



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

NICOLAS NEVES DE OLIVEIRA

ESTUDO DE VALIDAÇÃO DOS DADOS DE PROFUNDIDADE ÓPTICA  
DO SENSOR ATLID/EARTHCARE UTILIZANDO FOTOMETRIA  
SOLAR E IMAGENS DO VIIRS

CUIABÁ - MT  
2026

**NICOLAS NEVES DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DE VALIDAÇÃO DOS DADOS DE PROFUNDIDADE ÓPTICA  
DO SENSOR ATLID/EARTHCARE UTILIZANDO FOTOMETRIA  
SOLAR E IMAGENS DO VIIRS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental do Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Física Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. João Basso Marques

**CUIABÁ - MT  
2026**

### Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

O48e Oliveira, Nicolas Neves de.

Estudo de validação dos dados de profundidade óptica do sensor ATLID/EarthCARE utilizando fotometria solar e imagens do VIIRS [recurso eletrônico] / Nicolas Neves de Oliveira. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 67 f., il. color., pdf). -- 2026.

Orientador: João Basso Marques.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2026.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. AERONET. 2. Satélite. 3. Sistema Lidar. 4. Profundidade ótica. 5. Aerossóis atmosféricos. I. Marques, João Basso, *orientador*. II. Título.

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

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



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

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: ESTUDO DE VALIDAÇÃO DOS DADOS DE PROFUNDIDADE ÓPTICA DO SENSOR  
ATLID/EARTHCARE UTILIZANDO FOTOMETRIA SOLAR E IMAGENS DO VIIRS**

**AUTOR: MESTRANDO NICOLAS NEVES DE OLIVEIRA**

Dissertação defendida e aprovada em **02 de fevereiro de 2026**.

**COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA**

**1. PROF. DR. JOÃO BASSO MARQUES** [Presidente Banca / Orientador]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

**2. PROF. DR. PAULO HENRIQUE ZANELLA DE ARRUDA** [Examinador Interno]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

**3. PROF. DR. FABIO JULIANO DA SILVA LOPES** [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO

**CUIABÁ, 02/02/2026**



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, **Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 03/02/2026, às 09:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOÃO BASSO MARQUES**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 03/02/2026, às 18:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).





Documento assinado eletronicamente por **Fábio Juliano da Silva Lopes**, **Usuário Externo**, em 06/02/2026, às 23:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **PAULO HENRIQUE ZANELLA DE ARRUDA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 10/02/2026, às 08:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufmt.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **8787347** e o código CRC **F71E1611**.

---

*Dedico esta dissertação à memória do meu avô, Celso Oscar Perottoni, que acreditou em mim quando ninguém mais acreditava e sempre apoiou meus projetos de forma incondicional.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador, Prof. Dr. João Basso Marques, por me apoiar, direcionar e guiar em minha trajetória desde o início da graduação. Sua orientação me proporcionou acesso a ambientes e ferramentas de trabalho de excelência, criando um cenário onde a dedicação e o gosto pelos desafios acadêmicos puderam se desenvolver. Sou imensamente grato por todos os ensinamentos, conquistas e pela amizade que construímos durante todos esses anos.

Ao Prof. Dr. Eduardo Landulfo e a toda a equipe da LALINET, minha gratidão por todo o suporte e pela oportunidade de acompanhar diretamente os avanços da missão EarthCARE. Foi empolgante dar cada passo para estudar, entender e trabalhar com os dados desse fascinante satélite. Meu envolvimento com esta missão transcendeu o projeto de mestrado, tornando-se um verdadeiro propósito para seguir adiante frente às adversidades.

Agradeço ao Prof. Dr. Alexandre Cacheffo e ao Gabriel Marques por todo o suporte na parte técnica da missão EarthCARE e no desenvolvimento dos códigos. A criação do nosso grupo de estudos, as reuniões produtivas e a generosidade do Alexandre em compartilhar sua experiência computacional e científica, foram essenciais para o meu desenvolvimento na criação e no aprimoramento dos scripts em Python utilizados neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Alexandre Correia, agradeço pelas valiosas discussões e pelo auxílio fundamental na interpretação dos dados, na execução dos testes estatísticos e na formulação de hipóteses. Sua grande experiência com medições de aerossóis por fotômetros e satélites foi crucial para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por compartilhar uma parte desse conhecimento comigo em nossas conversas, desde os temas mais elementares até os mais avançados.

Agradeço a todos os professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA) da UFMT, em especial o Prof. Dr. Paulo de Arruda pelas contribuições. A convivência, o apoio e o respeito mútuo criaram um ambiente agradável e propício ao aprendizado coletivo, contribuindo significativamente para esta jornada. Dentre os colegas, agradeço principalmente Nivalda da Costa pelo suporte na elaboração do mapa da área de estudo.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, por meio da bolsa de mestrado, que foi indispensável para a dedicação integral e a realização desta pesquisa.

## EPÍGRAFE

*“Se vi mais longe, foi por estar sobre os  
ombros de gigantes.”*

**- Sir Isaac Newton**

## RESUMO

A quantificação precisa dos aerossóis atmosféricos é essencial para compreender os processos radiativos e as interações entre nuvens e partículas em suspensão, que desempenham papel central nas mudanças climáticas. Nesse contexto, a missão EarthCARE — um satélite científico fruto da colaboração entre ESA e JAXA — foi lançada com o objetivo de caracterizar as propriedades ópticas, físicas e microfísicas de nuvens e aerossóis, bem como a interação entre a radiação solar e esses componentes da atmosfera, utilizando sensores avançados como o ATLID, um sistema Lidar Atmosférico de Alta Resolução Espectral. No Brasil e no mundo, os fotômetros solares da rede AERONET representam uma importante fonte de dados para validação desses sensores em superfície. Este trabalho apresenta uma análise de validação dos produtos de AOD (Aerosol Optical Depth) fornecidos pelo EarthCARE, comparando-os com os dados da AERONET em cinco dias distintos de passagem do satélite sobre a região de Cuiabá, todos dentro de um raio de alcance de 100 km do fotômetro da AERONET em Cuiabá. Cada um dos cinco dias foi tratado como um estudo de caso, levando em consideração as condições atmosféricas observadas através de imagens do satélite NOAA-20/VIIRS. Os casos selecionados variaram em complexidade atmosférica: desde forte presença de fumaça (27/08 e 21/09), até ausência de aerossóis visíveis e presença de cobertura de nuvens (25/10 e 27/02). O destaque recai especialmente sobre o quarto estudo de caso (27/02/2025), que apresentou a melhor concordância entre os sensores, com diferença absoluta de apenas 0.005 em relação à média de AOD da AERONET, e erro percentual inferior a 3%, refletindo condições ideais de observação e proximidade espacial mínima entre a órbita do EarthCARE e o fotômetro (6.9 km). Apesar da alta correlação linear entre as médias dos dois conjuntos de dados ( $r = 0.997$ ), há indícios de subestimação sistemática por parte do satélite, principalmente em situações com elevada carga de aerossóis. Os resultados mostram que, apesar de desafios em dias com altas cargas de aerossóis e interferência de fumaça ou nuvens, os dados do EarthCARE demonstram potencial significativo para aplicação científica e monitoramento atmosférico.

**Palavras-chave:** AERONET; Satélite; sistema Lidar; profundidade óptica; aerossóis atmosféricos.

## ABSTRACT

Accurate quantification of atmospheric aerosols is essential for understanding radiative processes and the interactions between clouds and suspended particles, which play a central role in climate change. In this context, the EarthCARE mission — a scientific satellite resulting from a collaboration between ESA and JAXA — was launched to characterize the optical, physical, and microphysical properties of clouds and aerosols, as well as the interaction between solar radiation and these components of the atmosphere, using advanced instruments such as ATLID, an Atmospheric Lidar with High Spectral Resolution. In Brazil and around the world, solar photometers from the AERONET network represent an important source of surface-based data for validating satellite measurements. This study presents a validation analysis of Aerosol Optical Depth (AOD) data provided by EarthCARE by comparing them with AERONET observations on five distinct days when the satellite passed over the Cuiabá region, all within a 100 km radius from the AERONET photometer in Cuiabá. Each of the five days was treated as a case study, with specific approaches that took into account the atmospheric conditions observed through imagery from the NOAA-20/VIIIRS satellite. The selected cases varied in atmospheric complexity, ranging from strong smoke presence (August 27 and September 21) to the absence of visible aerosols and the presence of cloud cover (October 25 and February 27). Special attention is drawn to the fourth case study (February 27, 2025), which showed the best agreement between sensors, with an absolute difference of only 0.005 compared to the AERONET AOD mean and a percentage error of less than 3%, reflecting ideal observational conditions and a minimum spatial separation of 6.9 km between the EarthCARE orbital track and the photometer. Despite the high linear correlation between the average values of the two datasets ( $r = 0.997$ ), there are indications of systematic underestimation by the satellite, particularly in situations with high aerosol loading. The results show that, despite challenges on days with dense aerosols and interference from smoke or clouds, EarthCARE data demonstrate significant potential for scientific applications and atmospheric monitoring.

**Keywords:** AERONET; satellite; Lidar system; optical depth; atmospheric aerosols.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Ilustração quantificando os processos do balanço de energia terrestre . .                                                                                                                                                         | 5  |
| Figura 2.1 – Representação do espectro eletromagnético, partindo dos raios gama até as ondas de rádio . . . . .                                                                                                                                | 8  |
| Figura 2.2 – Curvas de irradiância espectral solar no topo da atmosfera e ao nível do mar. As regiões sombreadas indicam as moléculas responsáveis por absorção . . . . .                                                                      | 10 |
| Figura 2.3 – Ilustração comparando os tamanhos entre material particulado PM <sub>10</sub> e PM <sub>2.5</sub> com outros elementos presentes no ar . . . . .                                                                                  | 11 |
| Figura 2.4 – Diagrama referente aos mecanismos de interação de um feixe de luz e uma pequena partícula, ilustrando processos como reflexão, absorção, refração, entre outros . . . . .                                                         | 13 |
| Figura 2.5 – Representação dos diferentes padrões de espalhamento da luz na região do visível, para três tamanhos de partícula: a) $10^{-4}\mu m$ , b) $0.1\mu m$ e c) $1\mu m$ . . . . .                                                      | 14 |
| Figura 2.6 – Diagrama da luz solar passando por moléculas de ar amplamente espaçadas                                                                                                                                                           | 15 |
| Figura 2.7 – Diagrama representativo dos tipos de sensoriamento ativo e passivo . .                                                                                                                                                            | 18 |
| Figura 2.8 – Diagrama da geometria de medição de um fotômetro solar fixado em solo, captando a radiação solar direta . . . . .                                                                                                                 | 20 |
| Figura 2.9 – Esquema mostrando os tipos de configuração para sistemas Lidar, onde são apresentadas as configurações monoestática (detector e fonte no mesmo local) e biestática (detector e fonte em locais diferentes) . . . .                | 22 |
| Figura 2.10 – Ilustração dos principais blocos de funcionamento de um sistema Lidar: Transmissor, receptor e sistema de aquisição e análise de dados . . . .                                                                                   | 23 |
| Figura 2.11 – Aproximação de um perfil espectral de retroespalhamento de uma mistura composta de moléculas e aerossóis, a uma temperatura de $300K$ . .                                                                                        | 25 |
| Figura 2.12 – Ilustração das posições relativas dos satélites que compõe a constelação A-train, tal configuração é referente a junho de 2011 . . . . .                                                                                         | 27 |
| Figura 2.13 – Diagrama de observação do satélite Aeolus, ilustrando sua linha de trajetória, inclinação do campo de visão, altitude, entre outros . . . . .                                                                                    | 28 |
| Figura 2.14 – Impressão artística do satélite EarthCARE com a localização dos quatro instrumentos científicos a bordo . . . . .                                                                                                                | 29 |
| Figura 2.15 – Ilustração da geometria de visualização do EarthCARE, bem como as áreas de cobertura e inclinação de cada instrumento (não proporcional)                                                                                         | 30 |
| Figura 3.1 – Localização da área de estudo, onde está situada a estação da AERONET de Cuiabá, sobre a qual foram obtidos os dados do satélite EarthCARE para a profundidade óptica dos aerossóis, dentro do raio de alcance (100 km) . . . . . | 31 |

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.2 – | Arranjo geral de medições da AERONET, incluindo o radiômetro solar, antena de transmissão de dados, painel solar, entre outros . . . . .                                                                                                                                                                                                                         | 33 |
| Figura 3.3 – | À esquerda, rede de fotômetros AERONET espalhadas pelo globo terrestre. À direita, registro de visita de manutenção ao fotômetro presente na Fazenda Miranda, em Cuiabá . . . . .                                                                                                                                                                                | 34 |
| Figura 3.4 – | Ilustração da arquitetura do ATLID, mostrando a sua configuração bi-estática e disposição dos componentes . . . . .                                                                                                                                                                                                                                              | 35 |
| Figura 3.5 – | Diagrama ilustrando as abordagens de medição e amostragem do ATLID, com as devidas resoluções . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                          | 36 |
| Figura 3.6 – | Esquema do caminho óptico do receptor ATLID: O sinal retroespalhado, coletado pelo telescópio, atravessa um divisor de feixe por polarização. Os componentes são devidamente separados por meio de fibra óptica, até o canal dedicado à detecção dos mesmos . . . . .                                                                                            | 37 |
| Figura 3.7 – | Visão geral dos produtos de dados L2a e L2b da ESA contendo parâmetros extraídos referentes a aerossóis, nuvens, precipitação e radiação. A coluna no meio lista os nomes dos respectivos produtos de nível 2 . . .                                                                                                                                              | 38 |
| Figura 3.8 – | Capturas de tela referentes aos três principais passos tomados para a reconstrução das passagens do EarthCARE por Cuiabá, sendo: (a) Configuração da localização e tamanho da região de alcance, (b) Visualização da região e passagens do satélite interiores a mesma e (c) Replotagem da trajetória do EarthCARE num mapa em linguagem <i>Python</i> . . . . . | 40 |
| Figura 4.1 – | Relação de passagens do EarthCARE pela região de estudo, onde as linhas em verde representam a disponibilidade de medidas por ambos sensores, e as linhas em vermelho indicam ausência de medidas por ao menos um deles . . . . .                                                                                                                                | 43 |
| Figura 4.2 – | À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do satélite e destaque dos focos de queimadas em vermelho . . . . .                                                                                                  | 44 |
| Figura 4.3 – | Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 27/08/2024, dentro do raio de alcance definido (100 km)                                                                                                                                                                                                                             | 45 |
| Figura 4.4 – | Variabilidade das medidas de AOD do EarthCARE em relação a média obtida com a AERONET, para a passagem do dia 27/08/2024 . . . . .                                                                                                                                                                                                                               | 46 |
| Figura 4.5 – | À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do satélite e destaque dos focos de queimadas em vermelho . . . . .                                                                                                  | 47 |
| Figura 4.6 – | Mapa de calor no estilo calendário, utilizando valores de média diária para AOD em 340 nm do fotômetro de Cuiabá nos anos de 2022, 2023 e 2024, destaca-se os altos valores em setembro de 2024 . . . . .                                                                                                                                                        | 47 |
| Figura 4.7 – | Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 21/09/2024, dentro do raio de alcance definido (100 km)                                                                                                                                                                                                                             | 48 |
| Figura 4.8 – | À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do EarthCARE e destaque dos focos de queimadas em vermelho . . . . .                                                                                                 | 49 |



|                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.9 – Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 25/10/2024, dentro do raio de alcance definido (100 km)                                                                                | 50 |
| Figura 4.10 – Variabilidade das medidas de AOD do EarthCARE em relação a média obtida com a AERONET, para a passagem do dia 25/10/2024 . . . . .                                                                                 | 51 |
| Figura 4.11 – À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do EarthCARE . . . . . | 52 |
| Figura 4.12 – Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 27/02/2025, dentro do raio de alcance definido (100 km)                                                                               | 53 |
| Figura 4.13 – Variabilidade das medidas de AOD do EarthCARE em relação a média obtida com a AERONET, para a passagem do dia 27/02/2025 . . . . .                                                                                 | 53 |
| Figura 4.14 – Plotagem da passagem do EarthCARE em 27/02/2025, através de um mapa em Python e destacando o intervalo de tempo entre 17:34:17 e 17:34:20 (UTC) . . . . .                                                          | 54 |
| Figura 4.15 – À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do EarthCARE . . . . . | 55 |
| Figura 4.16 – Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 27/02/2025, dentro do raio de alcance definido (100 km)                                                                               | 56 |
| Figura 4.17 – Variabilidade das medidas de AOD do EarthCARE em relação a média obtida com a AERONET, para a passagem do dia 13/05/2025 . . . . .                                                                                 | 57 |
| Figura 4.18 – Plotagem em boxplot da distribuição das medidas feitas pelo ATLID, apresentadas em cada estudo de caso, preservando as devidas filtrações de incerteza . . . . .                                                   | 58 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

AERONET: Aerosol Robotic Network (Rede Robótica de Aerossóis)  
AOD: Aerosol Optical Depth (Profundidade Óptica dos Aerossóis)  
ATLID: Atmospheric Lidar (Lidar Atmosférico)  
CNES: Centro Nacional de Estudos Espaciais  
EarthCARE: Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer  
ESA: European Space Agency  
ESOV: Earth Observation Swath and Orbit Visualisation tool  
JAXA: Japan Aerospace eXploration Agency  
NASA: National Aeronautics and Space Administration  
NASDA: National Association of State Departments of Agriculture  
VIIRS: Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

# SUMÁRIO

|          |                                                              |           |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                            | <b>4</b>  |
| 1.1      | Objetivo Geral . . . . .                                     | 7         |
| 1.2      | Objetivos Específicos . . . . .                              | 7         |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                 | <b>8</b>  |
| 2.1      | Luz e o espectro eletromagnético . . . . .                   | 8         |
| 2.2      | Aerossóis . . . . .                                          | 10        |
| 2.3      | A interação da radiação com a matéria . . . . .              | 11        |
| 2.3.1    | Espalhamento Rayleigh . . . . .                              | 15        |
| 2.3.2    | Espalhamento Mie . . . . .                                   | 16        |
| 2.4      | Interação aerossol-nuvem-atmosfera . . . . .                 | 16        |
| 2.5      | Sensoriamento remoto . . . . .                               | 17        |
| 2.5.1    | Sensoriamento remoto passivo - Fotômetro Solar . . . . .     | 18        |
| 2.5.2    | Sensoriamento remoto ativo - Sistema Lidar (HSRL) . . . . .  | 21        |
| 2.5.3    | Satélites - CALIPSO, AEOLUS e EarthCARE . . . . .            | 26        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b>                                    | <b>31</b> |
| 3.1      | Caracterização da área de estudo . . . . .                   | 31        |
| 3.2      | Fotômetro solar da AERONET . . . . .                         | 32        |
| 3.3      | Satélite EarthCARE - ATLID . . . . .                         | 34        |
| 3.4      | Métodos . . . . .                                            | 37        |
| 3.4.1    | Média Aritmética . . . . .                                   | 38        |
| 3.4.2    | Desvio Padrão . . . . .                                      | 38        |
| 3.4.3    | Erro Médio, Erro Absoluto Médio e RMSE . . . . .             | 39        |
| 3.4.4    | Correlação de Pearson . . . . .                              | 39        |
| 3.4.5    | Previsão e reconstrução das passagens do EarthCARE . . . . . | 39        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>                                | <b>42</b> |
| 4.1      | Contextualização das passagens do EarthCARE . . . . .        | 42        |
| 4.2      | Parâmetros de consideração dos dados . . . . .               | 43        |
| 4.3      | Estudo de caso 1: 27/08/2024 . . . . .                       | 43        |
| 4.4      | Estudo de caso 2: 21/09/2024 . . . . .                       | 46        |

|          |                                        |           |
|----------|----------------------------------------|-----------|
| 4.5      | Estudo de caso 3: 25/10/2024 . . . . . | 49        |
| 4.6      | Estudo de caso 4: 27/02/2025 . . . . . | 52        |
| 4.7      | Estudo de caso 5: 13/05/2025 . . . . . | 55        |
| 4.8      | Discussão geral . . . . .              | 57        |
| 4.9      | Dificuldades e limitações . . . . .    | 60        |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>            | <b>62</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                     | <b>64</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta indispensável para o estudo da atmosfera, proporcionando dados precisos e abrangentes que são cruciais para a compreensão das dinâmicas atmosféricas. A capacidade de coletar informações sobre a composição, temperatura, umidade e outros parâmetros atmosféricos de forma contínua e em larga escala permite que cientistas e pesquisadores façam previsões mais acuradas sobre o clima e o tempo, além de monitorarem fenômenos naturais como a poluição do ar e a dispersão de aerossóis (LOPES, 2011).

