017.

Na figura 32 podemos analisar a comparação das 3 fontes de dados com a estação de Ceilap RG da AERONET sendo essa estação a que possui os piores resultados em comparação aos dados de sensoriamento e o de reanálise. Percebe-se no sensor MODIS um padrão distinto do observado, a variação é maior ocorre no ano de 2006 onde o sensor superestima o valor do observado tendo assim o pior resultado em comparação as outras fontes de dados neste ano específico. Tem-se para o observado valor máximo de 0,044 (ano de 2015) e mínimo de 0,023 (ano de 2009) e máximo de 0,112 (ano de 2006) e mínimo de 0,024 (ano de 2009) para os dados de sensoriamento remoto com uma correlação de 0,09, um BIAS de 0,0051 e um RSME de 0,00011,

Nos resultados da comparação dos dados de reanálise com a torre de Ceilap RG, essa estação é a que possui os piores resultados em comparação aos dados de reanálise. Percebe-se que o MERRA-2 consegue representar pouco o comportamento dos dados observados, superestimando toda a série.

O valor máximo é de 0,066 (ano de 2011 e 2012) e mínimo de 0,055 (ano de 2018) com uma correlação de 0,15, BIAS de 0,030 e RSME de 0,001,

No caso do sensor OMI os resultados possuem superestimativa maior em comparação aos do MERRA-2 fazendo deste o pior resultado em relação a torre de Ceilap RG, sendo essa a estação que possui os piores resultados em comparação aos dados analisados. O valor máximo é de 0,133 (ano de 2017) e mínimo de 0,099 (ano de 2006) com uma correlação de 0,16, BIAS de 0,079 e RSME de 0,00011.

Na figura 33 podemos analisar a comparação das três fontes de dados com a torre de Cuiaba Miranda. Ao observar os resultados percebe-se um padrão entre os sensores a bordo dos satélites e os dados de reanálise conseguindo representar com eficiência o comportamento dos dados observados. Tem-se para os dados da AERONET valor máximo de 0,363 (ano de 2005) e mínimo de 0,124 (ano de 2009) e máximo de 0,187 (ano de 2017) e mínimo de 0,120 (ano de 2009) para os dados de sensoriamento remoto do sensor MODIS, com uma correlação de 0,62, um BIAS de -0,0046 e um RSME de 0,004,

Ao observar dados de reanálise do MERRA-2 percebe-se um padrão, os dados conseguem representar com certa eficiência o observado, com exceção de 2015 onde os valores são superestimados pelo modelo. O valor máximo é de 0,187 (ano de 2017) e mínimo de 0,120 (ano de 2009), com uma correlação de 0,64, um BIAS de -0,022, um RSME de 0,002.

No caso do sensor OMI, percebe-se o pior dos resultados em relação ao observado comparado as outras duas fontes de dados, tendo em vista que possui os piores valores de correlação em duas das quatro torres observadas (Alta Floresta com $R=0,48$ e Cuiaba Miranda com $R=0,16$). O valor máximo é de 0,243 (ano de 2019) o mínimo é de 0,155 (ano de 2011) com uma correlação de 0,19, um BIAS de -0,004 e um RSME de 0,002.

Observando os gráficos de dispersão (figuras: 31, 33, 35 e 37) podemos notar que os melhores resultados são os do sensor MODIS nas estações de Ceilap BA ($R=0,45$) e Alta Floresta ($R=0,80$) e no MERRA-2 nas estações de Ceilap RG ($R=0,16$) e Cuiaba Miranda ($R=0,64$). A reta em trajetória ascendente indica que essas correlações são positivas, ou seja, quando aumenta o valor do sensor também aumenta o do observado pela estação correspondente da AERONET. A estação de Ceilap RG é a que possui as piores correlações. Já a

estação com as melhores correlações é a da Alta Floresta para o MODIS ($R = 80$), MERRA-2 ($R = 53$) e para o sensor OMI ($R = 48$). Ao analisarmos trabalhos como o de Misra et al. (2014) que comparou os valores da EOA do sensor MODIS com fotômetro solar (MICROTOPS) em Ahmadabad na Índia (Lat: 23,03 e Lon: 72,62) para o período de 2002 a 2005 constatou apenas uma fraca correlação ($R = 0,43$) e Hoelzemann et al. (2009) que realizaram validação do EOA do MODIS usando dados da AERONET em vários locais na América do Sul e encontrou uma correlação de $R > 0,5$ em média, pode-se dizer que a correlação do sensor MODIS na estação de Alta floresta mostrou-se satisfatória.

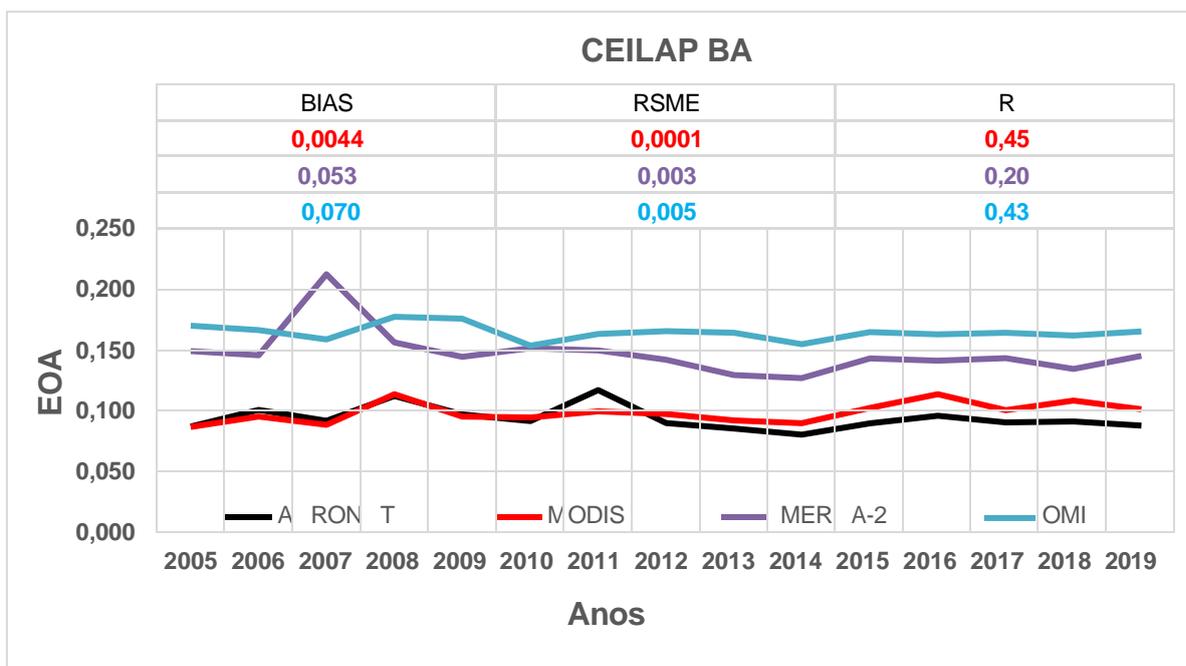


Figura 31 - Comparação entre MODIS, OMI e MERRA-2 com os dados observados na AERONET para o período de 2005 a 2019 na estação de CEILAP BA. No Painel consta o “BIAS”, o “RMSE” e o coeficiente de correlação (R) do MODIS (vermelho), do MERRA-2 (roxo) e do OMI (azul) em relação aos dados da AERONET.