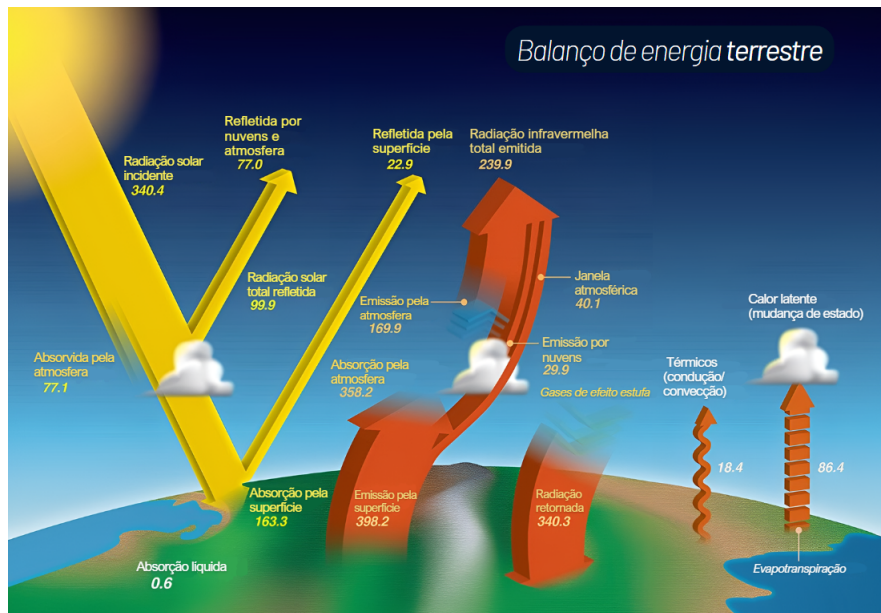
Dentro do sensoriamento remoto, o sistema Lidar (Light Detection and Ranging) destaca-se como uma tecnologia avançada, que utiliza pulsos de laser para medir distâncias e captar informações detalhadas sobre a composição atmosférica. O Lidar é capaz de detectar a presença de partículas como aerossóis e nuvens, além de determinar suas propriedades ópticas, físicas e distribuições verticais (KOVALEV; EICHINGER, 2004). Essa capacidade de caracterizar a atmosfera em alta resolução espacial e temporal faz do Lidar uma ferramenta essencial para a pesquisa atmosférica moderna. No mesmo sentido, os fotômetros solares da AERONET (Aerosol Robotic Network) desempenham um papel fundamental na medição da profundidade óptica dos aerossóis (AOD), permitindo o monitoramento contínuo da carga de partículas atmosféricas. Esses instrumentos realizam medições da radiação solar direta em diferentes comprimentos de onda, possibilitando a caracterização das propriedades ópticas dos aerossóis, como seu tamanho e composição (HOLBEN et al., 1998). Devido à sua calibração rigorosa e padronização global, os fotômetros solares da AERONET são amplamente utilizados na validação de produtos de satélite e no aprimoramento de modelos climáticos.

Nos últimos 20 anos, a compreensão do papel radiativo direto e indireto dos aerossóis e nuvens, bem como a sua representação nos modelos climáticos, melhorou significativamente. No entanto, as observações de alta resolução com perfilamento vertical de nuvens e aerossóis, co-localizadas com medições da radiação solar refletida e da radiação térmica emitida pela Terra, continuam a ser parâmetros extremamente importantes para aprofundar a compreensão do impacto radiativo das nuvens e dos aerossóis e dos seus mecanismos de interação num cenário climático em aquecimento (WEHR et al., 2023).

A radiação eletromagnética emitida pelo Sol é a principal fonte de energia externa responsável pelo desenvolvimento dos processos climáticos na Terra (SEINFELD; PANDIS, 1998). O fluxo de radiação solar médio incidente, calculado em um período de

24 horas em toda a Terra, é de cerca de  $340.4 \text{ W/m}^2$ , considerando a área esférica da Terra de  $4\pi r_T^2$ , onde  $r_T$  é o raio da Terra. Dessa radiação incidente, cerca de  $77 \text{ W/m}^2$  é refletida de volta ao espaço devido à cobertura de nuvens, aerossóis e moléculas presentes na atmosfera, além da reflexão pela superfície terrestre, que contribui com cerca de  $22.9 \text{ W/m}^2$ . Do fluxo total de radiação incidente,  $77.1 \text{ W/m}^2$  é absorvido pela atmosfera, enquanto  $163.3 \text{ W/m}^2$  são absorvidos pela superfície terrestre. A superfície terrestre, por sua vez, emite cerca de  $398.2 \text{ W/m}^2$  sob a forma de radiação infravermelha. Parte dessa radiação é reabsorvida pela atmosfera e outra parte é emitida de volta ao espaço. Assim, um total de aproximadamente  $240 \text{ W/m}^2$  é enviado ao espaço (TRENBERTH; FASULLO; KIEHL, 2009; LOEB et al., 2009), realizando o balanço energético da atmosfera, conforme ilustrado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Ilustração quantificando os processos do balanço de energia terrestre



Fonte: Adaptada de (NASA, 2017)

O papel das nuvens nos feedbacks climáticos é substancial e representa uma das maiores fontes de incerteza nos modelos climáticos. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2021), há um consenso de alta confiança de que as nuvens contribuem com um feedback líquido positivo em resposta ao aquecimento global. Em comparação com o relatório anterior (*Fifth Assessment Report*), avanços no entendimento dos processos relacionados às nuvens permitiram reduzir a incerteza nessa estimativa em aproximadamente 50%, resultando em um valor consolidado de  $0.42$  ( $-0.10$  a  $0.94$ )  $\text{W/m}^2\text{K}$ . No entanto, as nuvens ainda permanecem como a maior fonte de incerteza nos feedbacks climáticos (WEHR et al., 2023). O relatório também discute as interações entre aerossóis e nuvens, apontando que, embora os modelos climáticos atuais tenham avançado na representação desses processos em relação às versões anteriores, ainda há limitações, especialmente na simulação da precipitação (IPCC, 2021). Esse desafio se

alinha diretamente aos objetivos da missão EarthCARE (WEHR et al., 2023), que poderá fornecer novos dados e abordagens para mitigar essas incertezas.

A validação de produtos de sensoriamento remoto, particularmente aqueles derivados de sistemas Lidar orbitais, constitui uma etapa fundamental para assegurar a qualidade, confiabilidade e aplicabilidade científica dos dados. Estudos de validação utilizando observações independentes de superfície, como as fornecidas pela rede AERONET, permitem quantificar incertezas, identificar vieses sistemáticos e avaliar limitações associadas à representatividade espaço-temporal das medições (HOLBEN et al., 1998; SCHUSTER et al., 2012). Trabalhos anteriores demonstram que discrepâncias entre medições Lidar e fotômetros solares podem estar associadas à distância horizontal entre os instrumentos, à variabilidade atmosférica e à presença de nuvens ou aerossóis estratificados (PAPPALARDO et al., 2010). Assim, esforços contínuos de validação são essenciais não apenas para a melhoria dos algoritmos de recuperação, mas também para garantir o uso consistente desses produtos em aplicações como modelagem climática, assimilação de dados e estudos de variabilidade atmosférica.

Historicamente, as missões espaciais com sistemas Lidar evoluíram de experimentos demonstrativos para plataformas operacionais dedicadas ao estudo da atmosfera. O Lidar In-space Technology Experiment (LITE) foi a primeira demonstração de um Lidar orbital, comprovando a viabilidade de perfis verticais atmosféricos a partir do espaço (WINKER; COUCH; MCCORMICK, 1996). Essa experiência pavimentou o caminho para missões como o CALIPSO, que passou a fornecer observações contínuas e globais de aerossóis e nuvens com alta resolução vertical e sensibilidade à polarização (WINKER et al., 2009). Posteriormente, o satélite Aeolus introduziu o primeiro Lidar Doppler espacial dedicado à medição de perfis globais de vento, ampliando significativamente o escopo das aplicações Lidar orbitais (STOFFELEN et al., 2005).

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de entender melhor os processos que governam a atmosfera impulsionaram o desenvolvimento de missões espaciais dedicadas ao estudo do clima. O novo satélite EarthCARE (Cloud Aerosol and Radiation Explorer), uma colaboração entre a Agência Espacial Europeia (ESA) e a Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA), representa um avanço significativo nesse campo. A missão EarthCARE representa uma continuidade e um avanço conceitual das iniciativas anteriores, ao integrar instrumentos ativos e passivos em uma única plataforma, permitindo observações co-localizadas e sinérgicas de nuvens, aerossóis e radiação, com potencial significativamente ampliado para estudos de processos atmosféricos e avaliação de impactos climáticos (ILLINGWORTH et al., 2015).

Equipado com instrumentos de última geração, incluindo um radar de perfilamento de nuvens e um sistema Lidar, o EarthCARE visa ampliar o conhecimento sobre o papel dos aerossóis e nuvens nas mudanças climáticas. Com a sua metodologia altamente sinérgica, a missão visa uma precisão sem precedentes na observação de aerossóis e nuvens e

do seu impacto no orçamento global da radiação (WANDINGER et al., 2023). Alinhado ao interesse na busca de melhorias nos modelos climáticos atuais, este projeto visa contribuir para a validação dos dados de profundidade óptica dos aerossóis, fornecidos pelo EarthCARE, a partir de medidas correlativas de sistemas Lidar e fotômetros de superfície na região de Cuiabá. A validação desses dados é fundamental para garantir a precisão das medições do satélite e contribuir para um entendimento mais completo do impacto dos aerossóis e nuvens nas mudanças climáticas. Ao avançar nesse conhecimento, poderemos desenvolver estratégias mais eficazes para mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas e promover a sustentabilidade ambiental.

## 1.1. OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo de validação dos dados de profundidade óptica de aerossóis (AOD) obtidos pelo satélite EarthCARE, por meio de comparações estatísticas com medições de superfície realizadas por um fotômetro solar da rede AERONET, complementadas por imagens do sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), com o intuito de contribuir para a confiabilidade e aplicabilidade das observações do satélite em estudos atmosféricos.

## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Processar e analisar as medições de profundidade óptica de aerossóis obtidas à superfície por meio do fotômetro solar da rede AERONET, bem como as imagens e produtos derivados do sensor VIIRS, considerando diferentes passagens do satélite EarthCARE sobre a região de estudo;
- Realizar a compatibilização espaço-temporal entre as bases de dados de superfície, imagens orbitais e os produtos do satélite EarthCARE, de modo a garantir a representatividade das comparações realizadas;
- Aplicar métodos estatísticos para comparar os dados processados de AERONET e VIIRS com as medições de profundidade óptica fornecidas pelo satélite EarthCARE, identificando possíveis desvios, incertezas e suas causas associadas às limitações instrumentais, condições atmosféricas e critérios de co-localização.



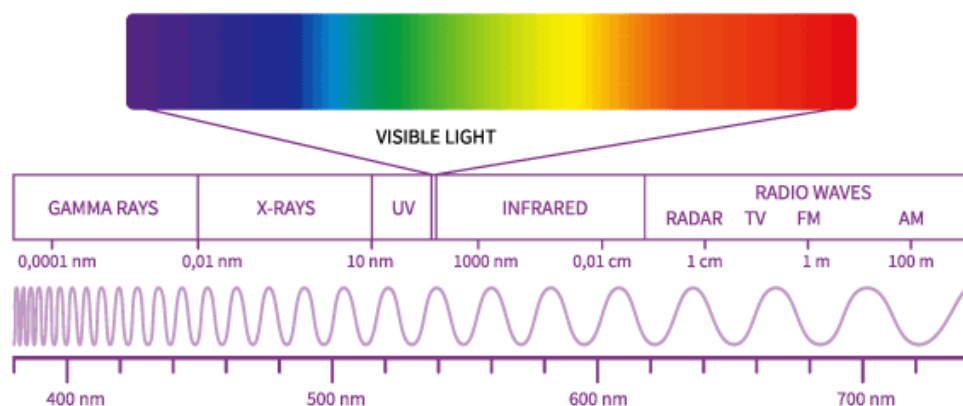
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. LUZ E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Entre as décadas de 1660 e 1670, Isaac Newton conduziu uma série de experimentos que demonstraram a dispersão da luz solar em um espectro colorido, semelhante ao arco-íris. Utilizando um prisma, Newton foi capaz de decompor a luz branca e evidenciar que cada cor do espectro correspondia a diferentes frequências e comprimentos de onda. Esse avanço não apenas consolidou a compreensão sobre a composição da luz, mas também lançou as bases para o estudo da óptica e do comportamento da radiação eletromagnética (MOREIRA, 2007).

No entanto, o estudo da luz vai muito além da radiação solar visível. Ele abrange um amplo espectro de fenômenos e fontes, desde luz artificial e lasers até a radiação emitida por estrelas distantes. A compreensão da natureza da luz é essencial para diversas áreas científicas, como óptica, astronomia e física atmosférica. Tecnologias modernas, como sistemas Lidar e fotômetros solares, utilizam princípios ópticos para analisar a composição da atmosfera e caracterizar seus constituintes. A Figura 2.1 ilustra o espectro eletromagnético em sua totalidade, desde as ondas de rádio, com seus longos comprimentos de onda, até os raios gama, permitindo uma visão abrangente da radiação presente no universo.

Figura 2.1 – Representação do espectro eletromagnético, partindo dos raios gama até as ondas de rádio



Fonte: Adaptado de (BYJU, 2025)

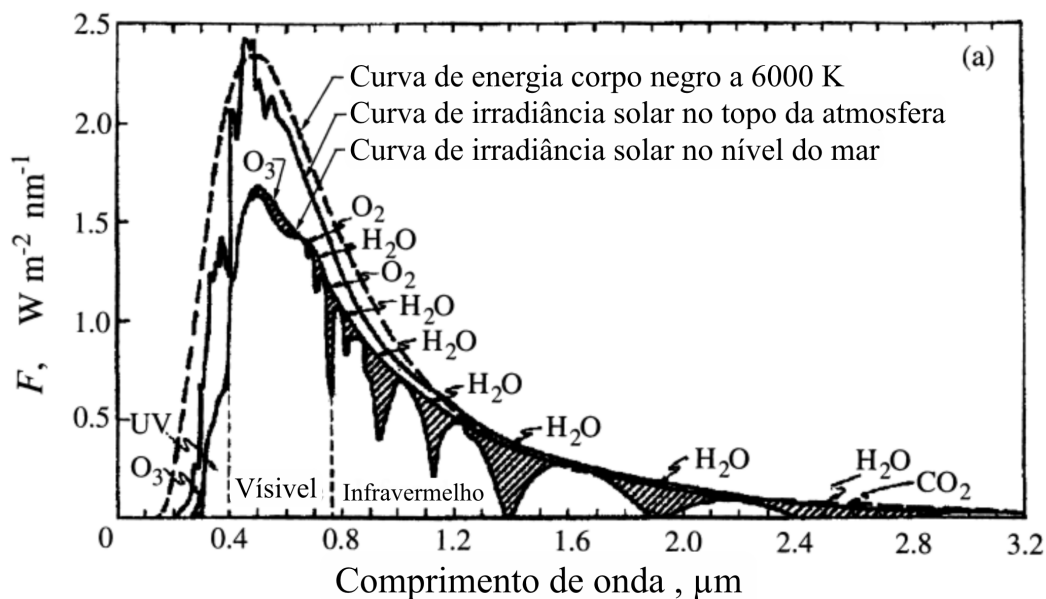
Cada sistema de sensoriamento remoto opera dentro de uma faixa específica do

espectro eletromagnético, escolhida de acordo com seu propósito e metodologia, seja ela ativa ou passiva. Por exemplo, alguns sensores utilizam comprimentos de onda na faixa do espectro visível (entre 390 e 700  $nm$ ), enquanto outros operam na região do infravermelho (IV), que é subdividida em três intervalos principais: IV próximo (700 a 1100  $nm$ ), IV médio (1100 a 3000  $nm$ ) e IV distante (3 a 1000  $\mu m$ ). A escolha da faixa espectral determina a capacidade do sensor em detectar diferentes propriedades da superfície e da atmosfera, sendo um fator essencial na concepção de instrumentos de monitoramento ambiental.

O entendimento dos princípios da física eletromagnética e da teoria das ondas é essencial para a aplicação eficiente das técnicas de sensoriamento remoto, tanto em sensores terrestres quanto em satélites. Esses fundamentos teóricos possibilitam a compreensão dos mecanismos de interação entre a radiação eletromagnética e a matéria, permitindo a extração de informações críticas sobre a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre. O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto depende diretamente desse conhecimento, garantindo a precisão e confiabilidade dos dados obtidos para estudos ambientais e climáticos. Além disso, é fundamental considerar o papel das janelas de absorção e transmissão da atmosfera, uma vez que o balanço radiativo do sistema Terra-atmosfera é governado pelos processos seletivos de absorção, espalhamento e transmissão da radiação. A Figura 2.2 apresenta o espectro da irradiância solar fora da atmosfera e ao nível da superfície, evidenciando como a composição atmosférica modula a energia que efetivamente alcança a superfície. Observa-se que a radiação solar incidente sofre atenuações espectrais específicas associadas à presença de gases atmosféricos, que atuam de forma seletiva em diferentes comprimentos de onda, controlando a redistribuição da energia no sistema climático.

A Figura 2.2 evidencia ainda que a região do visível constitui uma importante janela de transmissão atmosférica, permitindo que grande parte da radiação solar alcance a superfície, enquanto o ultravioleta é fortemente absorvido, principalmente pelo ozônio ( $O_3$ ). Já no infravermelho próximo e médio, múltiplas bandas de absorção são observadas, associadas sobretudo ao vapor d'água ( $H_2O$ ), ao dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e ao oxigênio ( $O_2$ ) (SEINFELD; PANDIS, 1998). Esses mecanismos são essenciais para o controle do balanço energético, influenciando tanto o aquecimento da superfície quanto os processos de emissão e reabsorção de radiação pela atmosfera. Assim, a compreensão das janelas espectrais de absorção e transmissão é central para estudos de clima, sensoriamento remoto e interações radiativas na atmosfera.

Figura 2.2 – Curvas de irradiância espectral solar no topo da atmosfera e ao nível do mar. As regiões sombreadas indicam as moléculas responsáveis por absorção



Fonte: Adaptado de (SEINFELD; PANDIS, 1998)

No contexto dos satélites, o espectro eletromagnético é amplamente utilizado para coletar informações detalhadas sobre o meio ambiente e até mesmo o espaço profundo. Sensores ópticos, radiômetros e espectrômetros captam diferentes faixas de comprimento de onda, desde o ultravioleta até o infravermelho e micro-ondas, possibilitando a análise de variáveis como composição atmosférica, temperatura, umidade, cobertura vegetal e emissões de gases. Tecnologias como o Lidar permitem medir com alta precisão a reflexão e a absorção da luz por partículas e gases, auxiliando em estudos climáticos, previsão do tempo e monitoramento ambiental. Dessa forma, a exploração do espectro eletromagnético não apenas aprimora nossa capacidade de compreender e prever fenômenos naturais, mas também fortalece a observação contínua do planeta e do universo, contribuindo para a ciência e a sustentabilidade global.

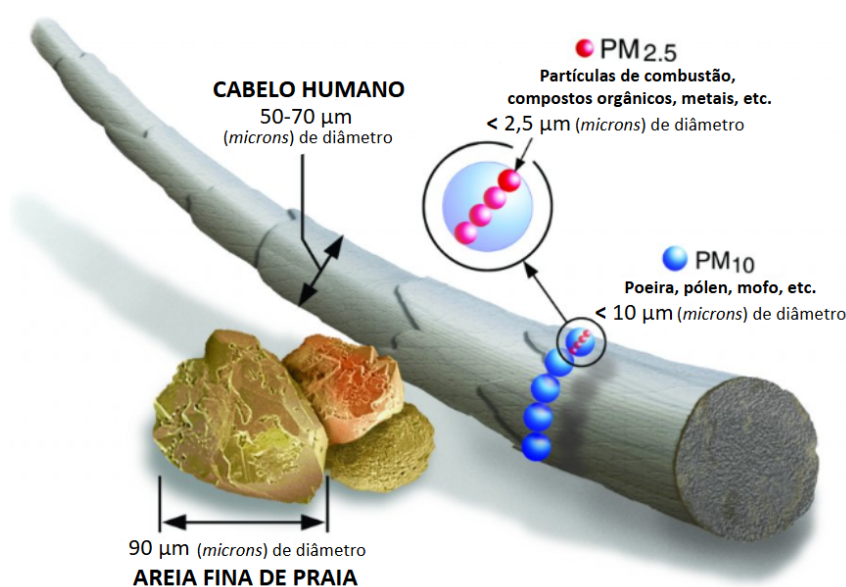
## 2.2. AEROSSÓIS

Os aerossóis atmosféricos são partículas líquidas e/ou sólidas suspensas na atmosfera, podendo ter origem natural ou antropogênica, e apresentam uma ampla gama de características, como tamanho, forma, composição química (orgânica e inorgânica) e propriedades físicas (SEINFELD; PANDIS, 1998). As fontes naturais incluem emissões vulcânicas, aerossóis biogênicos, partículas marinhas e poeira do solo, enquanto as fontes antropogênicas englobam queimas de biomassa, emissões industriais e poluentes oriundos do tráfego veicular (FINLAYSON-PITTS; JR, 1999).

Os aerossóis atmosféricos são frequentemente classificados de acordo com o seu diâ-

metro aerodinâmico, sendo as categorias mais comuns o  $PM_{2.5}$  (material particulado fino, com diâmetro inferior a  $2.5\ \mu m$ ) e o  $PM_{10}$  (material particulado inalável, com diâmetro inferior a  $10\ \mu m$ ). Essas partículas apresentam diferentes comportamentos na atmosfera e impactos na saúde e no meio ambiente. O  $PM_{2.5}$ , por ser menor, tem maior capacidade de penetrar profundamente no sistema respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares e podendo entrar na corrente sanguínea, sendo associado a doenças cardiovasculares e respiratórias (EPA, 2024). Já o  $PM_{10}$  inclui partículas um pouco maiores, que podem se depositar nas vias respiratórias superiores, causando irritação e inflamações. A Figura 2.3 ilustra a diferença de tamanho entre essas partículas em comparação com um fio de cabelo humano, um grão de areia e outras referências visuais, destacando sua escala microscópica e a facilidade com que podem ser transportadas pelo vento e inaladas pela população.

Figura 2.3 – Ilustração comparando os tamanhos entre material particulado  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$  com outros elementos presentes no ar



Fonte: Adaptada de (EPA, 2024).

A Organização Mundial da Saúde (WHO) estima que 92% da população mundial vive em áreas onde a concentração anual média de  $PM_{2.5}$  é mais de  $10\mu g/m^3$ , excedendo suas diretrizes de qualidade do ar para exposição a  $PM_{2.5}$  (SOGA, 2019).

## 2.3. A INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

A compreensão dos princípios fundamentais da interação entre a radiação eletromagnética e a matéria é essencial para o desenvolvimento e a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. Entre os aspectos mais relevantes desse processo, destaca-se a forma como a energia eletromagnética interage com as partículas dispersoras presentes

na atmosfera. Esses fenômenos incluem absorção, espalhamento e transmissão da luz incidente, e sua caracterização é fundamental para a interpretação dos dados obtidos por instrumentos como sistemas Lidar e fotômetros solares. O conhecimento detalhado desses mecanismos permite não apenas a calibração e o aprimoramento dos sensores, mas também a extração de informações precisas sobre a composição e estrutura da atmosfera.

Dentre os processos que governam essa interação, o espalhamento se destaca como um dos mais influentes na propagação da radiação na atmosfera. Esse fenômeno físico ocorre quando ondas eletromagnéticas sofrem desvios em sua trajetória devido à presença de partículas de diferentes tamanhos. Como a atmosfera é composta por uma ampla gama de partículas, desde moléculas de gases até gotas de chuva e aerossóis, diferentes tipos de espalhamento podem ocorrer, variando em intensidade e direção (MOREIRA, 2007). A Tabela 2.1 apresenta uma classificação das partículas atmosféricas de acordo com seus diâmetros, destacando sua influência nos processos de interação com a radiação eletromagnética.

Tabela 2.1 – Partículas presentes na atmosfera e respectivos tamanhos

| <b>Partícula</b>  | <b>Variação no diâmetro (<math>\mu m</math>)</b> |
|-------------------|--------------------------------------------------|
| Fumaça, bruma     | 0,001 - 0,5                                      |
| Fumos industriais | 0,5 - 50                                         |
| Poeira            | 1 - 5                                            |
| Neblina, nuvens   | 2 - 30                                           |
| Névoa             | 20 - 50                                          |
| Garoa             | 50 - 200                                         |
| Chuva             | 200 - 2000                                       |

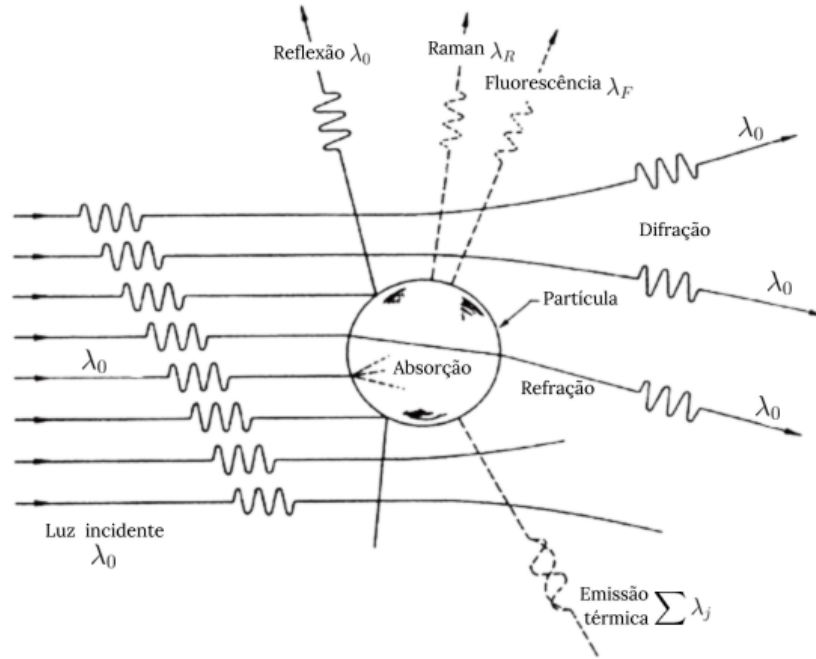
Fonte: (MOREIRA, 2007)

O espalhamento da radiação eletromagnética depende diretamente do comprimento de onda da luz incidente e das dimensões das partículas presentes na atmosfera. No contexto do sensoriamento remoto utilizando Lidars e fotômetros solares, destacam-se dois mecanismos fundamentais: o espalhamento de Rayleigh e o espalhamento de Mie (SEINFELD; PANDIS, 1998). Ambos desempenham um papel crucial na propagação da luz na atmosfera e influenciam diretamente as medições realizadas por esses instrumentos. O espalhamento, por sua vez, é um processo conservativo, pois não altera a quantidade total de energia, apenas modifica a direção de propagação da radiação (NOAA, 2008). A Figura 2.4 ilustra os principais processos que podem ocorrer quando um feixe de luz interage com partículas atmosféricas.

Além do espalhamento, a absorção é outro processo fundamental na interação entre a radiação eletromagnética e os constituintes atmosféricos. Diferente do espalhamento, a absorção remove energia do campo radiante, convertendo-a em outra forma de energia, como calor. A soma desses dois processos – espalhamento e absorção – resulta na extinção (ou atenuação) da radiação ao atravessar um meio. Os aerossóis atmosféricos, que

consistem em partículas suspensas de diferentes tamanhos e composições, podem tanto espalhar quanto absorver a radiação eletromagnética em diversos comprimentos de onda, incluindo o infravermelho. Essa interação influencia diretamente a temperatura do ar e outras propriedades atmosféricas (NOAA, 2008).

Figura 2.4 – Diagrama referente aos mecanismos de interação de um feixe de luz e uma pequena partícula, ilustrando processos como reflexão, absorção, refração, entre outros



Fonte: Adaptada de (SEINFELD; PANDIS, 1998).

Os parâmetros-chave que governam o espalhamento e a absorção de radiação por uma partícula são:

- O comprimento de onda  $\lambda_0$  da radiação incidente;
- O tamanho das partículas, que pode ser expresso pela grandeza adimensional denominada como parâmetro de tamanho, dado por

$$a = \frac{2\pi r}{\lambda_0} \quad (2.1)$$

onde  $r$  é o raio da partícula;

- O índice de refração  $n$  da partícula, que é uma grandeza complexa expressa por

$$N = n + ik \quad (2.2)$$

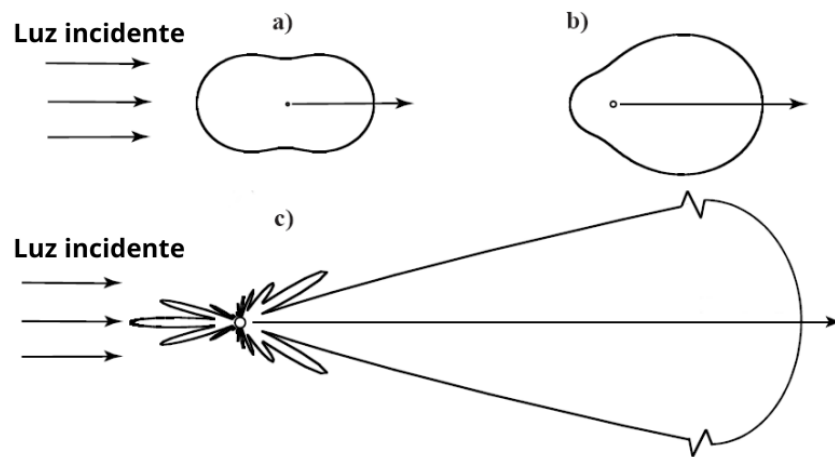
onde  $n$  é a parte real, responsável pelo espalhamento e  $k$  representa os componentes responsáveis pela absorção da radiação eletromagnética (SEINFELD; PANDIS,

1998). Se  $k = 0$  num dado comprimento de onda, então a partícula não absorve radiação nesse comprimento de onda (NOAA, 2008).

Devemos nos atentar que o fenômeno de espalhamento de luz não ocorre de forma indiscriminada, a distribuição da radiação dispersa está intrinsecamente ligada ao comprimento de onda  $\lambda_0$  da luz incidente e a algumas características específicas da partícula responsável pelo espalhamento, como, por exemplo, o parâmetro de tamanho  $a$ . Quando lidamos com partículas de dimensões reduzidas, a dispersão da luz ocorre de maneira uniforme em direções frontal e traseira. Uma vez que não há espalhamento, diz-se que a luz incidente realizou o processo de transmissão, não sendo absorvida ou dispersa.

À medida que o tamanho das partículas aumenta, o espalhamento passa a se concentrar de maneira mais acentuada na direção frontal, elevando a complexidade do padrão resultante. A Figura 2.5 mostra o padrão de espalhamento da radiação eletromagnética na região do visível, 500 nm, por partículas esféricas com três tamanhos diferentes: a)  $10^{-4}\mu m$ , b)  $0.1\mu m$  e c)  $1\mu m$ . O primeiro caso se assemelha ao espalhamento Rayleigh, enquanto os outros dois são próximos do espalhamento Mie. Esse comportamento está intrinsecamente relacionado às propriedades do material dispersor e ao comprimento de onda específico da luz incidente. Este fenômeno apresenta uma variabilidade complexa, dependente das características particulares das partículas envolvidas e das propriedades do meio em que estão dispersas (LOPES, 2011).

Figura 2.5 – Representação dos diferentes padrões de espalhamento da luz na região do visível, para três tamanhos de partícula: a)  $10^{-4}\mu m$ , b)  $0.1\mu m$  e c)  $1\mu m$



Fonte: Adaptada de (LIOU, 2002)

Uma vez que, levando em consideração o parâmetro de tamanho da partícula e outras considerações relacionadas à distribuição angular de espalhamento da radiação, pode-se dizer que o tipo de espalhamento elástico é predominante (LOPES, 2011), onde o comprimento de onda reirradiado pela partícula é igual ao comprimento de onda incidente.

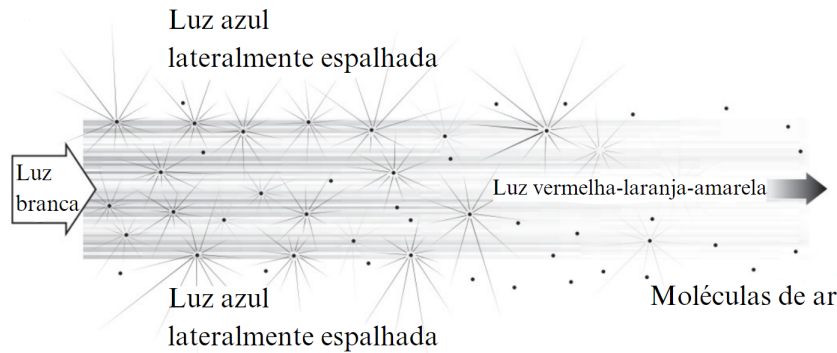
### 2.3.1 Espalhamento Rayleigh

O espalhamento molecular ou Rayleigh acontece quando a radiação eletromagnética incidente interage com partículas cujo diâmetro é significativamente menor do que o seu comprimento de onda. Essas partículas podem ser moléculas gasosas ou partículas em suspensão no ar, como apresentado na Figura 2.6. No espalhamento Rayleigh, a intensidade da luz espalhada é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da luz incidente, resultando em um espalhamento mais eficiente para comprimentos de onda menores. A equação (2.3) mostra a fórmula original de espalhamento molecular, devido à luz solar incidente  $I_0$ , apresentada por Rayleigh.

$$I = \frac{I_0}{r^2} \alpha^2 \frac{16\pi^4}{\lambda^4} \frac{(1 + \cos^2\theta)}{2} \quad (2.3)$$

onde  $I$  é a intensidade total de espalhamento da luz solar não polarizada por uma molécula na direção  $\theta$ ,  $r$  é a distância entre a molécula e o ponto de observação e  $\alpha$  é a polarizabilidade da molécula (LIOU, 2002).

Figura 2.6 – Diagrama da luz solar passando por moléculas de ar amplamente espaçadas



Fonte: Adaptada de (HECHT, 2017)

Quando um feixe de luz solar incide na atmosfera, diferentes comprimentos de onda são espalhados de maneira distinta. A luz violeta sofre o espalhamento mais intenso, seguida pela luz azul, enquanto a luz verde, amarela e vermelha são espalhadas progressivamente em menor grau. Como resultado, a luz que atravessa a atmosfera sem ser significativamente desviada tende a ser mais rica na extremidade vermelha do espectro, enquanto a luz espalhada é predominantemente azulada (HECHT, 2017). Esse fenômeno é explicado pela dependência do espalhamento Rayleigh com  $\lambda^{-4}$  e pela composição atmosférica, onde cerca de 75% das moléculas são de nitrogênio. Essa relação física justifica a coloração azul do céu durante o dia (LOPES, 2011). A compreensão desse mecanismo de espalhamento molecular é essencial para a detecção de aerossóis na atmosfera. Em sistemas Lidar e fotômetros solares, a contribuição do espalhamento molecular é frequentemente removida do sinal medido, permitindo que a análise se concentre exclusivamente na fração do espalhamento causada pelos aerossóis.



### 2.3.2 Espalhamento Mie

A natureza do espalhamento se altera de acordo com o tamanho da partícula, o espalhamento Mie ocorre quando o tamanho da partícula está na ordem do comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente. Este tipo de espalhamento funciona para o regime de partículas consideradas esféricas, como gotículas de nuvem. Esse tipo de espalhamento é responsável pela aparência branca das nuvens, pois as gotículas de nuvem espalham todas as faixas de comprimentos de onda da luz visível em todas as direções (NASA, 1997).

Uma vez que apresentar as deduções matemáticas para os tipos de espalhamento não é o foco deste trabalho, deve-se fixar o que há de mais importante no sentido de descrever a interação entre as partículas e a radiação eletromagnética. Como o tamanho da partícula, dado pelo parâmetro da Equação (2.1), o índice de refração complexo da partícula descrito pela Equação (2.2) e a forma da partícula, considerada esférica. Os padrões de espalhamento Mie podem ser complexos em relação ao regime Rayleigh, quanto maior for o tamanho da partícula (LOPES, 2011).

## 2.4. INTERAÇÃO AEROSSOL-NUVEM-ATMOSFERA

Os aerossóis são essenciais para a atmosfera como a conhecemos; se a atmosfera da Terra fosse totalmente desprovida de partículas, as nuvens não poderiam se formar. As nuvens se formam a partir da condensação do vapor d'água presente na atmosfera, um processo que ocorre quando o ar úmido resfria até atingir a saturação, levando à formação de pequenas gotículas de água ou cristais de gelo (PRUPPACHER; KLETT, 1978). No entanto, para que tal processo de fato ocorra, é necessária a presença de certas partículas que podem ser ativadas para se transformar em neblina ou gotículas de nuvem, na presença de uma supersaturação de vapor de água. Estas são chamadas de núcleos de condensação de nuvens (CCN). A abundância e composição desses núcleos influenciam diretamente as propriedades ópticas e dinâmicas das nuvens, afetando sua refletividade, tempo de vida e eficiência na produção de chuva (ROSENFELD et al., 2014). Dada a importância dessas interações, compreender como os aerossóis modulam a microfísica das nuvens e sua resposta climática é essencial para reduzir as incertezas associadas às interações entre aerossóis, nuvens e precipitação (IPCC, 2021). Essas interações possuem implicações que vão desde a escala local até impactos climáticos globais, influenciando diretamente o balanço de energia do planeta.

As nuvens de baixa altitude e alta reflectância desempenham um papel significativo no resfriamento da superfície terrestre, refletindo grande parte da radiação solar incidente de volta ao espaço. Em contraste, nuvens altas e semitransparentes promovem um efeito de aquecimento, pois dificultam a emissão de radiação térmica da superfície para o es-

paço, superando o efeito de resfriamento devido à sua baixa reflectância. Além disso, o calor latente liberado durante a condensação do vapor d'água em nuvens precipitantes representa uma importante fonte de energia para a circulação atmosférica, compensando as perdas de radiação para o espaço (ROSENFELD et al., 2014). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) reconhece os efeitos dos aerossóis mediados por nuvens como uma das maiores fontes de incerteza no balanço energético da Terra e no impacto do forçamento climático antropogênico. Essa incerteza decorre da complexidade das interações entre aerossóis e nuvens e das dificuldades em quantificar esses efeitos de maneira abrangente.