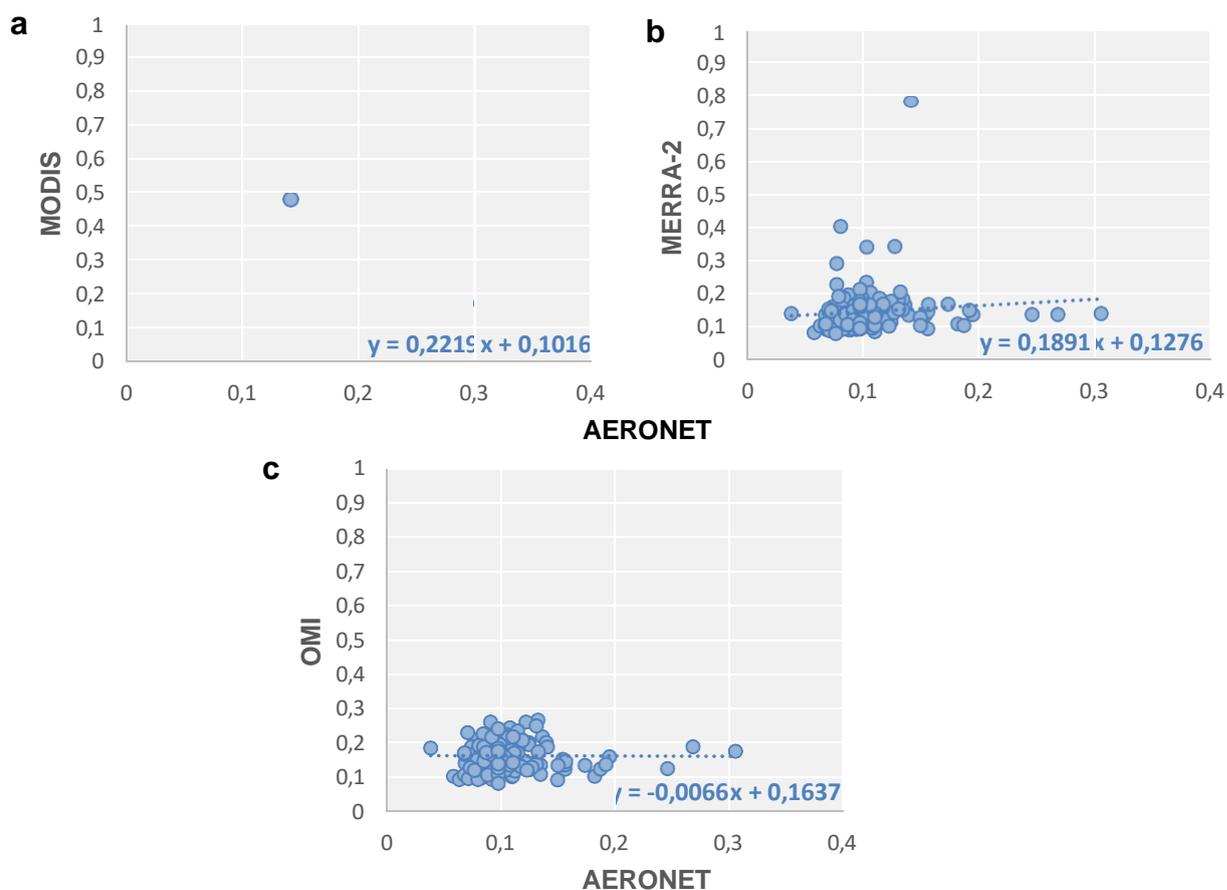


Figura 32 - Gráfico de dispersão entre a espessura ótica dos aerossóis do MODIS(a), do MERRA-2(b) e do OMI(c) com os dados da estação de Ceilap BA da AERONET.