Dada a variabilidade espacial e temporal dos aerossóis, suas interações com as nuvens ocorrem em múltiplas escalas. Em escala local, os efeitos podem ser observados na microfísica de nuvens individuais, em dimensões de poucos quilômetros e minutos. Já em escalas regionais e globais, esses efeitos podem ser amplificados ou atenuados por processos atmosféricos mais amplos, influenciando padrões de precipitação e circulações atmosféricas ao longo de dias, meses ou até mesmo décadas (ROSENFELD et al., 2014). Além de servirem como agentes para a formação de nuvens, os aerossóis também exercem efeitos radiativos diretos, modificando as taxas de aquecimento atmosférico localmente e, conseqüentemente, alterando as propriedades das nuvens (SEINFELD; PANDIS, 1998).

As taxas de aquecimento vertical na atmosfera são frequentemente dominadas por processos de aquecimento latente, como a liberação de calor durante a condensação e o congelamento ou a absorção de calor durante a evaporação e o derretimento. Alterações nesses processos devido à presença de aerossóis podem influenciar a circulação atmosférica em diferentes escalas. Isso implica que os impactos dos aerossóis nas nuvens não são independentes das condições meteorológicas, mas sim interligados a elas (ROSENFELD et al., 2014). Portanto, separar os efeitos dos aerossóis dos processos meteorológicos pode não ser a abordagem mais adequada para quantificar essas interações, pois os próprios efeitos meteorológicos podem ser realimentados pela presença dos aerossóis. A quantificação precisa dos efeitos dos CCN nas nuvens e, subseqüentemente, na radiação, exige medições acuradas desses núcleos de condensação, com um erro inferior a um fator de 1.5 em escala global (ROSENFELD et al., 2014). Na prática, essa exigência só pode ser atendida por meio de observações via satélite, o que representa um grande desafio técnico e científico. Nesse sentido, novas metodologias, como as abordadas pelo satélite EarthCARE, buscam superar essa limitação com medições aprimoradas dos perfis atmosféricos de aerossóis, nuvens e radiação.

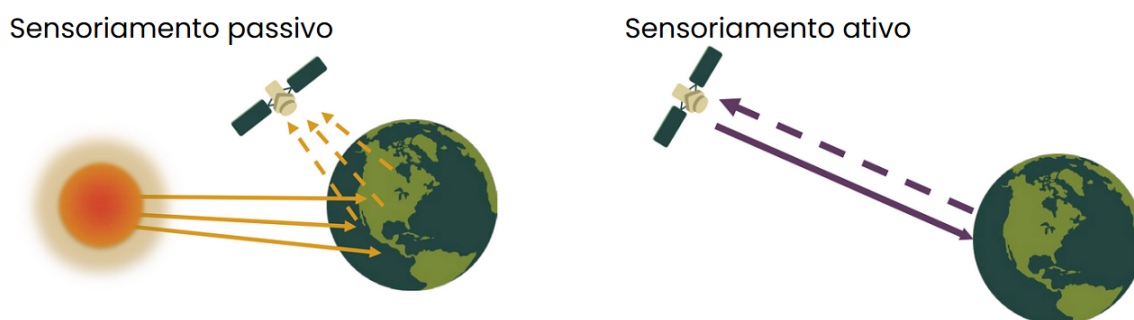
## 2.5. SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é uma técnica essencial para a observação e monitoramento da superfície terrestre, oceanos e atmosfera, sendo amplamente utilizada em diver-

sas áreas da ciência, incluindo meteorologia, climatologia, geologia, agronomia e ciências ambientais. Ele se baseia na obtenção de informações sobre objetos ou fenômenos sem a necessidade de contato direto, geralmente por meio da detecção da radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos em estudo (CAMPBELL; WYNNE, 2011).

Os sistemas de sensoriamento remoto podem ser classificados em duas categorias principais: passivo e ativo. Os sensores passivos dependem da radiação solar refletida ou da emissão térmica dos objetos, como é o caso dos sensores presentes em satélites meteorológicos e ambientais, como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e o Landsat (CAMPBELL; WYNNE, 2011). Por outro lado, os sensores ativos emitem radiação e registram o sinal refletido pelo alvo, como ocorre com os radares meteorológicos e os sistemas Lidar (*Light Detection and Ranging*) utilizados para medições da atmosfera e da superfície terrestre. Uma representação dos tipos de sensoriamento remoto pode ser vista na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Diagrama representativo dos tipos de sensoriamento ativo e passivo



Fonte: Adaptado de (NASA, 2023)

Com a crescente demanda por informações precisas sobre a atmosfera e seus impactos no clima, o sensoriamento remoto desempenha um papel crucial na validação de modelos climáticos e na caracterização da composição atmosférica. A integração de dados de sensoriamento remoto com medições *in situ* e modelagem numérica permite avanços significativos na compreensão das interações entre aerossóis, nuvens e radiação, um aspecto fundamental para estudos de mudanças climáticas e qualidade do ar (KAUFMAN; TANRÉ; BOUCHER, 2002; IPCC, 2021).

### 2.5.1 Sensoriamento remoto passivo - Fotômetro Solar

Um dos instrumentos mais amplamente utilizados para o sensoriamento remoto terrestre é o fotômetro solar, um tipo de radiômetro projetado para medir a radiação solar em comprimentos de onda específicos. Esse instrumento opera desde a faixa do ultravioleta até o infravermelho próximo, permitindo a caracterização detalhada da composição atmosférica. Por meio da atenuação da radiação solar ao atravessar a atmosfera, o fotômetro fornece informações essenciais sobre aerossóis, vapor d'água, ozônio e ou-

tros constituintes atmosféricos. Um dos principais parâmetros medidos por fotômetros é a profundidade óptica dos aerossóis (AOD), derivado da Lei de Beer-Lambert-Bouguer (Equação 2.4), que descreve matematicamente a irradiância solar recebida na superfície da Terra  $I(\lambda)$  em um determinado comprimento de onda  $\lambda$ .

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-m(\theta)\tau(\lambda)) \quad (2.4)$$

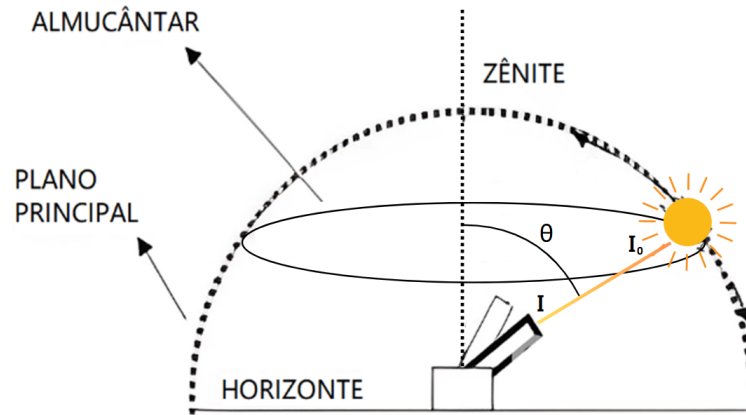
sendo  $I_0(\lambda)$  é a radiação solar extraterrestre no comprimento de onda  $\lambda$ ,  $m(\theta)$  é o fator de massa óptica, que relaciona a profundidade e o caminho óptico atravessado pela luz em termos do ângulo zenital solar  $\theta$  e  $\tau(\lambda)$  é a profundidade óptica total da coluna atmosférica, para um comprimento de onda  $\lambda$ . O valor de  $\tau(\lambda)$  varia devido ao espalhamento e à absorção da radiação solar pelos constituintes atmosféricos, como moléculas do ar (Rayleigh), aerossóis, vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio. Através de manipulações algébricas da Lei de Beer-Lambert-Bouguer, isolando o termo de profundidade óptica e decompondo-o, obtém-se a profundidade óptica dos aerossóis atmosféricos  $\tau_{aer}(\lambda)$  medida pelo fotômetro, dada pela equação 2.5.

$$\tau_{aer}(\lambda) = \frac{1}{m_\theta} [\ln I_0(\lambda) - \ln I(\lambda)] - \tau_{ray}(\lambda) - \tau_{gas}(\lambda) \quad (2.5)$$

O termo  $\tau_{gas}(\lambda)$  é referente à profundidade óptica dos elementos absorvedores da atmosfera (vapor d'água, dióxido de carbono, ozônio) e pode ser descartado selecionando comprimentos de onda específicos nos quais não há absorção por parte desses elementos, exceto pelo ozônio, cuja absorção é calculada utilizando a quantidade total de ozônio na atmosfera e o seu coeficiente de absorção no comprimento de onda selecionado (JMA, 2005). O termo de profundidade óptica devido ao espalhamento Rayleigh,  $\tau_{ray}(\lambda)$ , pode ser calculado utilizando modelos empíricos e dados atmosféricos. Já o valor de  $I_0(\lambda)$  pode ser estimado através do método de Langley, que é capaz de estimar o valor da radiância solar no topo da atmosfera (LIOU, 2002; SEINFELD; PANDIS, 1998). Um diagrama ilustrando a geometria de um fotômetro fixado no solo captando a radiação solar direta pode ser visto na Figura 2.8.

A Profundidade Óptica de Aerossóis representa a carga de aerossóis ao longo da coluna atmosférica, desde o ponto de medição até o topo da atmosfera, sendo um indicador da concentração dessas partículas. A partir desse parâmetro, é possível determinar o tamanho e a distribuição dos aerossóis na atmosfera, utilizando algoritmos de inversão baseados na teoria do Espalhamento de Mie (OLMEDA, 2005). Recorrentemente, a profundidade óptica dos aerossóis atmosféricos é denominada como AOD (*Aerosol Optical Depth*) ou AOT (*Aerosol Optical Thickness*).

Figura 2.8 – Diagrama da geometria de medição de um fotômetro solar fixado em solo, captando a radiação solar direta



Fonte: Adaptado de (PALÁCIOS, 2017)

Outro parâmetro relevante no contexto das medições por fotômetros é a equação de Ångström, que relaciona a AOD a diferentes comprimentos de onda conforme a seguinte expressão

$$\tau(\lambda) = \beta \lambda^{-\overset{\circ}{a}} \quad (2.6)$$

onde  $\tau(\lambda)$  é a AOD no comprimento de onda  $\lambda$ ,  $\beta$  é o coeficiente de turbidez (relacionado à concentração total de aerossóis) e  $\overset{\circ}{a}$  é o expoente de Ångström, que é um parâmetro fundamental no sensoriamento remoto atmosférico, pois quantifica como a profundidade óptica do aerossol varia com o comprimento de onda e atua como indicador do tamanho das partículas. Ele permite diferenciar aerossóis finos de grossos, auxilia na classificação do tipo de aerossol (como fumaça, poeira ou partículas marinhas), possibilita o monitoramento do envelhecimento das partículas — já que o valor tende a diminuir à medida que elas crescem — e é considerado um parâmetro robusto, facilmente obtido por meio de sensores com múltiplos comprimentos de onda.

O expoente de Ångström pode ser calculado a partir de dois comprimentos de onda conhecidos utilizando

$$\overset{\circ}{a} = -\frac{\ln\left(\frac{\tau(\lambda_1)}{\tau(\lambda_2)}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)} \quad (2.7)$$

Com o valor de  $\overset{\circ}{a}$  estimado a partir das AODs medidas em 340 nm e 380 nm, por exemplo, é possível utilizar a equação (2.6) para calcular o valor da AOD no comprimento de onda de 355 nm, tal procedimento foi tomado neste trabalho, assim permitindo a comparação direta entre os dois conjuntos de dados analisados.

### 2.5.2 Sensoriamento remoto ativo - Sistema Lidar (HSRL)

O Lidar (*Light Detection and Ranging*), cuja tradução livre é “Detecção e Alcance de Luz”, é um sistema baseado em laser que opera segundo princípios semelhantes aos do Radar (*Radio Detection and Ranging*) e do Sonar (*Sound Detection and Ranging*). No caso do Lidar, a radiação emitida provém de um laser, que envia pulsos de luz para a atmosfera. Ao interagir com moléculas e partículas em suspensão, essa luz é espalhada em múltiplas direções, sendo que uma fração retorna na direção do sistema sensor, caracterizando o fenômeno de retroespalhamento (KOVALEV; EICHINGER, 2004).

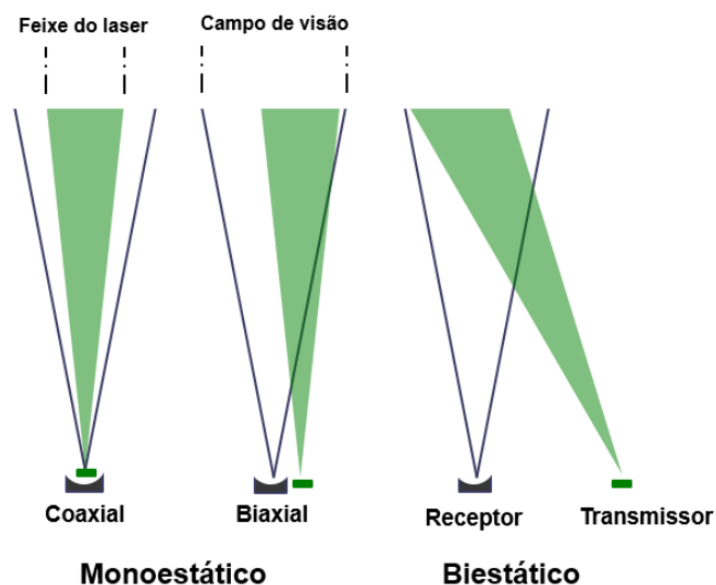
O presente trabalho tem como foco o Lidar de Alta Resolução Espectral (HSRL), cujo princípio se baseia na diferença na largura espectral do retroespalhamento entre as moléculas do ar (*Rayleigh scattering*) e os aerossóis (WEITKAMP, 2005). No entanto, outras técnicas de Lidar são amplamente utilizadas na detecção e caracterização de constituintes atmosféricos, explorando diferentes processos de interação entre a radiação e a matéria. Entre essas abordagens, destacam-se: o Lidar de retroespalhamento elástico, o Lidar Raman, o Lidar de Absorção Diferencial (DIAL), o Lidar de Fluorescência e o Lidar Doppler, cujas descrições detalhadas podem ser encontradas em (WEITKAMP, 2005) e (KOVALEV; EICHINGER, 2004).

A principal diferença entre as técnicas de Lidar está no tipo de interação física da radiação laser com a atmosfera e, conseqüentemente, nas propriedades que cada sistema é capaz de medir: o Lidar de retroespalhamento elástico detecta a luz espalhada no mesmo comprimento de onda emitido, fornecendo perfis de aerossóis e nuvens; o Lidar Raman utiliza o espalhamento inelástico para obter informações independentes sobre composição e vapor d’água; o Lidar de Absorção Diferencial (DIAL) emprega dois comprimentos de onda próximos para medir concentrações específicas de gases por diferença de absorção; o Lidar de Fluorescência detecta a emissão induzida por excitação molecular, permitindo identificar compostos específicos; e o Lidar Doppler mede o deslocamento de frequência do sinal retroespalhado para determinar a velocidade do vento (WEITKAMP, 2005; KOVALEV; EICHINGER, 2004).

Os sistemas Lidar podem ser configurados em duas disposições principais: monoestática e biestática. Na configuração monoestática, a fonte emissora de laser e o receptor estão localizados no mesmo ponto, enquanto na configuração biestática esses componentes encontram-se em posições distintas. A configuração monoestática pode ser subdividida em dois tipos: (i) coaxial, em que o feixe laser e o campo de visão do receptor compartilham o mesmo eixo óptico, e (ii) biaxial, na qual o feixe é emitido em um eixo ligeiramente separado do receptor. A Figura 2.9 ilustra essas configurações de forma esquemática.

Um sistema Lidar pode ser dividido em três blocos funcionais principais: o sistema de transmissão, que consiste na fonte de laser responsável pela emissão dos pulsos de luz; o foto-receptor, geralmente um telescópio, que coleta a radiação retroespalhada pela atmos-

Figura 2.9 – Esquema mostrando os tipos de configuração para sistemas Lidar, onde são apresentadas as configurações monoestática (detector e fonte no mesmo local) e biestática (detector e fonte em locais diferentes)



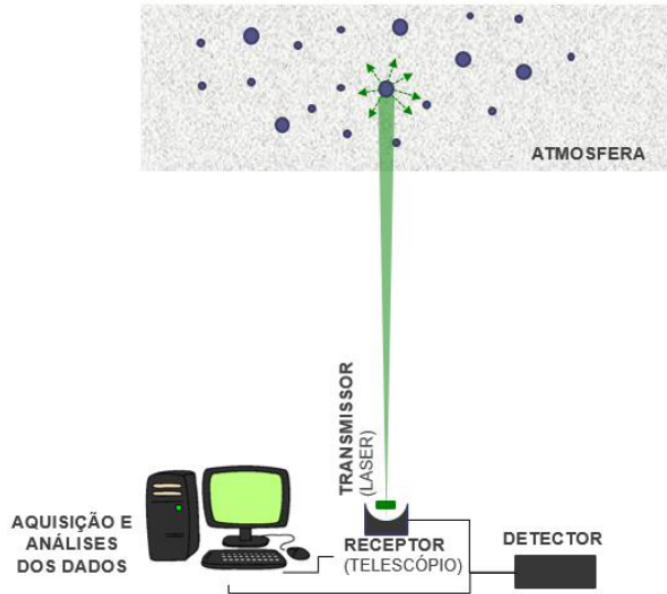
Fonte: (PETERS, 2020)

fera; e o sistema de gravação e digitalização, encarregado da aquisição e processamento dos dados obtidos. A fonte de laser emite pulsos intensos e curtos, o foto-receptor coleta a luz retroespalhada e a converte em um sinal elétrico e, finalmente, o sistema de gravação digitaliza os sinais elétricos como uma função do tempo, ou de alcance (KOVALEV; EICHINGER, 2004). A Figura 2.10 ilustra a configuração básica de um sistema Lidar de configuração coaxial.

O papel fundamental do transmissor consiste em gerar pulsos luminosos e direcioná-los para a atmosfera. A escolha dos tipos de lasers e dos comprimentos de onda empregados na técnica Lidar é intrinsecamente vinculada à sua aplicação, variando desde 250 nm, na região ultravioleta (UV), até 11  $\mu\text{m}$ , no infravermelho. Inicialmente, os lasers de Ruby, Nitrogênio e  $\text{CO}_2$  dominavam o cenário do sensoriamento remoto com Lidar. Contudo, o avanço tecnológico propiciou o surgimento de lasers mais potentes, os quais passaram a ser empregados de maneira proeminente nos estudos atmosféricos, abrindo novas perspectivas (LOPES, 2011). Os lasers pulsados, devido às suas características ópticas, como baixa divergência do feixe, destacam-se como uma fonte ideal para sistemas Lidar, potencializando suas capacidades de análise.

Os sistemas Lidar convencionais fornecem perfis do sinal de retroespalhamento atenuado, que podem ser organizados em imagens com resolução espacial e temporal suficiente para a maioria dos estudos atmosféricos (WEITKAMP, 2005). No entanto, esse sinal é uma medida bruta, isto é, um resultado da combinação de diferentes propriedades atmosféricas, o que torna sua interpretação desafiadora. Embora essas informações sejam extremamente valiosas para a caracterização do estado da atmosfera, a extração direta

Figura 2.10 – Ilustração dos principais blocos de funcionamento de um sistema Lidar: Transmissor, receptor e sistema de aquisição e análise de dados



Fonte: (PETERS, 2020)

dessas propriedades a partir dos perfis medidos não é trivial. A clássica equação do Lidar é dada por

$$P(r) = P_0 \eta \left( \frac{A}{r^2} \right) O(r) \left( \frac{ct}{2} \right) \beta(r) \exp \left[ -2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right] \quad (2.8)$$

onde  $P(r)$  é a potência recebida a partir da distância  $r$ ,  $P_0$  é a potência média transmitida durante o pulso do laser,  $\eta$  é a eficiência do receptor,  $A$  é a área do receptor,  $r$  é a distância até o volume de espalhamento,  $O(r)$  é a função de sobreposição entre o feixe de laser e o campo de visão do receptor,  $c$  é a velocidade da luz,  $t$  é a duração do pulso do laser, e  $\beta$  e  $\alpha$  são, respectivamente, o coeficiente de retroespalhamento atmosférico e o coeficiente de extinção atmosférica na distância  $r$ . A integral do coeficiente de extinção é definida como a profundidade óptica da atmosfera, desde a superfície até a altura  $r$ , ou de uma camada entre  $r_1$  e  $r_2$ , como apresentado na equação (2.9).

$$\tau(r_1, r_2) = \int_{r_1}^{r_2} \alpha(r) dr \quad (2.9)$$

Se faz crucial no contexto desse trabalho entender os termos constituintes da equação Lidar, tanto devido a trajetória do feixe de luz laser quanto às propriedades ópticas do sistema. Os principais termos são o coeficiente de retroespalhamento angular  $\beta$ , sendo  $\theta = 180^\circ$  em relação a direção da luz emitida, e o coeficiente de extinção  $\alpha$ . O coeficiente  $\beta$  é a soma das contribuições por parte de moléculas e partículas (aerossóis), então

$$\beta(r) = \beta_{mol}(r) + \beta_{aer}(r) \quad (2.10)$$



Já o coeficiente de extinção, isto é, a remoção da luz ao longo de seu percurso retilíneo no caminho de ida e volta ao longo da atmosfera — ocorre tanto pelo espalhamento quanto pela absorção, tal que

$$\alpha = \alpha_{mol,sca} + \alpha_{mol,abs} + \alpha_{aer,sca} + \alpha_{aer,abs} \quad (2.11)$$

De modo mais geral, há também uma dependência com o comprimento de onda  $\lambda$  da luz laser e a distância  $r$  entre o sistema e o volume de espalhamento. No caso das partículas, leva-se em conta as propriedades microfísicas, químicas e morfológicas (WEITKAMP, 2005).

A Equação 2.8 estabelece uma relação entre os perfis de uma quantidade medida e os coeficientes desconhecidos de retroespalhamento atmosférico  $\beta$  e de extinção atmosférica  $\alpha$ . Considerando que cada um desses coeficientes pode ser decomposto em uma contribuição molecular e uma contribuição de aerossóis é possível analisar separadamente os diferentes processos que afetam a propagação da radiação na atmosfera.

A resolução da Equação 2.8 em cada altitude exige a determinação de seis incógnitas, o que torna essa tarefa claramente inviável. No entanto, nosso conhecimento da atmosfera nos permite reduzir essas seis incógnitas principais para apenas duas, utilizando um procedimento bem conhecido. O valor do coeficiente de retroespalhamento molecular,  $\beta_{mol}$ , pode ser determinado com base na teoria do espalhamento de Rayleigh (YOUNG, 1982; BUCHOLTZ, 1995). Para todos os efeitos práticos,  $\beta_{mol}$  é proporcional à densidade atmosférica. Dessa forma, este pode ter o seu perfil determinado a partir de dados de radiossondagem, os quais oferecem informações sobre pressão, temperatura e umidade, ou mediante os dados meteorológicos locais mais precisos disponíveis acerca de temperatura e pressão (SILVA, 2022). O fator de proporcionalidade é dado por

$$\frac{\beta_{mol}(r)}{\beta_{mol}^{STP}} = 1,47 \times 10^{-6} \times \left( \frac{550nm}{\lambda} \right)^4 m^{-1} sr^{-1} \quad (2.12)$$

com os padrões de temperatura e pressão (STP) definidos em  $0^\circ C$  e 1013.25 hPa, respectivamente, condições onde a atmosfera contém  $2.69 \times 10^{25}$  moléculas por metro cúbico (MEASURES, 1984). Assim,  $\alpha_{mol,sca}$  é estritamente proporcional a  $\beta_{mol}(r)$  da maneira apresentada na equação 2.13. Nesse caso, toma-se  $\alpha_{mol,abs} = 0$ , isso não é feito quando concentrações significativas de ozônio estão presentes e os comprimentos de onda utilizados pelo Lidar forem os mesmos conhecidos por ter a radiação absorvida pelo ozônio, por exemplo.

$$\alpha_{mol,sca} = \beta_{mol}(r) \frac{8\pi}{3} sr \quad (2.13)$$

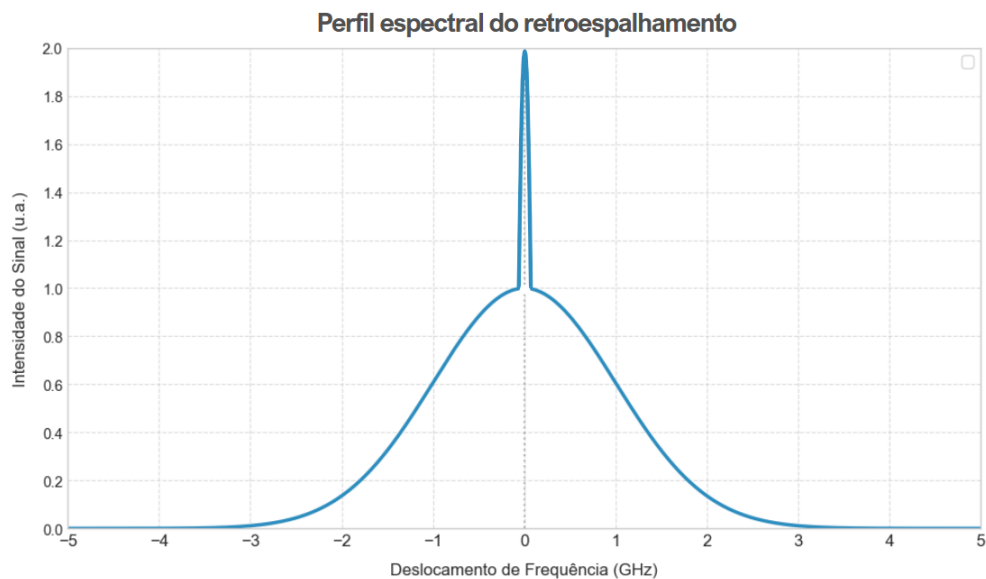
Os coeficientes de retroespalhamento ( $\beta_{aer}$ ), extinção por espalhamento ( $\alpha_{aer,sca}$ ) e extinção por absorção ( $\alpha_{aer,abs}$ ) dos aerossóis estão interligados de acordo com o tamanho, formato e o índice de refração das partículas — considerando que essas partículas sejam

homogêneas, o que nem sempre ocorre. No entanto, essa relação exige um grande volume de informações e se torna excessivamente complexa para aplicações práticas. Por esse motivo, os coeficientes de extinção por espalhamento e absorção são geralmente tratados em conjunto como um único termo,  $\alpha_{aer} = \alpha_{aer,sca} + \alpha_{aer,abs}$ , enquanto o coeficiente de retroespalhamento dos aerossóis ( $\beta_{aer}$ ) é considerado separadamente. Dessa forma, ainda permanecemos com duas incógnitas no problema.

Dentre os métodos existentes para a resolução desse problema, o Lidar de Alta Resolução Espectral, ou HSRL (*High Spectral Resolution Lidar*) se baseia no uso de dois perfis medidos. Essa técnica explora os deslocamentos em frequência provocados pelo efeito Doppler, que ocorrem quando os fótons são espalhados por moléculas em movimento térmico aleatório. A distribuição das velocidades moleculares na atmosfera segue um perfil de Maxwell-Boltzmann, com uma largura típica de aproximadamente 300 m/s, o que resulta em deslocamentos Doppler da ordem de 1 GHz. Por outro lado, partículas como aerossóis e gotículas de nuvens se deslocam com velocidades muito menores, determinadas principalmente pelos ventos ( $\sim 10\text{m/s}$ ) e pela turbulência ( $\sim 1\text{m/s}$ ), resultando em deslocamentos Doppler significativamente menores, da ordem de 30 MHz e 3 MHz, respectivamente (WEITKAMP, 2005).

Como consequência, a distribuição espectral da luz retroespalhada pela atmosfera é composta por um pico estreito, próximo à frequência original do laser (devido ao espalhamento por partículas), sobreposto a uma distribuição mais larga causada pelo espalhamento molecular (Figura 2.11). A largura espectral do retorno estreito devido aos aerossóis é normalmente determinada pela largura da linha do laser de transmissão (WEITKAMP, 2005).

Figura 2.11 – Aproximação de um perfil espectral de retroespalhamento de uma mistura composta de moléculas e aerossóis, a uma temperatura de 300K



Referência: (WEITKAMP, 2005)

Nesse caso, há duas equações Lidar envolvidas no processo, sendo uma para o sinal molecular e outra para o sinal devido aos aerossóis. Ignorando a dependência espectral com o comprimento de onda  $\lambda$ , estas são as expressões (2.14) e (2.15), respectivamente.

$$P_{mol}(r) = K_{mol}r^{-2}O(r)\beta_{mol}(r)\exp\left[-2\int_0^r\alpha(r')dr'\right] \quad (2.14)$$

e

$$P_{aer}(r) = K_{aer}r^{-2}O(r)\beta_{aer}(r)\exp\left[-2\int_0^r\alpha(r')dr'\right] \quad (2.15)$$

Nessas expressões, os termos  $K_{mol}$  e  $K_{aer}$  contêm todas as variáveis independentes da distância. As funções  $O(r)$  e o termo de extinção  $\alpha(r)$ , dado pela equação 2.11, são os mesmos nas duas equações. Uma vez que as duas constantes  $K_{mol}$  e  $K_{aer}$ , ou, mais especificamente, a razão entre elas  $K = K_{mol}/K_{aer}$  é determinada, as equações (2.14) e (2.15) podem ser divididas, fornecendo diretamente o valor da razão de retroespalhamento lidar. Assim, obtemos

$$\beta_{aer}(r) = \beta_{mol}\frac{KP_{aer}(r)}{P_{mol}(r)} \quad (2.16)$$

Lidars de alta resolução espectral (HSRL) utilizam filtros ópticos para diferenciar os fótons retroespalhados por moléculas daqueles retroespalhados por aerossóis ou partículas de nuvem. Para que essa distinção seja possível, são necessários filtros de banda muito estreita, com largura típica da ordem de  $\sim 1$  GHz. Além disso, a frequência do laser transmissor deve estar “travada” no centro da banda de transmissão do filtro. Também é essencial que a largura espectral da linha do laser (*linewidth*) seja menor do que a largura do filtro, tipicamente em torno de  $\sim 100$  MHz (WEITKAMP, 2005).

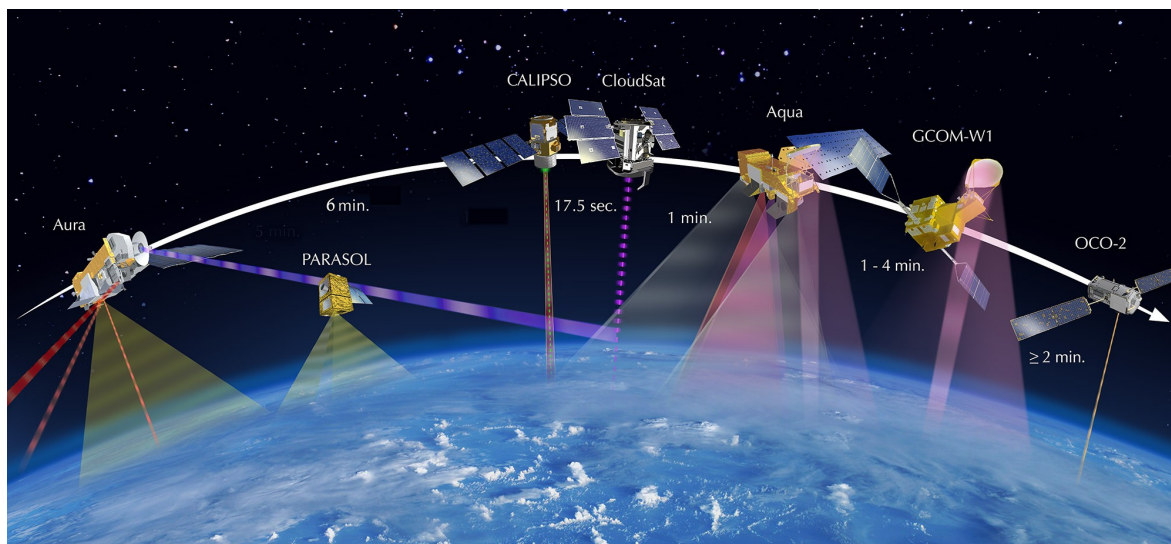
### 2.5.3 Satélites - CALIPSO, AEOLUS e EarthCARE

O satélite CALIPSO (*Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations*) foi lançado em 28 de abril de 2006, com suas primeiras medidas em Lidar sendo realizadas em junho do mesmo ano (WINKER; HUNT; MCGILL, 2007). Ele operava em uma órbita polar, sincronizada com o Sol, a aproximadamente 705 km de altitude, cruzando o equador por volta das 13h30 no horário solar local durante o período diurno. A cobertura global combinada com seu sistema Lidar proporcionaram dados fundamentais, durante mais de 17 anos de operação contínua, para o estudo da distribuição vertical de aerossóis e nuvens na atmosfera terrestre (NASA, 2005).

O CALIPSO integrou a formação orbital conhecida como A-Train (*Afternoon Train*), uma constelação de satélites de observação da Terra que fornece medições complementares da atmosfera e da superfície terrestre. Essa formação possibilitou observações quase simultâneas de uma ampla variedade de instrumentos, utilizados de forma sinérgica,

para ajudar a comunidade científica a avançar no entendimento sobre o sistema terrestre e aplicar esse conhecimento para o benefício da sociedade (NASA, 2005). A configuração do A-Train pode ser vista na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Ilustração das posições relativas dos satélites que compõe a constelação A-train, tal configuração é referente a junho de 2011



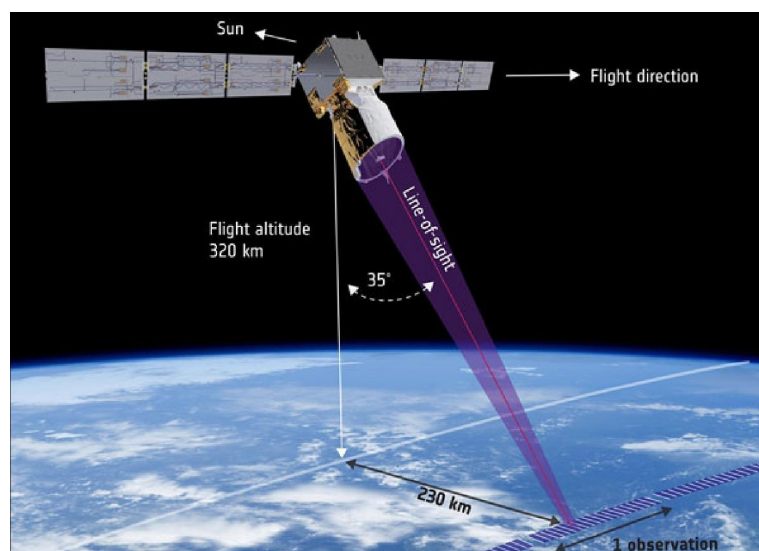
Fonte: (NASA, 2005)

Um dos instrumentos a bordo desse satélite é o sistema Lidar denominado CALIOP (*Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization*), projetado para realizar medições atmosféricas apontando diretamente para a superfície da Terra. O CALIOP operou em dois comprimentos de onda: 532 nm e 1064 nm, fornecendo perfis verticais de aerossóis e nuvens com alta resolução vertical, entre outros. Além do CALIOP, o satélite é equipado com dois instrumentos passivos: uma câmera de campo amplo, com comprimento de onda operante de 650 nm, com resolução espacial de 125 metros por pixel e campo de visão de 2.5 km, realizando varreduras de até 30 km; e um radiômetro de imageamento no infravermelho térmico, com três canais espectrais, resolução espacial de 1 km e largura de varredura de até 61 km (WINKER et al., 2009). Esses instrumentos complementaram as observações ativas do Lidar, fornecendo contexto adicional sobre a cobertura de nuvens e propriedades da superfície. O período de operação do CALIPSO, encerrado em 2023, superou as expectativas iniciais da missão, consolidando o CALIPSO como um marco de referência em termos de longevidade e contribuição científica na observação remota de nuvens e aerossóis atmosféricos.

Em 22 de agosto de 2018, o satélite Aeolus foi lançado. Esse satélite, desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA), se destacou por carregar o primeiro Lidar Doppler de Vento (DWL) baseado no espaço. Seu principal objetivo científico foi aprimorar as previsões meteorológicas e aprofundar o entendimento sobre a dinâmica atmosférica, especialmente em relação ao ciclo de energia e água da atmosfera. O instrumento a bordo,

denominado ALADIN (Atmospheric LAsEr Doppler INstrument), começou a operar com saída de alta energia em 4 de setembro de 2018 (STRAUME-LINDNER et al., 2021). Uma diagrama esquemático do satélite pode ser visto na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Diagrama de observação do satélite Aeolus, ilustrando sua linha de trajetória, inclinação do campo de visão, altitude, entre outros



Fonte: (ESA, 2024a)

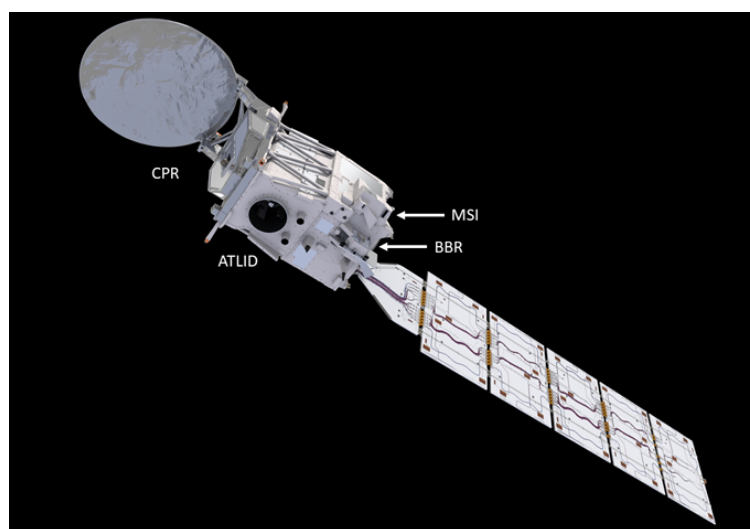
O principal produto gerado foram perfis de vento ao longo da linha de observação, desde a superfície até cerca de 30 km de altitude, além de produtos secundários relacionados às propriedades ópticas de nuvens e aerossóis. O sistema de processamento em solo permitia a entrega dos dados de Nível 2 em quase tempo real (cerca de 3 horas após a coleta) desde o início da missão (STRAUME-LINDNER et al., 2021). O ALADIN foi capaz de fornecer dados de velocidade do vento variando entre -150 e 150 m/s, abrangendo três regiões atmosféricas: a Camada Limite Planetária (PBL), a troposfera e a baixa estratosfera. O Aeolus operava em órbita heliossíncrona, com altitude média de 320 km, inclinação de  $96.97^\circ$  e período orbital de 92.5 minutos, completando um ciclo de repetição a cada sete dias. O satélite cruzava a linha do equador às 18:00 (ascendente) e às 06:00 (descendente) (ESA, 2024a).

Em julho de 2023, a missão foi concluída com sucesso por meio de uma manobra inédita de reentrada assistida, na qual o satélite teve sua órbita gradualmente reduzida de 320 km para 120 km, culminando na reentrada atmosférica em 28 de julho de 2023, por volta das 21:00 (CEST), sobre a Antártica — evento confirmado pelo Comando Espacial dos EUA. Essa operação pioneira teve como objetivo minimizar riscos, garantindo que possíveis fragmentos não queimados caíssem dentro das rotas planejadas sobre o Oceano Atlântico (ESA, 2024a). Atualmente, existe uma continuação planejada ao Aeolus, para ser lançada no início da década de 2030.