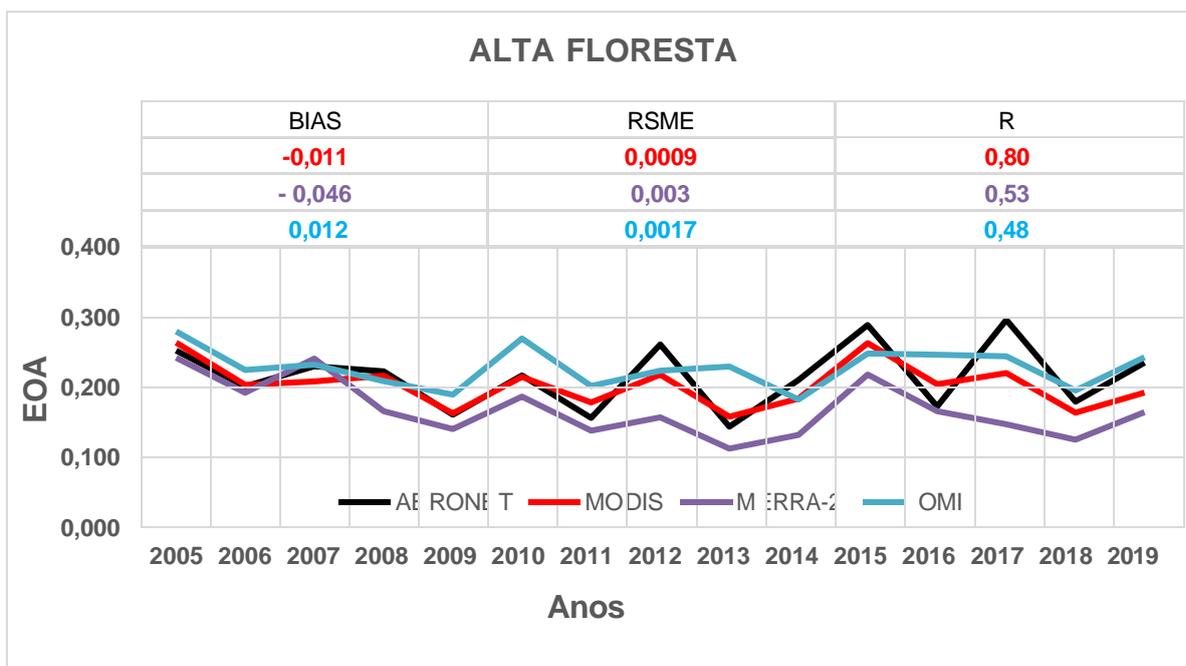


Figura 33 - Comparação entre MODIS, OMI e MERRA-2 com os dados observados na AERONET para o período de 2005 a 2019 na estação de ALTA FLORESTA. No Painel consta o “BIAS”, o “RMSE” e o coeficiente de correlação (R) do MODIS (vermelho), do MERRA-2 (roxo) e do OMI (azul) em relação aos dados da AERONET.

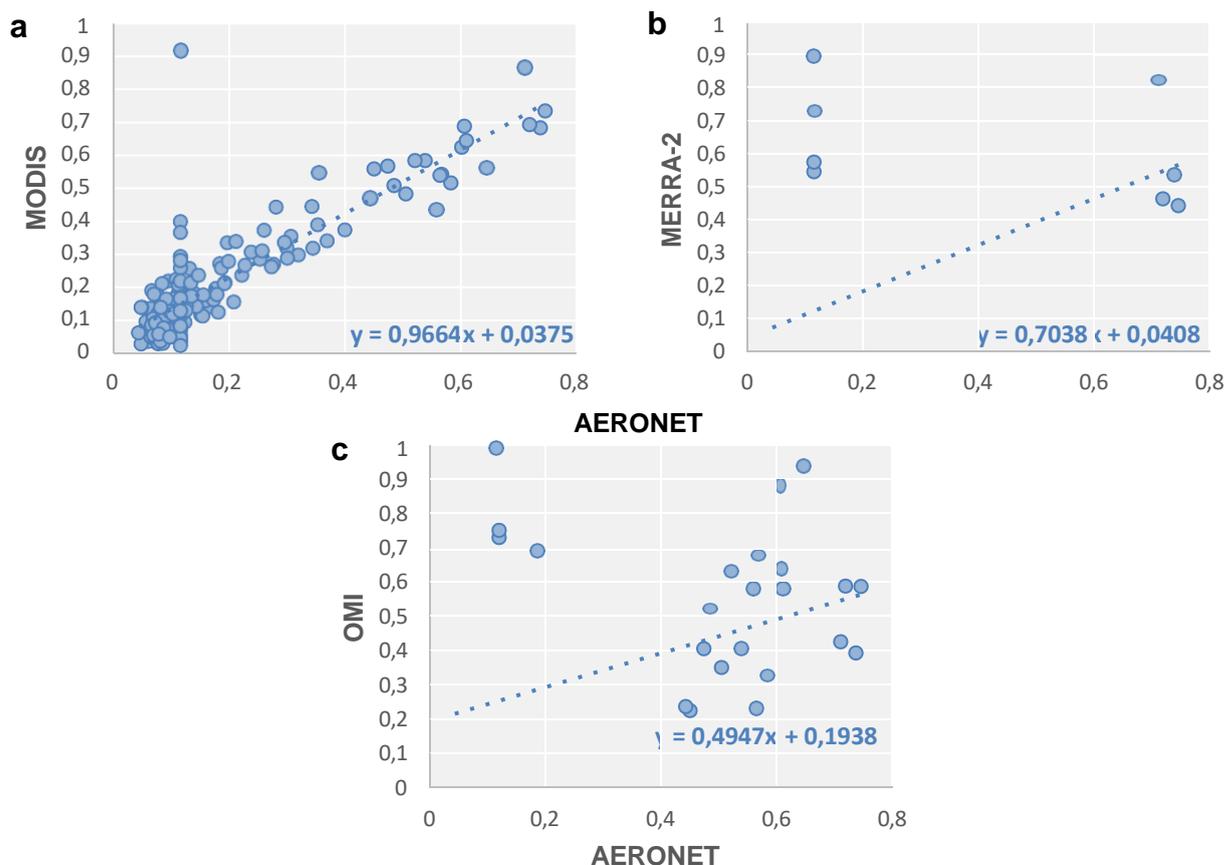


Figura 34 - Gráfico de dispersão entre a espessura ótica dos aerossóis do MODIS(a), do MERRA-2(b) e do OMI(c) com os dados da estação de Alta Floresta da AERONET.