Lançado no dia 28 de maio de 2024, o satélite EarthCARE (*Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer*), foco principal deste trabalho, está equipado com quatro instru-

mentos principais: um Lidar Atmosférico (ATLID), um Radar de Perfilamento de Nuvens (CPR), um Imageador Multiespectral (MSI) e um Radiômetro de Banda Larga (BBR), projetados para a observação sinérgica de nuvens e aerossóis, utilizando quatro métodos distintos de sensoriamento remoto. A plataforma do satélite foi desenvolvida com estabilização em três eixos e estruturada especificamente para acomodar os quatro instrumentos, que exigem uma visão desobstruída da Terra, além de acesso livre para calibração solar dos sensores passivos (WEHR et al., 2023). Uma impressão artística destacando a localização dos instrumentos na plataforma do satélite pode ser vista na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Impressão artística do satélite EarthCARE com a localização dos quatro instrumentos científicos a bordo



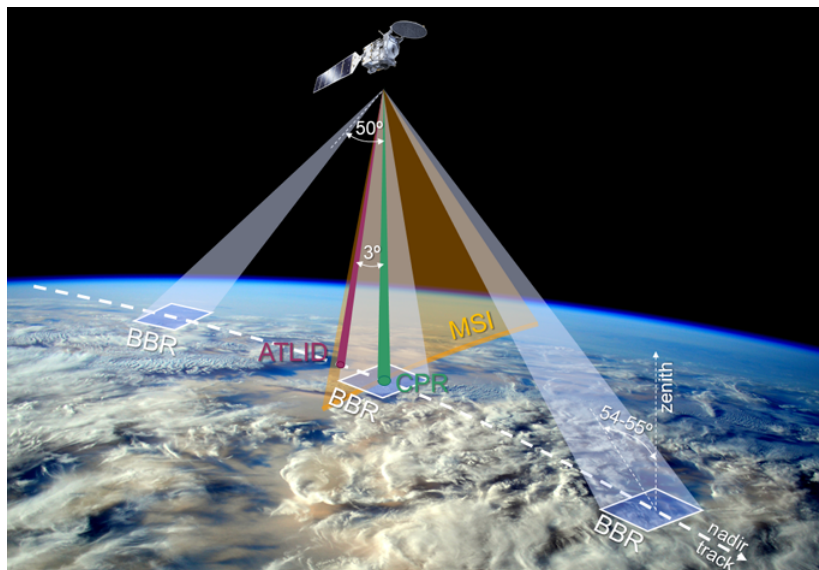
Fonte: ESA/ATG medialab (ESA, 2024d)

O satélite foi construído com uma estrutura composta por polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP), um material leve e altamente estável. Seu formato aerodinâmico, com um painel solar traseiro em configuração alongada, foi cuidadosamente projetado para minimizar a seção transversal da nave, reduzindo assim o arrasto atmosférico residual decorrente de sua órbita relativamente baixa, situada a uma altitude média esférica de aproximadamente 393 km (WEHR et al., 2023). A escolha dessa altitude foi estratégica, pois proporciona melhor desempenho para os instrumentos ativos da missão — o Radar e o Lidar. O satélite opera em uma órbita heliosíncrona, o que significa que ele cruza o equador sempre no mesmo horário solar local. No caso do EarthCARE, esse cruzamento ocorre às 14:00 horas do Tempo Solar Médio Local (MLST) durante o nodo descendente. A órbita possui uma inclinação de  $97^\circ$  e um tempo de revisita global de 25 dias, completando 389 órbitas nesse período (WEHR et al., 2023). Uma ilustração da geometria de visualização do EarthCARE pode ser vista na Figura 2.15.

Para suprir sua demanda energética, o satélite utiliza um painel solar dobrável, capaz de fornecer em média 1710 watts no final da vida útil da missão. A energia é armazenada em baterias de íons de lítio, com capacidade total de 324 ampère-horas (Ah),



Figura 2.15 – Ilustração da geometria de visualização do EarthCARE, bem como as áreas de cobertura e inclinação de cada instrumento (não proporcional)



Fonte: (WEHR et al., 2023)

garantindo autonomia e funcionamento contínuo mesmo em períodos de sombra orbital. A massa total do satélite é de 2350 kg, incluindo 313 kg de propelente hidrazina, suficiente para três anos de operação nominal, além de uma reserva adicional para mais um ano, caso seja necessário estender a missão (WEHR et al., 2023).

Como discutido anteriormente, a missão EarthCARE tem como principal objetivo aprofundar o conhecimento sobre as interações entre nuvens, aerossóis e radiação no sistema climático terrestre. Para isso, o satélite faz a medição de perfis verticais detalhados de nuvens, aerossóis e precipitação ao longo de sua trajetória, fornecendo cenas tridimensionais dessas estruturas atmosféricas. Além de dar continuidade a missões anteriores como CloudSat e CALIPSO.

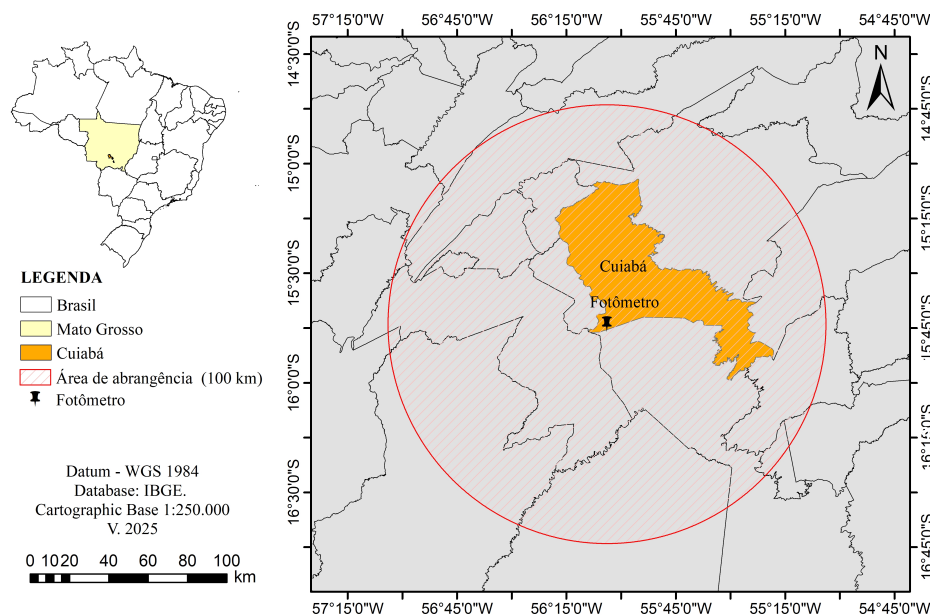
Além disso, esta missão representa um avanço significativo em relação a satélites predecessores e a constelação A-Train, ao adotar uma abordagem verdadeiramente sinérgica no estudo das nuvens, aerossóis e radiação atmosférica. Enquanto o CALIPSO e o CloudSat focavam separadamente em perfis verticais de aerossóis/nuvens e precipitação, o EarthCARE integra quatro instrumentos complementares a bordo de um único satélite. Essa configuração permite a observação simultânea e coordenada de múltiplos processos atmosféricos, com maior resolução vertical e cobertura global. Missões anteriores muitas vezes dependiam da composição de dados entre satélites distintos, o EarthCARE oferece dados colocalizados, otimizando a acurácia na modelagem climática e na previsão numérica do tempo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo está localizada na Fazenda Miranda, situada a aproximadamente 20 km a sudeste da área urbanizada de Cuiabá, Mato Grosso, um mapa pode ser visualizado na Figura 3.1. Cuiabá, capital do estado, está inserida no bioma Cerrado, caracterizado por sua dinâmica climática única, influenciada pela latitude e altitude. Essa área apresenta uma forte sazonalidade, com uma estação chuvosa distinta durante a primavera e o verão, seguida por um período seco no outono e no inverno (NASCIMENTO; NOVAIS, 2020). A Fazenda Miranda está em uma região de transição entre áreas rurais e urbanas, o que a torna um local estratégico para estudos atmosféricos, especialmente para a análise de aerossóis e suas interações com a radiação solar.

Figura 3.1 – Localização da área de estudo, onde está situada a estação da AERONET de Cuiabá, sobre a qual foram obtidos os dados do satélite EarthCARE para a profundidade óptica dos aerossóis, dentro do raio de alcance (100 km)



Fonte: Elaborado pelo autor

O radiômetro espectral da rede AERONET instalado na Fazenda Miranda fornece dados contínuos sobre as propriedades ópticas e microfísicas dos aerossóis na atmosfera, como a profundidade óptica de aerossóis (AOD) e expoente de Angstrom (HOLBEN et



al., 1998). Esses dados são essenciais para compreender o impacto dos aerossóis no balanço radiativo regional, especialmente em uma área como Cuiabá, que é continuamente influenciada pelas emissões de queima de biomassa durante a estação seca, além de fontes urbanas e naturais de partículas (PALÁCIOS et al., 2020). A localização da Fazenda Miranda permite capturar tanto as emissões provenientes da área urbana de Cuiabá quanto as contribuições de fontes naturais e agrícolas da região.

A estação da AERONET em Cuiabá está situada em uma região de transição entre os biomas Cerrado e Pantanal, desempenhando um papel fundamental na pesquisa sobre a dinâmica ambiental dessa área ao longo das últimas duas décadas. Cuiabá–Miranda permanece como uma das estações mais longevas da rede em termos de monitoramento, mantendo-se em operação com uma base de dados ativa há mais de 25 anos. Estudos anteriores que comparam as medições dessa estação com observações de satélites, como os sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Aqua e Terra, destacam diferenças significativas na profundidade óptica dos aerossóis entre o Cerrado e áreas florestais adjacentes. Esses estudos indicam que as estimativas de AOD tendem a ser mais elevadas no Cerrado, refletindo as características das emissões de aerossóis nessa região (PEREIRA et al., 2022).

### 3.2. FOTÔMETRO SOLAR DA AERONET

Os dados de profundidade óptica dos aerossóis (AOD) utilizados neste estudo foram adquiridos por meio da Aerosol Robotic Network (AERONET), uma rede global de monitoramento de aerossóis. Os dados estão disponíveis no site oficial da AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). A AERONET é uma rede de sensoriamento remoto de aerossóis iniciada e mantida pela NASA, com o objetivo de fornecer suporte às missões de satélites da NASA, CNES e NASDA. O projeto foi posteriormente expandido por meio de colaborações nacionais e internacionais, consolidando-se como uma das principais referências para a calibração e validação de medições de aerossóis (HOLBEN et al., 1998).

A iniciativa teve início na década de 1990 com o propósito de monitorar as propriedades ópticas dos aerossóis a partir de medições realizadas em solo, além de validar imagens de satélite relacionadas a essas propriedades (TOLEDANO et al., 2007). A rede é composta por radiômetros solares robóticos padronizados (Figura 3.2), distribuídos globalmente. Esses instrumentos realizam medições da radiação solar direta e da intensidade do céu ao longo do dia, abrangendo comprimentos de onda que vão do ultravioleta ao infravermelho.

A maioria dos radiômetros solares utilizados na rede AERONET são do modelo CIMEL 318A, projetados para medições precisas da radiação solar em diversos comprimentos de onda. Esses instrumentos possuem sensores acoplados a colimadores de 33 cm de comprimento, que são construídos para minimizar a luz difusa refletida por suas

Figura 3.2 – Arranjo geral de medições da AERONET, incluindo o radiômetro solar, antena de transmissão de dados, painel solar, entre outros



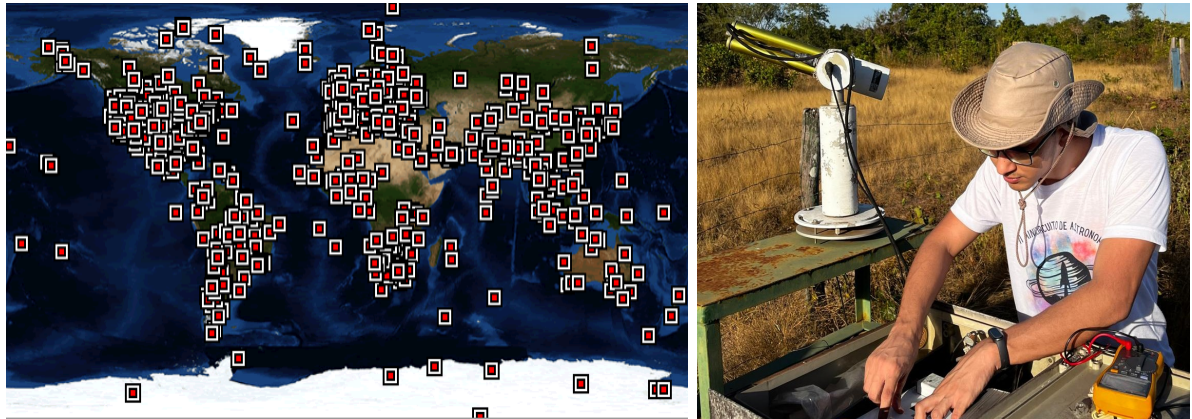
Fonte: (SENA, 2013)

paredes internas. Os colimadores são protegidos por uma janela de quartzo, permitindo a transmissão da radiação incidente para um detector de silício enriquecido, cuja alta relação sinal-ruído garante medições espectrais precisas na faixa de 300 a 1200 nm.

Os sensores são montados em um sistema robótico que automatiza a coleta de dados, realizando o apontamento dos colimadores para o Sol conforme uma rotina pré-programada. O rastreamento solar ocorre nos ângulos zenital e azimutal, sendo controlado por motores de passo com precisão de  $0.05^\circ$ . A posição do Sol é calculada por um microprocessador, utilizando informações de hora, latitude e longitude, garantindo que os colimadores sejam direcionados com uma precisão inferior a  $1^\circ$ . Um pequeno detector de alinhamento ajusta o apontamento final antes do início da sequência de medições (HOLBEN et al., 1998).

Ao término das medições, o instrumento retorna à sua posição de repouso, apontando aproximadamente para o nadir. Além disso, um sensor de umidade integrado ao sistema cancela automaticamente as medições caso ocorra precipitação, garantindo a qualidade dos dados coletados. O radiômetro CIMEL 318A é capaz de medir tanto a radiação direta quanto a radiação difusa, permitindo análises detalhadas da interação da luz solar com os aerossóis atmosféricos (HOLBEN et al., 1998). A Figura 3.3 mostra a distribuição global de estações da AERONET, bem como um registro da estação utilizada neste trabalho.

Figura 3.3 – À esquerda, rede de fotômetros AERONET espalhadas pelo globo terrestre. À direita, registro de visita de manutenção ao fotômetro presente na Fazenda Miranda, em Cuiabá



Fonte: AERONET, disponível em: [aeronet.gsfc.nasa.gov/](http://aeronet.gsfc.nasa.gov/)

Os dados de profundidade óptica dos aerossóis (AOD) disponibilizados pela AERONET são classificados em três níveis de qualidade: nível 1.0, que corresponde aos dados brutos sem qualquer processamento; nível 1.5, que passa por um controle preliminar de qualidade para remoção de contaminações por nuvens e outras interferências; e nível 2.0, que representa os dados finais com qualidade garantida, os quais foram submetidos a um rigoroso processo de correção e validação pós-campo pela equipe da AERONET. Esse controle inclui ajustes para calibração, eliminação de contaminação por nuvens e aplicação de algoritmos para correção de possíveis erros instrumentais. Além do AOD, a rede também disponibiliza medições de água precipitável, que seguem os mesmos critérios de controle de qualidade, garantindo a confiabilidade dos dados atmosféricos obtidos (HOLBEN et al., 1998).

Neste estudo, foram utilizados os dados de AOD nível 1.5 da estação Cuiabá-Miranda, integrante da AERONET, localizada no estado de Mato Grosso, Brasil. A estação está instalada na Fazenda Miranda, situada nas coordenadas geográficas  $15^{\circ}43'44''S$  de latitude e  $56^{\circ}01'15''W$  de longitude. Essa localização permite a obtenção de dados representativos das condições atmosféricas da região de transição entre os biomas Cerrado e Pantanal. A AERONET também fornece dados como o albedo simples ( $\omega_o$ ), expoente de Ångström ( $\alpha$ ), entre outros.

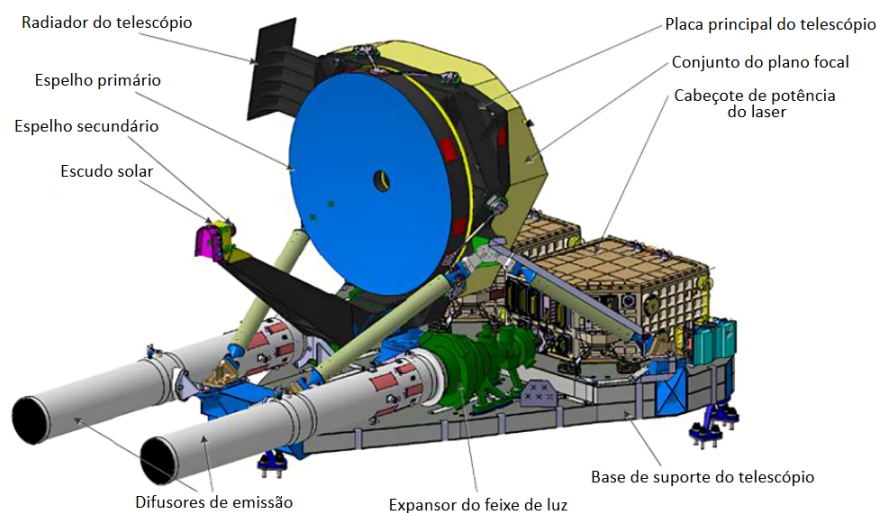
### 3.3. SATÉLITE EARTHCARE - ATLID

À bordo do EarthCARE, o ATLID é um instrumento Lidar Atmosférico de Alta Resolução Espectral (HSRL), desenvolvido para detectar limites de nuvens e realizar o perfilamento de nuvens opticamente finas e aerossóis. Esse sistema utiliza a técnica de detecção de fótons retroespalhados com alta resolução espectral que, como visto anteriormente, permite uma separação entre o sinal molecular e o sinal de particulados. O

instrumento foi desenvolvido pela empresa Airbus Defence and Space, sediada na França.

O ATLID foi projetado como um instrumento autônomo, o que reduz o acoplamento mecânico com a plataforma e oferece maior flexibilidade durante a integração ao satélite. Sua arquitetura é do tipo bistática, o subsistema emissor conta com dois lasers, sendo um utilizado por vez, enquanto o outro permanece em reserva para garantir a continuidade das operações em caso de falha. Apenas um elemento óptico está exposto ao vácuo e iluminado pelo laser, uma escolha de projeto que visa minimizar o risco de contaminação induzida por laser nas superfícies ópticas (WEHR et al., 2023), aumentando assim a confiabilidade e a durabilidade do instrumento em ambiente orbital. A Figura 3.4 mostra um esboço esquemático da configuração do ATLID, incluindo as duas fontes laser.