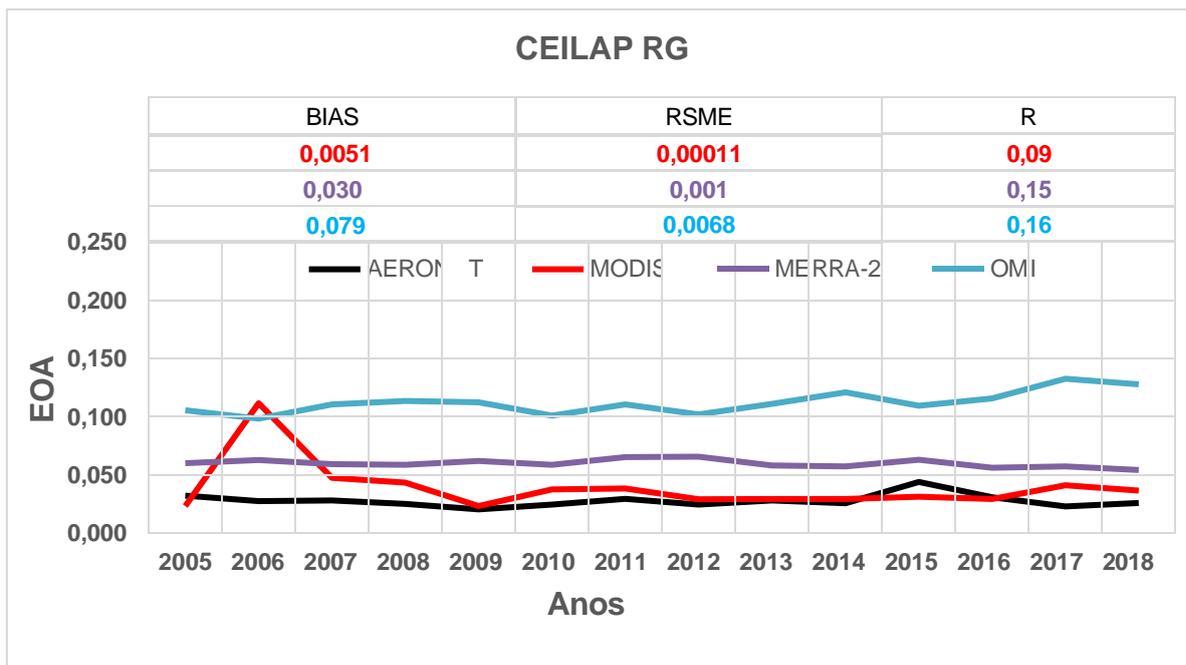


Figura 35 - Comparação entre MODIS, OMI e MERRA-2 com os dados observados na AERONET para o período de 2005 a 2019 na estação de CEILAP RG. No Painel consta o “BIAS”, o “RMSE” e o coeficiente de correlação (R) do MODIS (vermelho), do MERRA-2 (roxo) e do OMI (azul) em relação aos dados da AERONET.

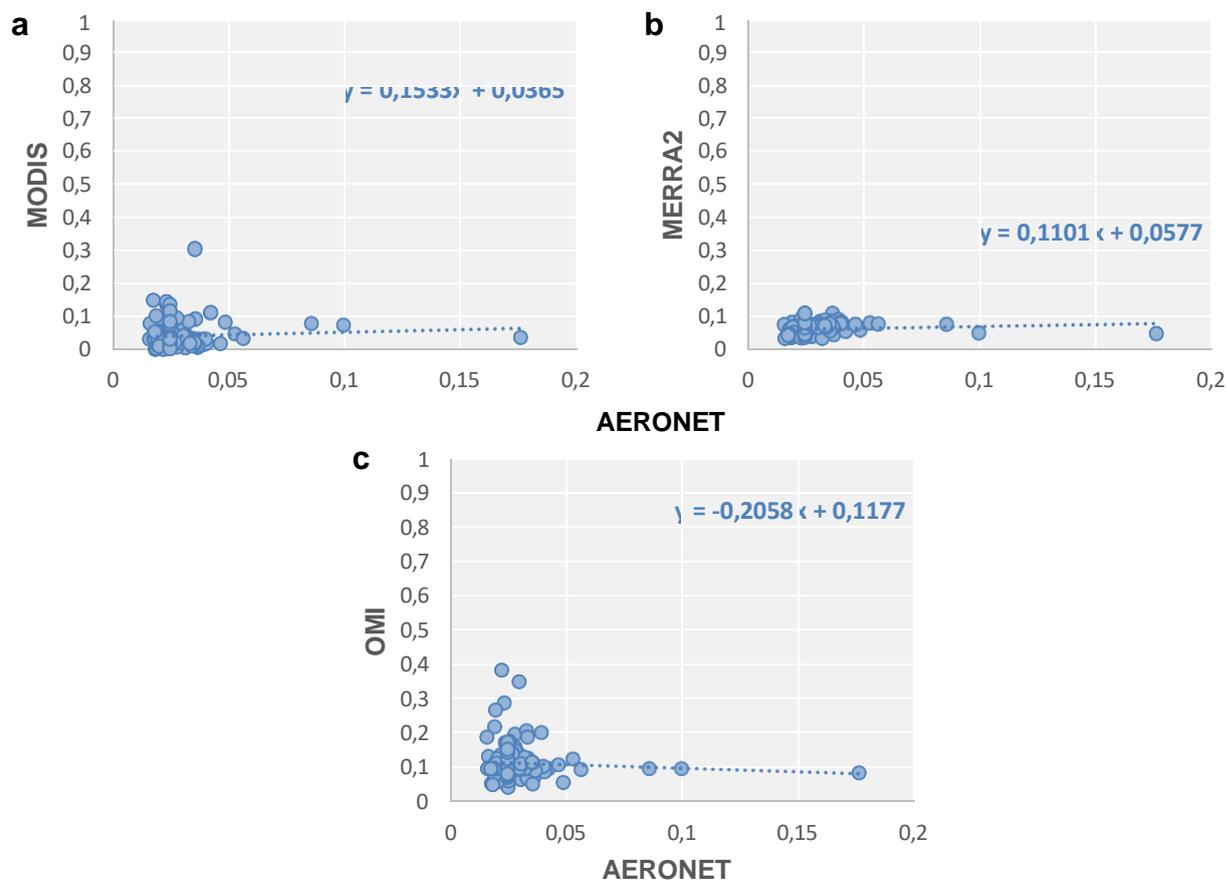


Figura 36 - Gráfico de dispersão entre a espessura ótica dos aerossóis do MODIS(a), do MERRA-2(b) e do OMI(c) com os dados da estação de Ceilap RG da AERONET.

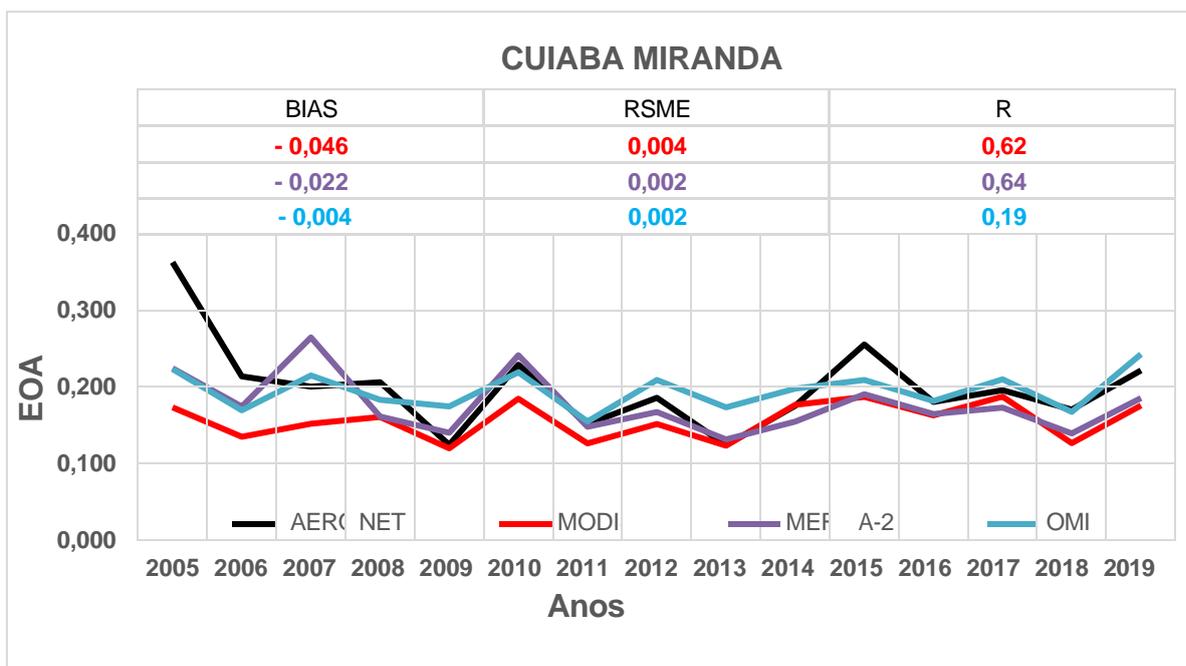


Figura 37. Comparação entre MODIS, OMI e MERRA-2 com os dados observados na AERONET para o período de 2005 a 2019 na estação de CUIABA MIRANDA. No Painel consta o “BIAS”, o “RMSE” e o coeficiente de correlação (R) do MODIS (vermelho), do MERRA-2 (roxo) e do OMI (azul) em relação aos dados da AERONET.

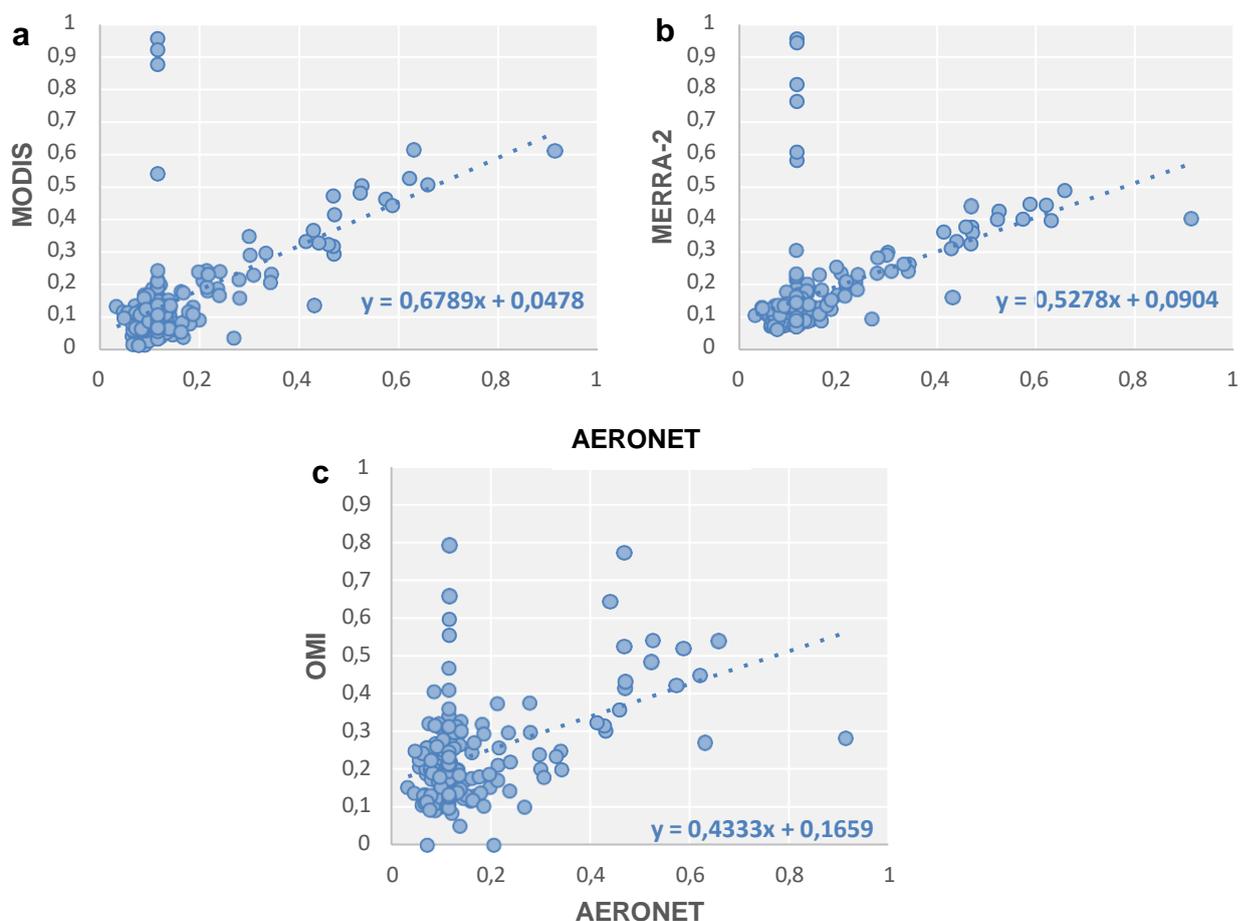


Figura 38 - Gráfico de dispersão entre a espessura ótica dos aerossóis do MODIS(a) do MERRA-2(b) e do OMI(c) com os dados da estação de Cuiaba Miranda da AERONET.

6. CONCLUSÃO

A análise da variabilidade da EOA sobre a América do sul indica que apesar das diferentes características climáticas das sub-regiões existe um comportamento sazonal predominante com altos valores nas estações secas e baixos nas estações chuvosas, estando possivelmente relacionado com a ocorrência de precipitação e consequente focos de queimadas sobre as regiões nas épocas descritas, com exceção da região nordeste que apresenta pouca variação nos valores de EOA ao longo do ano.

Das três fontes de dados utilizadas na comparação com o observado o sensor MODIS obteve destaque ao apresentar os melhores resultados, pois suas correlações foram as que atingiram os melhores valores principalmente na estação da Alta floresta com $R = 0,80$. O sensor OMI obteve duas das piores correlações observadas durante todo o estudo, sempre superestimando os dados das estações. A estação da AERONET onde as três fontes de dados obtiveram as melhores correlações com os dados observados foi a da Alta Floresta, possuindo também com os melhores valores de BIAS (-0,011) e RMSE (0,0009) ambos para o sensor MODIS. Em contrapartida a que obteve os piores resultados foi a estação de CEILAP RG com BIAS de 0,079 e RMSE de 0,0068). Os anos de 2005, 2007 e 2010 apresentaram altos valores de EOA nas regiões da centro-oeste/Norte do Brasil e Norte da Bolívia por conta dos com períodos de seca nas regiões.