Figura 3.4 – Ilustração da arquitetura do ATLID, mostrando a sua configuração biestática e disposição dos componentes



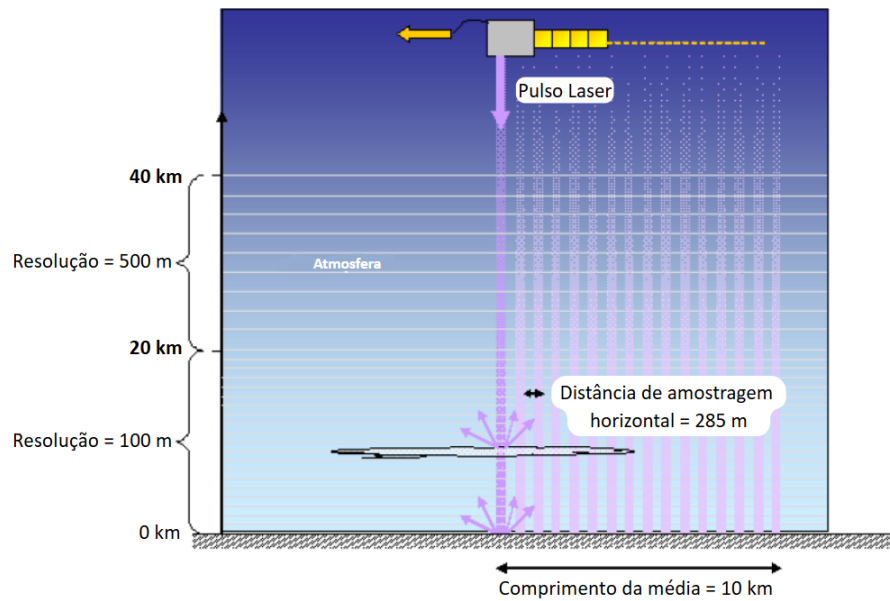
Fonte: Adaptada de (WEHR et al., 2023)

O ATLID mede perfis atmosféricos em uma direção próxima ao nadir (com ângulo de 3 graus ao longo da trajetória do satélite), com uma resolução vertical de cerca de 103 m (a partir do solo até 20.2 km de altitude) e 500 m (para 20.2 até 40 km de altitude). O transmissor emite pulsos curtos de laser na faixa do ultravioleta ( $\sim 355$  nm), com uma taxa de repetição de 51 Hz, o que equivale a uma resolução espacial aproximada de 140 metros ao longo da trajetória horizontal do satélite, como apresentado na Figura 3.5.

A recepção do sinal retroespalhado é realizada por um telescópio de aproximadamente 60 cm de diâmetro, que coleta os fótons dispersos de volta pela atmosfera. Os pulsos UV transmitidos pelo ATLID sofrem espalhamento do tipo Mie, causado por aerossóis atmosféricos e caracterizado por não alterar o espectro da luz incidente, bem como espalhamento Rayleigh, decorrente do movimento browniano das moléculas atmosféricas, que provoca o alargamento espectral da radiação.



Figura 3.5 – Diagrama ilustrando as abordagens de medição e amostragem do ATLID, com as devidas resoluções



Fonte: Adaptado de (ESA, 2024b)

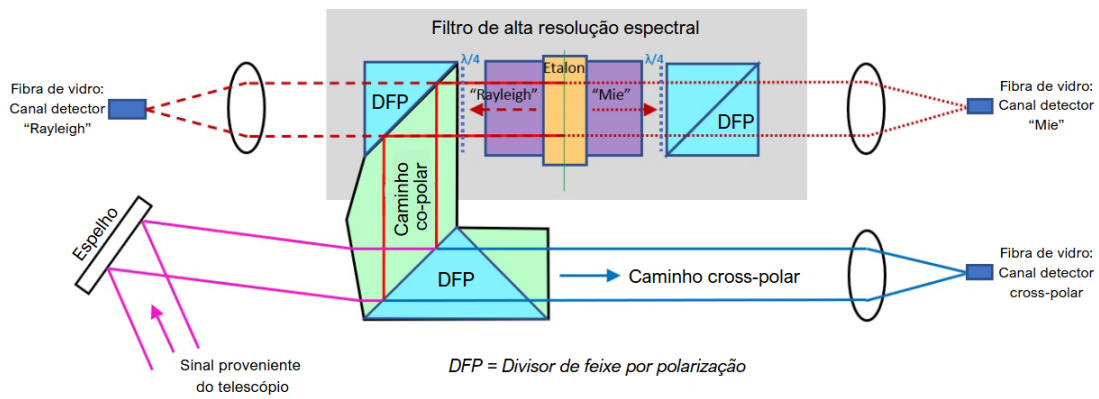
Para diferenciar essas contribuições, o sistema receptor utiliza um filtro espectral de alta resolução do tipo Etalon Fabry-Pérot, permitindo a separação entre os componentes Rayleigh e Mie, o que possibilita a estimativa da profundidade óptica dos aerossóis. Além disso, os componentes *co-polar* e *cross-polar* do espalhamento por partículas são medidos em canais dedicados, permitindo a classificação dos tipos de aerossóis (ESA, 2024b). Isso é possível, pois tais componentes definem se a luz espalhada pelos aerossóis mantém a mesma orientação de polarização do feixe de laser incidente, implicando na medição do grau de esfericidade dessas partículas. Um esquema do caminho óptico do receptor integrado ao ATLID pode ser visto na Figura 3.6.

O canal Rayleigh do ATLID possui sensibilidade suficiente para detectar profundidades ópticas de aerossóis e nuvens cirrus tão baixas quanto 0.05. O instrumento também garante medições com erro de linearidade inferior a 3%, estabilidade radiométrica da ordem de 1% e calibração em voo da resposta absoluta dos canais Mie e Rayleigh com precisão superior a 10% (ESA, 2024b). A determinação dos termos constantes e dos coeficientes de calibração do instrumento ATLID é fundamentada em uma abordagem de monitoramento contínuo *in – flight*, visto que a sensibilidade dos filtros de Fabry-Pérot e a pureza espectral do laser podem sofrer derivas em ambiente orbital.

O processo de calibração baseia-se na separação do sinal de retroespalhamento molecular (Rayleigh) e de partículas (Mie) através de um sistema de equações lineares que modela a interferência espectral conhecida como *crosstalk* entre os canais. Para quantificar esses termos, o ATLID utiliza a técnica de normalização molecular em regiões da estratosfera (entre 30 e 40 km), onde a ausência de aerossóis permite que o sinal medido

seja comparado diretamente com modelos de densidade atmosférica conhecidos, servindo como um alvo de calibração natural para ajustar as constantes de ganho e eficiência de transmissão (WEHR et al., 2023). As constantes Lidar de cada canal são calibradas utilizando o retroespalhamento atmosférico (ecos da estratosfera e do solo) em conjunto com um modelo de previsão de retroespalhamento e um local de teste selecionado com albedo do solo e profundidade óptica da atmosfera conhecidos (ESA, 2024c).

Figura 3.6 – Esquema do caminho óptico do receptor ATLID: O sinal retroespalhado, coletado pelo telescópio, atravessa um divisor de feixe por polarização. Os componentes são devidamente separados por meio de fibra óptica, até o canal dedicado à detecção dos mesmos



Fonte: Adaptado de (WEHR et al., 2023)

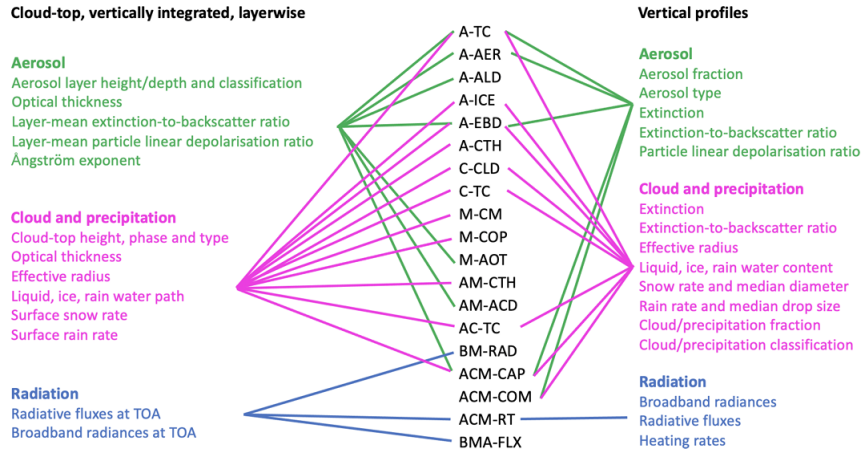
O produto A-ALD 2A, utilizado neste trabalho, fornece informações geométricas e ópticas detalhadas sobre camadas de aerossóis na atmosfera, considerando apenas condições livres de nuvens. Ele identifica o número de camadas significativas em um perfil vertical, seus limites superiores e inferiores, e calcula parâmetros ópticos médios de cada camada, como coeficientes de extinção e retroespalhamento, razão Lidar, razão de depolarização linear de partículas e a profundidade óptica de aerossóis (AOD) integrada na coluna atmosférica, todos para o comprimento de onda de 355 nm do ATLID (WANDINGER et al., 2023). A Figura 3.7 mostra um panorama de alguns dos produtos de nível 2 (L2) do EarthCARE processados pela ESA.

Os produtos de dados L2 incluem uma ampla gama de parâmetros geofísicos relacionados a aerossóis, nuvens, precipitação e radiação. A totalidade de produtos L2a e L2b correspondem a coleções da ESA e JAXA, contendo parâmetros de aerossóis, nuvens, precipitação e radiação. Uma lista completa, bem com a descrição metodológica detalhada da geração dos produtos pode ser encontrada nas referências (WEHR et al., 2023).

### 3.4. MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar a concordância entre as medidas de profundidade óptica dos aerossóis (AOD) obtidas pelo satélite EarthCARE e pelo fotômetro solar da AERONET, foi adotada uma abordagem estatística baseada na comparação direta entre os

Figura 3.7 – Visão geral dos produtos de dados L2a e L2b da ESA contendo parâmetros extraídos referentes a aerossóis, nuvens, precipitação e radiação. A coluna no meio lista os nomes dos respectivos produtos de nível 2



Fonte: (WEHR et al., 2023)

conjuntos de dados para cada um dos estudos de caso. Sendo todas as análises conduzidas em linguagem Python, com suporte das bibliotecas `h5py`, `folium`, `NumPy`, `Pandas`, `Matplotlib`, `Seaborn` e `SciPy`. Os métodos estatísticos utilizados, como Erro Médio, Erro Absoluto Médio, RMSE, entre outros, são recomendados como medidas de desempenho para viés, precisão e exatidão pelo documento oficial de Melhores práticas para a validação de perfis de aerossol, nuvem e precipitação (AMIRIDIS et al., 2025), elaborado por diversas instituições e agências com experiência e/ou expertise no tema.

### 3.4.1 Média Aritmética

A média simples (*mean*) foi calculada para sintetizar o valor médio das medições em cada conjunto de dados, dada por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

onde  $x_i$  representa cada valor individual de AOD e  $n$  o número total de observações.

### 3.4.2 Desvio Padrão

O desvio padrão ( $\sigma$ ) foi utilizado para quantificar a variabilidade dos dados:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

Essa métrica é importante para avaliar a dispersão dos dados em relação à média.

### 3.4.3 Erro Médio, Erro Absoluto Médio e RMSE

Para caracterizar as diferenças entre as médias do EarthCARE e da AERONET, foram utilizadas três métricas:

- **Erro médio (ME):**

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (3.3)$$

- **Erro absoluto médio (MAE):**

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (3.4)$$

- **Raiz do erro quadrático médio (RMSE):**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3.5)$$

onde  $x_i$  são os valores estimados pelo EarthCARE e  $y_i$  os valores medidos pela AERONET.

### 3.4.4 Correlação de Pearson

A correlação linear de Pearson foi utilizada como medida exploratória da relação linear entre os valores médios de AOD dos dois sensores. O coeficiente é definido por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.6)$$

O valor de  $r$  varia entre -1 e 1, sendo que valores próximos de 1 indicam forte correlação positiva, enquanto valores próximos de 0 indicam fraca ou nenhuma correlação linear (UFPR, 2005; MUKAKA, 2012).

### 3.4.5 Previsão e reconstrução das passagens do EarthCARE

Considerando que os feixes laser emitidos por sistemas Lidar a bordo de satélites raramente cruzam diretamente sobre as estações de fotometria solar em superfície, a validação dos produtos de AOD obtidos por Lidar deve levar em conta uma distância máxima aceitável entre o feixe e a localização da estação de referência (AMIRIDIS et al., 2025). Estudos consistentes adotam abordagens que minimizam essa distância, utilizando valores compatíveis com a resolução horizontal média dos perfis verticais (ou “cortinas”) obtidos pelos sensores Lidar a bordo dos satélites (SCHUSTER et al., 2012). No caso da missão EarthCARE, essa distância horizontal de referência para os produtos de AOD é

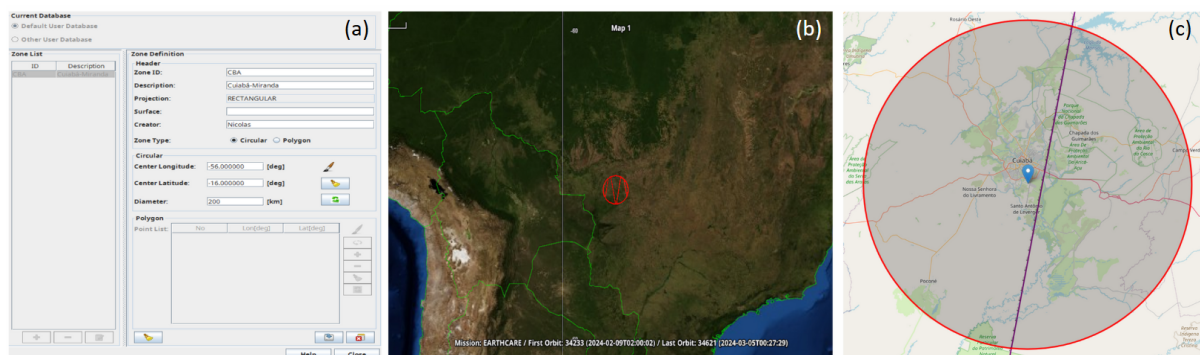


de aproximadamente 10 km (WANDINGER et al., 2023). Adicionalmente, medições co-localizadas entre o satélite CALIPSO e sistemas Lidar de solo, considerando um raio de até 100 km, foram empregadas para investigar a representatividade espaço-temporal das propriedades ópticas dos aerossóis em distintas condições atmosféricas (PAPPALARDO et al., 2010). Os resultados indicam maior representatividade espacial durante eventos de larga escala, enquanto em altitudes mais baixas a representatividade tende a ser reduzida.

A metodologia empregada para a previsão e reconstrução das passagens do satélite EarthCARE sobre a região de Cuiabá, dentro de um raio de 100 km centrado no fotômetro da AERONET, baseou-se na utilização do software ESOV (*Earth Observation Swath and Orbit Visualisation Tool*). Esta ferramenta, recomendada pela ESA, permite a visualização, previsão e reconstrução das órbitas de diversos satélites ao redor do globo terrestre. O raio de 100 km foi escolhido devido a baixa disponibilidade de dias com medidas sinérgicas disponíveis entre o ATLID e o fotômetro solar, de modo a priorizar a seleção do maior número de observações possível dentro de uma faixa de alcance razoável.

Por meio do ESOV, é possível definir um raio de interesse centrado em coordenadas específicas, visualizar as passagens do EarthCARE e filtrar apenas aquelas que cruzam essa área. No presente trabalho, essa área foi definida como um círculo com raio de 100 km centrado na localização do fotômetro solar da AERONET, situado na fazenda Miranda, em Cuiabá. A Figura 3.8 ilustra os principais passos adotados para a identificação dos intervalos de tempo em que o satélite sobrevoou a região de interesse: (a) definição do raio e das coordenadas centrais; (b) visualização das trajetórias do satélite que cruzam o círculo durante os períodos especificados; e (c) replotagem da trajetória no ambiente *Python*, a partir das coordenadas de latitude, longitude e tempo extraídas dos arquivos de dados de cada produto.

Figura 3.8 – Capturas de tela referentes aos três principais passos tomados para a reconstrução das passagens do EarthCARE por Cuiabá, sendo: (a) Configuração da localização e tamanho da região de alcance, (b) Visualização da região e passagens do satélite interiores a mesma e (c) Replotagem da trajetória do EarthCARE num mapa em linguagem *Python*



Fonte: Elaborada pelo autor

A etapa adicional de replotagem em *Python* revelou-se necessária após a identificação de defasagens nos intervalos de tempo estimados pelo ESOV. Como pequenas

diferenças temporais — da ordem de poucos segundos — podem implicar em desvios espaciais significativos, comprometendo a precisão da análise, ajustes manuais foram realizados com base nas coordenadas extraídas diretamente dos dados orbitais. Com isso, assegurou-se com maior confiabilidade que as passagens selecionadas ocorreram, de fato, dentro do raio de alcance estipulado ao redor do fotômetro.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DAS PASSAGENS DO EARTHCARE

Neste trabalho, foram identificadas cinco ocasiões em que o satélite EarthCARE passou a uma distância inferior a 100 km da estação da AERONET localizada na Fazenda Miranda, a sudeste da zona urbanizada de Cuiabá.<sup>1</sup> Essas passagens ocorreram nos dias 27/08/2024, 21/09/2024, 25/10/2024, 27/02/2025 e 13/05/2025, e representam as únicas oportunidades com dados coincidentes entre o satélite e o fotômetro durante o período de estudo. Nesta seção, tais dias estão separados em estudos de caso 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Para contextualizar as condições atmosféricas durante a passagem do satélite EarthCARE, foram utilizadas imagens do sensor VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), embarcado no satélite NOAA-20 (JPSS-1), fruto de uma colaboração entre a NASA e a NOAA. As imagens de refletância corrigida fornecidas pelo VIIRS são disponibilizadas em tempo quase real, com resolução espacial de 250 m (imagem), 375 m (bandas I) e 750 m (bandas M), e resolução temporal diária. Por meio da plataforma Worldview e do sistema GIBS (*Global Imagery Browse Services*), foi possível acessar produtos como o mapeamento de refletância na região do visível e infravermelho próximo, além da camada de anomalias térmicas e detecções ativas de queimadas (*Fire and Thermal Anomalies - Day, 375 m*). Os dias e intervalos de tempo para cada passagem, bem como as diferenças de tempo entre as medidas pelo EarthCARE e VIIRS podem ser vistos na Figura 4.1.

Essa camada permite identificar focos ativos de incêndio e outras fontes térmicas, como vulcões e flares de gás, oferecendo informações relevantes sobre a distribuição espacial de queimadas, frequentemente associadas à emissão de aerossóis atmosféricos. A incorporação dessas imagens auxilia na contextualização da carga de aerossóis observada pelos sensores orbitais e em superfície, especialmente durante eventos de emissão provenientes de queimadas. A análise visual auxilia na interpretação das diferenças nas medidas de AOD observadas, visto que em dois dos dias de passagem foram marcados pela presença significativa de focos de queimada.

---

<sup>1</sup>Distância calculada com base nas coordenadas fornecidas pelo produto ATLID e localização da estação AERONET.