Na análise das médias mensais, observa-se padrões semelhantes com os maiores valores sempre ocorrendo sobre as áreas centro-oeste/Norte do Brasil e Norte da Bolívia, com variação da área do seu máximo conforme o mês analisado (geralmente no centro-oeste do Brasil no mês de setembro).

6.1 Sugestões para trabalhos futuro

- Analisar a influência de sistemas meteorológicos específicos atuantes e e seu papel no transporte dos aerossóis.
- Utilizar períodos menores e específicos de dados da AERONET (estação seca x chuvosa, série de 1 ano de dados, etc) para obter a maior quantidade de torres possível para avaliar a qualidade da espessura ótica do OMI, do MODIS e do MERRA-2;
- Observar o comportamento dos aerossóis em outros lugares do mundo com climas distintos utilizando o sensor MODIS por ter demonstrado os melhores resultados.

6.2 Limitações

Pensando nas limitações a maior delas foi a indisponibilidade de uma rede mais ampla e com maior período de medição de fotômetro solar sobre a área analisada. Pois, para o período utilizado a AERONET apenas tinha 4 estações com series com poucas falhas para a região da américa do sul, sendo que uma delas ainda foi adaptada (CEILAP RG) por não possuir o ano de 2019.

7. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, T.T .Distribuições de tamanho, composição química e identificação das fontes do aerossol atmosférico de São Paulo: Um estudo de caso para o inverno de 2003. 2005. Dissertação de Mestrado (DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – DCA)Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, S. M. et al. Source apportionment of atmospheric urban aerosol based on weekdays/weekend variability: evaluation of road re-suspended dust contribution. *Atmospheric Environment*, v. 40, n. 11, p. 2058-2067, 2006.

ALMEIDA, A. M. E. ,Aerossol carbonoso: Contribuição para sua caracterização. 2009. Dissertação de mestrado (Departamento de Ambiente e Ordenamento), Universidade de Aveiro.

ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. *Química Nova*, v. 28, n. 5, p. 859-870, 2005.

ANDRADE, K. M. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. Mestrado em meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

ANDREAE, MEINRAT O.; CRUTZEN, PAUL J. ATMOSPHERIC AEROSOLS: BIOGEOCHEMICAL SOURCES AND ROLE IN ATMOSPHERIC CHEMISTRY. *SCIENCE*, V. 276, N. 5315, P. 1052-1058, 1997.

ANDREAE, M.O. (1983). Soot carbon and excess fine potassium: Long-range transport of combustion-derived aerosols. *Science* 220: 1148–1151.

ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A. A.; FRANK, G. P.; LONGO, K. M.; SILVA-DIAS, M. A. F. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science (New York, N.Y.)*, v. 303, n. 5662, p. 1337-1342, 2004. ISSN 0036-8075.

ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 15, n. 4, p. 955-966, 2001.

ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D. Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth-Science Reviews*, v. 89, n. 1-2, p. 13-41, 2008.

ANORUO, C. M. Validation of OMI seasonal and spatio-temporal variations in aerosol-cloud interactions over Banizoumbou using AERONET data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 211, p. 105457, 2020

ARTAXO, P.; OLIVEIRA, P. H.; LARA, L. L.; PAULIQUEVIS, T. M.; RIZZO, L. V.; JUNIOR, C. P.; PAIXÃO, M. A.; LONGO, K. M.; FREITAS, S.; CORREIA, A. L. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3a, p. 168-22, 2006.

ARTAXO, Paulo; HANSSON, Hans-Christen. Size distribution of biogenic aerosol particles from the Amazon Basin. *Atmospheric Environment*, v. 29, n. 3, p. 393-402, 1995.

BETZER, P.R., Carder, K.L., Duce, R.A., Merrill, J.T., Tindale, N.W., Uematsu, M., Costello, D.K., Young, R.W., Feely, R.A., Breland, J.A., Bernstein, R.E. and Greco, A.M. (1988). Long-range transport of giant mineral aerosol particles. *Nature* 336: 568–571.

BLOOM S, Takacs L, DaSilva A, Ledvina D. Data assimilation using incremental analysis updates. *Mon Wea Rev.* 1996; 124:1256–1271.

BRAGA, A., Pereira, L. A. A., Böhm, G. M., & Saldiva, P. (2001). Poluição atmosférica e saúde humana. *Revista USP*, (51), 58-71.

BUSTAMANTE, Teodoro. Historia de la conservación ambiental en Ecuador: volcanes, tortugas, geólogos y políticos. FLACSO Ecuador, 2016.

CARVALHO, L. M. V., JONES, C., LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal and Interannual Activity and Extreme Rainfall. *Journal of Climate*, v. 17, p. 88-108, 2004.

COOPER, O.R., Langford, A.O., Parrish, D.D. and Fahey, D.W. (2015). Challenges of a lowered U.S. ozone standard. *Science* 348: 1096–1097.

COUTINHO, L.M., H.S.Miranda e H.C. de Morais. O Bioma do Cerrado e o Fogo. *Revista do Instituto de Estudos Avançados da USP*, 50 pp., 2002

COULSON, John Metcalfe. Tecnologia química. Fundação Calouste Gulbenkian. Serviço de Educação, 1975.

CRUTZEN, P., Andreae, M., 1990. Biomass burning in the tropics: impact on Atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science* 250, 1669-1678.

CUSPILICI, A., Monforte, P. and Ragusa, M.A. (2017). Study of Saharan dust influence on PM10 measures in Sicily from 2013 to 2015. *Ecol. Indic.* 76: 297–303.

DA SILVA, Abel Antônio. A Espessura óptica de aerossóis na banda do UV-B. *SILVA*, v. 551, p. 17, 2001.

DE MOURA, Arieli Fernandes; DA CUNHA, Waldirene Sales; DA SILVA, Wandréia Oliveira. VI-023-A INTENSIFICAÇÃO DO FENÔMENO EL NIÑO EM 2015.

DINER, D.J., Beckert, J.C., Reilly, T.H., Bruegge, C.J., Conel, J.E., Kahn, R., Martonchik, J.V., Ackerman, T.P., Davies, R., Gerstl, S.A.W., Gordon, H.R., Muller, J.-P., Myrneni, R., Sellers, R.J., Pinty, B., Verstraete, M.M., 1998.

Multiangle imaging spectroradiometer (MISR) description and experiment overview. *IEEE Trans. Geosci. Remt. Sens.* 36, 1072e1087.

DUNCAN, Bryan N. et al. The observed response of Ozone Monitoring Instrument (OMI) NO₂ columns to NO_x emission controls on power plants in the United States: 2005–2011. *Atmospheric Environment*, v. 81, p. 102-111, 2013.

DUSEK, Ulrike et al. Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles. *Science*, v. 312, n. 5778, p. 1375-1378, 2006.

FERREIRA, J.; OLIVEIRA, P.A. Variação sazonal do ciclo diurno e anual da espessura óptica na cidade de São Paulo. *Anais do...XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2006.

FINLAYSON-PITTS, B. J., PITTS, J. N. (1999). *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments and applications*. Academic Press.

FREITAS, S.R.; LONGO, M.K.; SILVA DIAS, F.A.M.; SILVA DIAS, L.P. Emissões De queimadas em ecossistemas da América do Sul. *Estudos avançados*, v.19, n. 53, p. 167-185, 2005.

FREITAS, R.S.; LONGO, K.; SILVA DIAS, A.M.; SILVA DIAS, L.P.; CHATFIELD, R.; FAZENDA, A.; RODRIGUES, F.L.; The coupled aerosol and tracer transport model to the Brazilian developments on the regional atmospheric modeling system: Validation using direct and remote sensing observations. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY*. 8. *Anais do... Foz do Iguaçu*, 2006, p. 101-107 (a).

FREITAS, S.R., Longo, K.M., Silva Dias, M.A.F., Chatfield, R., Silva Dias, P., Artaxo, P. and Panetta, J. (2009). The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation. *Atmos. Chem. Phys.* 9: 2843– 2861.

GIGLIO, L.; VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, v. 5, n. 6, p. 11091-11141, 2005-11-01 2005. ISSN 1680-7367.

HAYWOOD, J. M., P. N. Francis, M. D. Glew, and J. P. Taylor, Optical properties and direct radiative effect of Saharan dust: A case study of two Saharan dust outbreaks using aircraft data, *J. Geophys. Res.*, 106, 18,417–18,430, 2001.

HOLBEN, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., Smirnov, A., 1998. AERONET - a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Rem. Sens. Environ.* 66, 1e16.

HOSKER, R.P.; LINDBERG,S.E. Review: Atmospheric deposition and plant assimilation of gases and particles. *Atmospheric Environment*, v. 16, n. 5, p.889-910, 1982.

HSU, N.C., Tsay, S.C., King, M.D., Herman, J.R., 2004. Aerosol properties over bright reflecting source regions. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42, 557e569.

HSU, N.C., Tsay, S.C., King, M.D., Herman, J.R., 2006. Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44, 3180e3195.

HOELZEMANN, Judith J. et al. Regional representativity of AERONET observation sites during the biomass burning season in South America determined by correlation studies with MODIS Aerosol Optical Depth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 114, n. D13, 2009.

INMET – Instituto de Meteorologia. Boletim de Prognóstico Climático. Nº 8. 2015. Disponível em: Acesso em: 20/12/15

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: Acesso em: 20/12/15

KAUFMAN, Y.J.; TANRÉ, D.; BOUCHER, O. A satellite view of aerosols in the climate system *Nature*, v.419 p. 215-223. 2002.

KHONDOKER, Roulin et al. New constraints on elemental and Pb and Nd isotope compositions of South American and Southern African aerosol sources to the South Atlantic Ocean. *Geochemistry*, v. 78, n. 3, p. 372-384, 2018.

KLEIST DT, Parrish DF, Derber JC, Treadon R, Wu W-S, Lord S. Introduction of the GSI into the NCEP Global Data Assimilation System. *Weather Forecasting*. 2009; 24:1691–1705.

KODAMA, Y., 1992: Large-scale common features of Sub-tropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: characteristics of Subtropical Frontal Zones. *Journal of Meteorological Society of Japan*, v. 70, n. 4, p. 813-835.

LENTERS, J. D.; COOK, Kerry Harrison. On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 54, n. 5, p. 656-678, 1997.

LEVELT, P.F., van den Oord, G.H., Dobber, M.R., et al. 2006. The ozone monitoring instrument. *geoscience and remote sensing. IEEE Trans.* 44, 1093e1101.

LEVY, R.C., Remer, L.A., Mattoo, S., Vermote, E.F., Kaufman, Y.J., 2007. Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance. *J. Geophys. Res.* 112 (D13), 211.

LIOUSSE, C. et al. Deriving global quantitative estimates for spatial and temporal distributions of biomass burning emissions. In: *Emissions of atmospheric trace compounds*. Springer, Dordrecht, 2004. p. 71-113.

LIN, M., Fiore, A.M., Horowitz, L.W., Cooper, O.R., Naik, V., Holloway, J. and Wyman, B. (2012). Transport of Asian ozone pollution into surface air over the western United States in spring. *J. Geophys. Res.* 117: D00V07

LI, J., Carlson, B.E., Lacis, A.A., 2014a. Application of spectral analysis techniques in the inter-comparison of aerosol data, Part II: using maximum covariance analysis to effectively compare spatio-temporal variability of satellite and AERONET measured aerosol optical depth. *J. Geophys. Res.* 119, 153e166.

LI, J., Carlson, B.E., Lacis, A.A., 2014b. Application of spectral analysis techniques in the inter-comparison of aerosol data, part III: using combined PCA to compare spatio-temporal variability of MODIS, MISR and OMI aerosol optical depth. *J. Geophys. Res.*

LI, J., Carlson, B.E., Lacis, A.A., 2014c. Application of spectral analysis techniques to the intercomparison of aerosol data e part 4: combined maximum covariance analysis to bridge the gap between multi-sensor satellite retrievals and groundbased measurements. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 7, 3503e3547.

LI, JING; CARLSON, Barbara E.; LACIS, Andrew A. How well do satellite ESPESSURA ÓTICA DOS AEROSSÓIS observations represent the spatial and temporal variability of PM_{2.5} concentration for the United States?. *Atmospheric Environment*, v. 102, p. 260-273, 2015.

LUCCA, S.; ARTAXO, P.; CASTANHO, A. A.; CORREIA, A.; PIRES, C. Questões relacionadas á obtenção de espessura óptica de aerossóis em alta resolução na região amazônica. *Anais do... XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2006.

LUTZ, Mark. *Programming python*. " O'Reilly Media, Inc.", 2001.

MARTINS, Leila Droprinchinski et al. Long-range transport of aerosols from biomass burning over southeastern South America and their implications on air quality. *Aerosol Air Qual. Res*, v. 18, p. 1734-1745, 2018.

MARTIN, M.; TRITSCHER, T.; JURÁNYI, Z.; HERINGA, M. F.; SIERAU, B.; WEINGARTNER, E.; CHIRICO, R.; GYSEL, M.; PRÉVÔT, A. S. H.; BALTENSBERGER, U.; LOHMANN, U. Hygroscopic properties of fresh and aged wood burning particles. *Journal of Aerosol Science*, v. 56, p. 15-29, 2013. ISSN 0021-8502.

MARENGO, José A. et al. Low-frequency variability of the SALLJ. *CLivAR exchanges*, v. 9, n. 1, p. 26-27, 2004.

MOLOD AM, Takas LL, Suarez M, Bacmeister J. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: Evolution from MERRA to MERRA-2. *Geoscientific Model Development*. 2015; 8:1339–1356. DOI: 10.5194/gmd-8-1339-2015.

MISRA, Amit et al. Validation of version 5.1 MODIS aerosol optical depth (Deep blue algorithm and dark target approach) over a semi-arid location in Western India. ***Aerosol and Air Quality Research***, v. 15, n. 1, p. 252-262, 2015.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov>>. Acesso em 14 de jul. de 2013

OVERLAND, J. E. et al. Surface air temperature. Arctic report card, 2018.

PAIXÃO, Melina Mara de Andrade. Propriedades ópticas de aerossóis naturais e de queimadas da Amazônia. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PEARSON, K. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 2, n. 11, p. 559-572, 1901.

PEREIRA, Heloisa Ramos; REBOITA, Michelle Simões; AMBRIZZI, Tércio. Características da atmosfera na primavera austral durante o El Niño de 2015/2016. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 293-310, 2017.

POWDER, H.C. The geography and climatologie of aerosol. *Progress en physical/geography* v.27, n. 4, p. 502-547, 2003.

RECUERO, F. S ; LONGO, K. M. ; FREITAS, S. R. Estudo do Transporte das Partículas de Aerossol de Queimada Via Sensoriamento Remoto. *Anais do... XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2004, Fortaleza.

RENOUX, A.; Boulard, D.; *Les aérosols. Physique et Métrologie*, Lavoisier Technique & Documentation: Paris, 1998.

REID, J. S.; KOPPMANN, R.; ECK, T. F.; ELEUTERIO, D. P. A review of biomass burning emissions, part II: Intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, v. 4, n. 5, p. 5135-5200, 2004. ISSN 1680-7316.

RIENECKER MM, et al. Tech Rep 27. NASA Global Modeling and Assimilation Office; 2008. The GEOS-5 Data Assimilation System – Documentation of versions 5.0.1, 5.1.0, and 5.2.0.

ROSÁRIO, N.E., Longo, K.M., Freitas, S.R., Yamasoe, M.A., and Fonseca, R.M. (2013). Modeling the South American regional smoke plume: Aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation. *Atmos. Chem. Phys.* 13: 2923–2938.

SEINFELD J., PANDIS, S. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Hoboken, New Jersey. 2ed. John Wiley & Sons, Inc., 2006, 1248p.

SEINFELD, J. H. S, N. Pandis. 1998. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. John Willey and Sons. USA, 1998.

SONG, Zijue et al. Diurnal and seasonal variability of PM_{2.5} and ESPESSURA ÓTICA DOS AEROSSÓIS in North China plain: Comparison of MERRA-2 products and ground measurements. Atmospheric Environment, v. 191, p. 70-78, 2018..

SWAP, R., Garstang, M., Greco, S., Talbot, R. and Kållberg, P. (1992). Saharan dust in the Amazon Basin. Tellus B 44: 133–149.

TANRÉ, D., Kaufman, Y.J., Herman, M., Mattoo, S., 1997. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. J. Geophys. Res. 102 (D14), 16971e16988.

TORRES, O., Tanskanen, A., Veihelmann, B., Ahn, C., Braak, R., Bhartia, P.K., Veefkind, P., Levelt, P., 2007. Aerosols and surface UV products from ozone monitoring instrument observations: an overview. J. Geophys. Res. 112 (D24), S47.

UNO, I., Osada, K., Yumimoto, K., Wang, Z., Itahashi, S., Pan, X., Hara, Y., Yamamoto, S. and Nishizawa, T. (2017). Importance of long-range nitrate transport based on long-term observation and modeling of dust and pollutants over East Asia. Aerosol Air Qual. Res. 17: 3052–3064

UVO, Cíntia Regina Bertacchi; UVO, Cíntia Regina Bertacchi. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro. INPE, 1989.

VERSTRAETEN, W.W., Neu, J.L., Williams, J.E., Bowman, K.W., Worden, J.R. and Boersma, K.F. (2015). Rapid increases in tropospheric ozone production and export from China. Nat. Geosci. 8: 690–695.

WARD, D.; COTTON, W. A method for forecasting cloud condensation nuclei using predictions of aerosol physical and chemical properties from WRF/Chem.

Journal of Applied Meteorology and Climatology, v. 50, n. 7, p. 1601-1615, 2011.

WANG, Z., Itahashi, S., Uno, I., Pan, X., Osada, K., Yamamoto, S., Nishizawa, T., Tamura, K. and Wang, Z. (2017). Modeling the long-range transport of particulate matters for january in East Asia using NAQPMS and CMAQ. *Aerosol Air Qual. Res.* 17: 3065–3078.

WHITE, Benjamin Leonardo Alves. SATELLITE DETECTION OF WILDLAND FIRES IN SOUTH AMERICA. *FLORESTA*, v. 49, n. 4, p. 851-858, 2019.

WHITE, B. L. A.; WHITE, L. A. S. Queimadas e incêndios florestais no estado de Sergipe, Brasil, entre 1999 e 2015. *Floresta*, Curitiba, v. 46, n. 4, p. 561-570, 2016.

WILKS, Daniel S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic press, 2011.

WU W-S, Purser R, Parrish D. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. *Mon Wea Rev.* 2002; 130:2905–2916.

YAMASOE, M. A.; KAUFMAN, Y. J.; DUBOVIK, O.; REMER, L. A.; HOLBEN, B. N.; ARTAXO, P. Retrieval of the real part of the refractive index of aerosols from sun/sky radiometers during SCAR-B. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n.D24, p.3 1893-3 1902, 1998.

YAMASOE, M. A.; ARTAXO, P.; MIGUEL, A. H.; ALLEN, A. G. Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of biomass burning in the Amazon Basin: water-soluble species and trace elements. *Atmospheric Environment*, v.34, p.1.641-1.653, 2000.

YADAV, I.C., Linthoingambi Devi, N., Li, J., Syed, J.H., Zhang, G. and Watanabe, H. (2017). Biomass burning in Indo-China peninsula and its impacts

on regional air quality and global climate change-A review. *Environ. Pollut.* 227: 414–427.