Figura 4.1 – Relação de passagens do EarthCARE pela região de estudo, onde as linhas em verde representam a disponibilidade de medidas por ambos sensores, e as linhas em vermelho indicam ausência de medidas por ao menos um deles

| Data       | Intervalo de tempo  | Status                                | Imagens de Satélite (VIIRS - NOAA 20) |
|------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 18/07/2024 | 17:38:17 - 17:38:44 | Sem medidas do EarthCARE              |                                       |
| 29/07/2024 | 17:42:01 - 17:42:11 | Sem medidas do EarthCARE              |                                       |
| 20/08/2024 | 17:37:30 - 17:37:57 | Sem medidas do EC durante a passagem  |                                       |
| 27/08/2024 | 17:39:49 - 17:40:11 | Medidas disponíveis de ambos sensores | Passagem com diferença de 5 min       |
| 05/09/2024 | 17:37:29 - 17:37:57 | Sem medidas do EC durante a passagem  |                                       |
| 21/09/2024 | 17:40:28 - 17:40:43 | Medidas disponíveis de ambos sensores | Passagem com diferença de 1h5min      |
| 30/09/2024 | 17:37:38 - 17:38:05 | Sem medidas do EC durante a passagem  |                                       |
| 16/10/2024 | 17:40:00 - 17:40:11 | Sem medidas do EC durante a passagem  |                                       |
| 25/10/2024 | 17:36:14 - 17:36:41 | Medidas disponíveis de ambos sensores | Passagem com diferença de 2 min       |
| 03/11/2024 | 17:32:38 - 17:32:46 | Passagem fora do raio                 |                                       |
| 10/11/2024 | 17:39:48 - 17:39:53 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 19/11/2024 | 17:35:55 - 17:36:23 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 28/11/2024 | 17:32:55 - 17:33:23 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 05/12/2024 | 17:39:01 - 17:39:12 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 14/12/2024 | 17:35:26 - 17:35:54 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 23/12/2024 | 17:31:45 - 17:31:53 | Passagem fora do raio                 |                                       |
| 30/12/2024 | 17:39:16 - 17:39:20 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 08/01/2025 | 17:34:50 - 17:35:18 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 17/01/2025 | 17:31:20 - 17:31:30 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 02/02/2025 | 17:34:22 - 17:34:49 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 11/02/2025 | 17:34:22 - 17:34:49 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 18/02/2025 | 17:37:55 - 17:38:07 | Sem medidas do EC durante a passagem  |                                       |
| 27/02/2025 | 17:34:03 - 17:34:31 | Medidas disponíveis de ambos sensores | Passagem com diferença de 39 min      |
| 15/03/2025 | 17:37:39 - 17:37:48 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 24/03/2025 | 17:33:41 - 17:34:08 | Sem medidas da AERONET                |                                       |
| 02/04/2025 | 17:33:41 - 17:34:09 | Passagem fora do raio                 |                                       |
| 13/05/2025 | 17:33:10 - 17:33:36 | Medidas disponíveis de ambos sensores | Passagem com diferença de 8 min       |

Fonte: Elaborada pelo autor

## 4.2. PARÂMETROS DE CONSIDERAÇÃO DOS DADOS

Para cada passagem, foram considerados os dados do EarthCARE (produto ATLID ALD 2A - AOD 355 nm) dentro de um raio de 100 km da estação. Esses dados foram filtrados para remover incertezas superiores a um valor limite de 20% (exceto pelo caso do dia 21/09, devido às condições atmosféricas locais) e valores extremos utilizados para preencher falhas (nesse caso,  $9.969210 \times 10^{36}$ ).

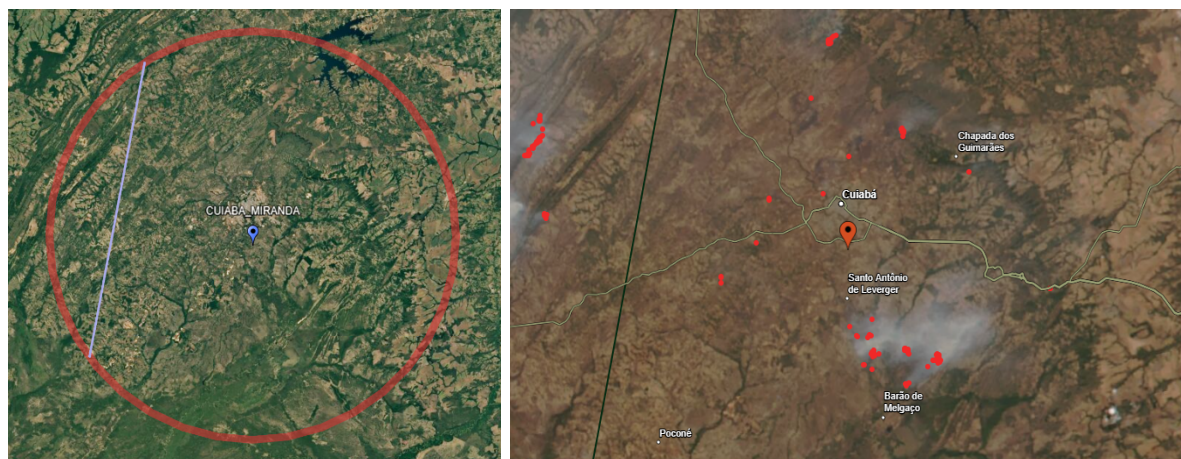
As medidas da AERONET, por sua vez, foram limitadas ao intervalo de 30 minutos antes e depois do horário central da passagem; nos casos 3 e 4, os limites precisaram ser estendidos de acordo com a disponibilidade de medidas da AERONET em relação ao horário central da passagem. A AOD em 355 nm para o conjunto de dados da AERONET foi calculada utilizando o expoente de Angström e as medidas de AOD disponíveis para 340 e 380 nm.

## 4.3. ESTUDO DE CASO 1: 27/08/2024

No dia 27 de agosto de 2024, o satélite EarthCARE realizou uma passagem significativa sobre a região Centro-Oeste do Brasil, incluindo o estado de Mato Grosso, com trajeto cruzando o raio de alcance a oeste do centro (Figura 4.2). As imagens complemen-

tares do VIIRS mostram a presença de focos de queimadas dispersos pelo estado de Mato Grosso, com destaque para uma concentração significativa nas proximidades de Cuiabá.

Figura 4.2 – À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do satélite e destaque dos focos de queimadas em vermelho



Fonte: NASA WorldView, disponível em <[worldview.earthdata.nasa.gov](https://worldview.earthdata.nasa.gov)>

Também é possível identificar, de forma visível, colunas de fumaça associadas à atividade de queimadas, sem a presença de cobertura de nuvens sobre a região, o que favorece a detecção direta dos aerossóis tanto por instrumentos em solo quanto por sensoriamento remoto orbital. Essa situação atmosférica é típica do período seco na região e frequentemente associada à elevação dos valores de AOD devido ao acúmulo de partículas em suspensão oriundas da combustão de biomassa. Essa data é próxima do início do surgimento dos focos de queimada tanto no Brasil quanto no estado de Mato Grosso, para o ano de 2024.

As medidas de AOD do EarthCARE dentro do raio de alcance podem ser observadas no gráfico da Figura 4.3, com o limite de incerteza inferior a 20%. A definição de tal limite foi feita de forma arbitrária, entendendo que é uma margem razoável dadas as condições atmosféricas do dia tratado. As medidas mostraram um comportamento estável, com os valores permanecendo em aproximadamente 0.5.

Os cálculos estatísticos apresentados na Tabela 4.1 mostram que a média dos valores de AOD do EarthCARE foi de 0.45, enquanto a média da AERONET foi de 0.59, resultando em uma diferença absoluta de 0.14. Essa diferença representa um erro percentual de 23.8%, o que é um valor relativamente significativo considerando que a AERONET é uma das principais referências para validação de sensores orbitais. A mediana dos dois conjuntos de dados coincidiu com suas respectivas médias, sugerindo uma distribuição simétrica dos dados em ambos os casos.

Figura 4.3 – Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 27/08/2024, dentro do raio de alcance definido (100 km)

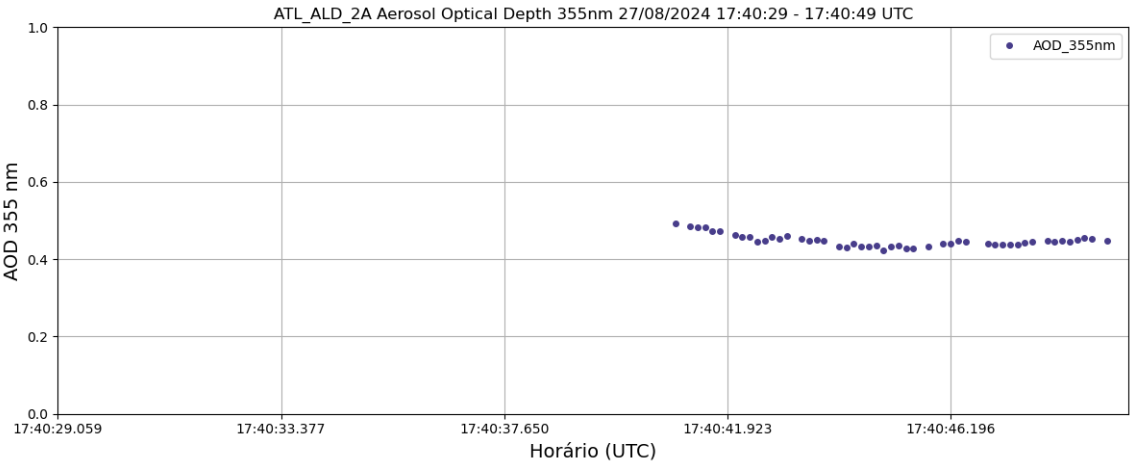


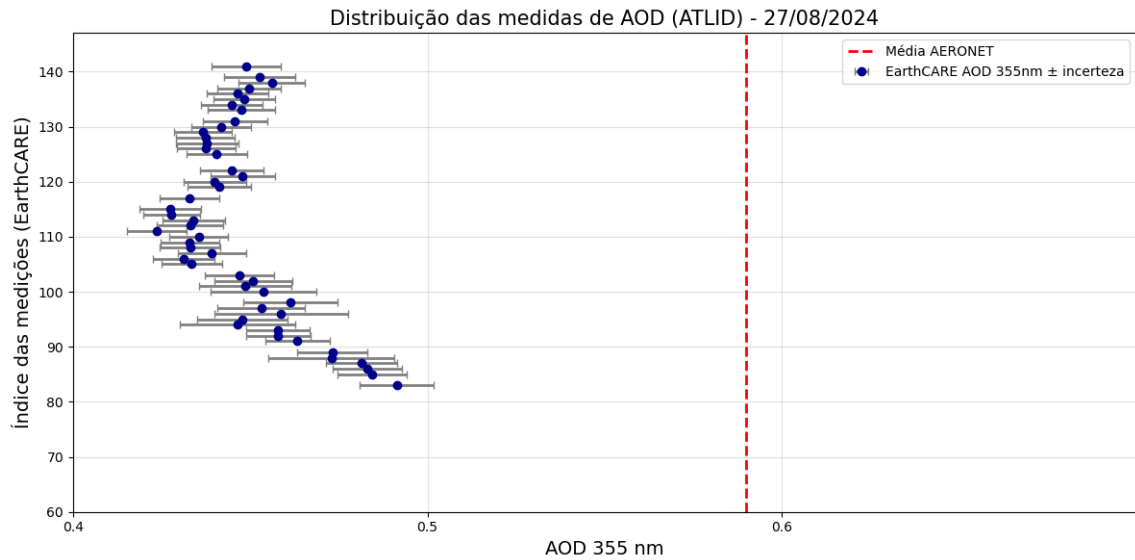
Tabela 4.1 – Resumo estatístico das medidas de AOD 355 nm do EarthCARE e da AERONET em 27/08/2024.

| Parâmetro           | EarthCARE | AERONET |
|---------------------|-----------|---------|
| Nº de medições      | 49        | 12      |
| Média simples       | 0.45      | 0.59    |
| Mediana             | 0.45      | 0.59    |
| Desvio padrão       | 0.015     | 0.018   |
| Diferença absoluta  | 0.14      | —       |
| Erro percentual (%) | 23.8%     | —       |

Apesar da diferença média, a dispersão dos dados de ambos os sensores é baixa, com desvio padrão de 0.015 para o EarthCARE e 0.018 para a AERONET, indicando consistência interna das medições em cada conjunto. Do ponto de vista estatístico, a análise indica que o EarthCARE é capaz de detectar variações de AOD com boa estabilidade, mesmo que com um viés em relação à AERONET neste dia. A diferença observada pode estar associada a diversos fatores, como a presença de focos de queimada e plumas de fumaça próximos da estação, conforme identificado nas imagens do VIIRS, que podem ter afetado de forma distinta as medições orbitais e de superfície; o campo de visão (FOV) do EarthCARE, que cobriu uma faixa distante da localização do fotômetro, podendo ter incorporado variabilidade espacial dos aerossóis fora da coluna observada pela AERONET. A Figura 4.4 mostra um gráfico destacando a variabilidade das medidas do EarthCARE em relação à média calculada para a AOD da AERONET.

Os valores apresentados mostram uma diferença percentual consideravelmente elevada entre os dois conjuntos de dados, da ordem de 20–30% no cenário atmosférico em questão, que se mostrou não trivial e variável. Logo, percebe-se rapidamente a necessidade de considerar as condições atmosféricas locais, a geolocalização das amostras e limitações

Figura 4.4 – Variabilidade das medidas de AOD do EarthCARE em relação a média obtida com a AERONET, para a passagem do dia 27/08/2024



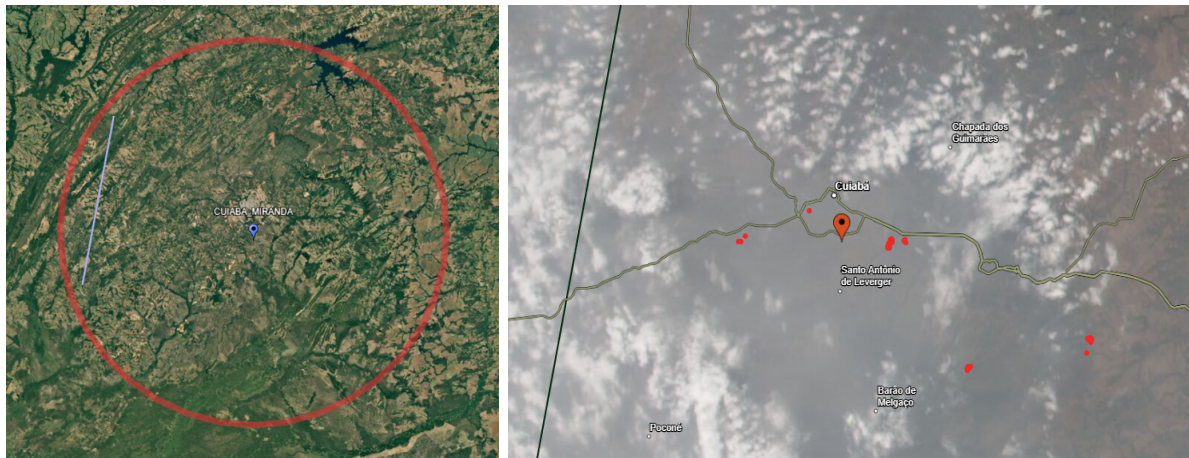
metodológicas em estudos e comparações com baixa densidade amostral.

#### 4.4. ESTUDO DE CASO 2: 21/09/2024

No dia 21 de setembro de 2024, o satélite EarthCARE realizou uma passagem em uma trajetória similar ao caso anterior, cruzando o raio de alcance a oeste do centro (Figura 4.5). A passagem ocorreu durante um episódio severo de poluição atmosférica associado à intensa presença de fumaça de queimadas. As imagens do sensor VIIRS indicaram um cenário dominado por material particulado disperso, com ausência significativa de nuvens e forte influência de aerossóis, o que se reflete diretamente nos valores elevados de AOD observados. As imagens complementares do VIIRS mostram a presença de focos de queimadas e fumaça dispersos pela região. Em relação ao caso anterior, as colunas de fumaça associadas à atividade de queimadas estão mais espalhadas e intensas.



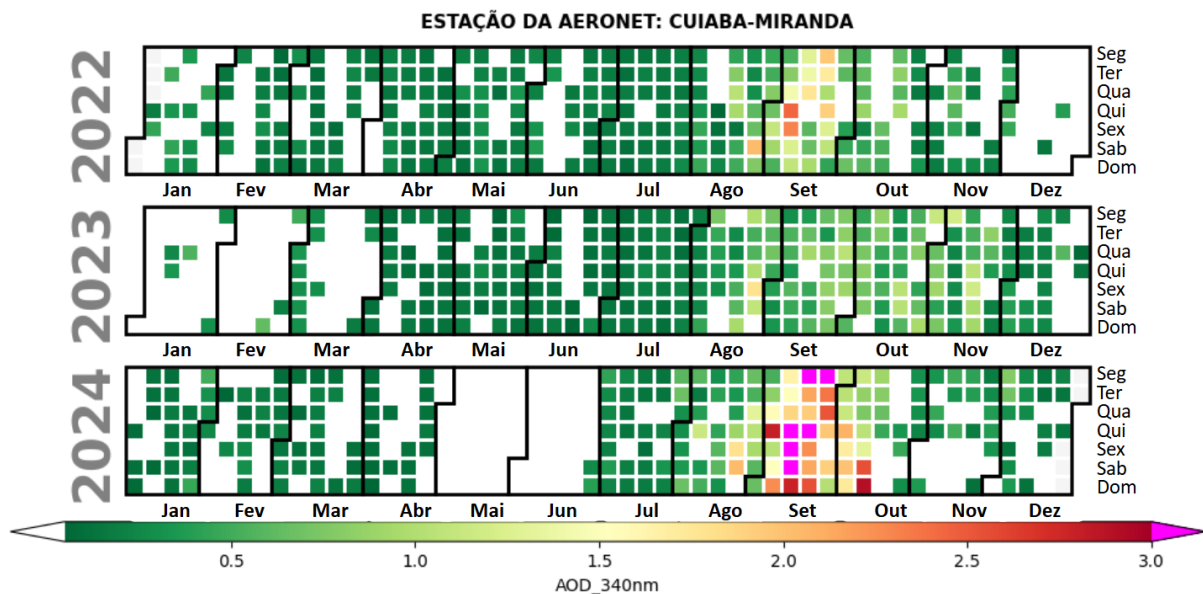
Figura 4.5 – À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do satélite e destaque dos focos de queimadas em vermelho



Fonte: NASA WorldView, disponível em: [worldview.earthdata.nasa.gov](https://worldview.earthdata.nasa.gov)

A situação atmosférica do dia 21/09 é marcada pelos maiores valores de AOD de dentre os casos, vale destacar que o ano de 2024 registrou valores históricos de AOD, devido a forte atividade de queimadas e alta taxa de emissão de aerossóis de queima de biomassa. A Figura 4.6 mostra um gráfico no estilo de calendário, comparando a escala dos valores de AOD nos últimos três anos, setembro de 2024 é de longe o mês com os registros mais altos, nesse caso, tomamos a AOD em 340 nm como referência.

Figura 4.6 – Mapa de calor no estilo calendário, utilizando valores de média diária para AOD em 340 nm do fotômetro de Cuiabá nos anos de 2022, 2023 e 2024, destaca-se os altos valores em setembro de 2024

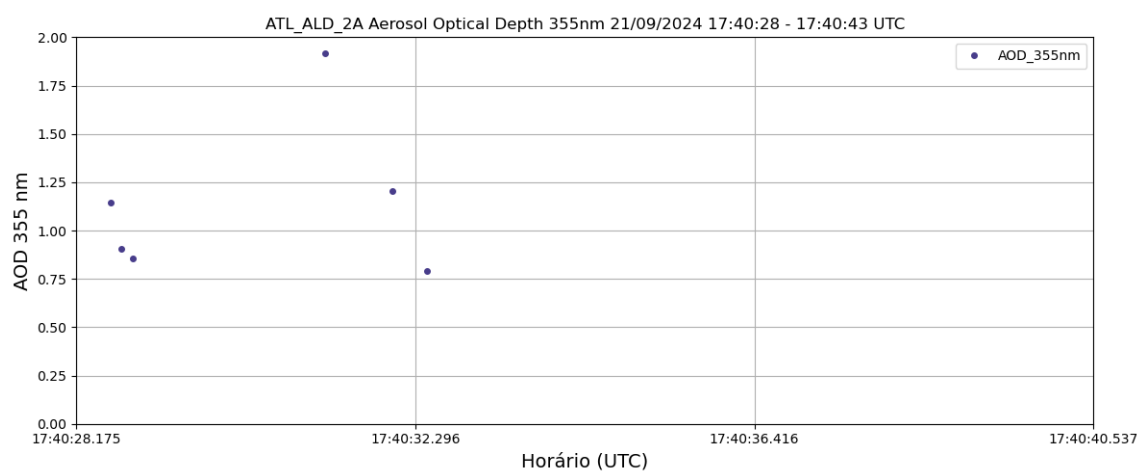


As medidas de AOD do EarthCARE dentro do raio de alcance podem ser observadas no gráfico da Figura 4.7, com o limite de incerteza inferior a 50%. Nesse caso,



a definição de tal limite foi feita de acordo com a disponibilidade dos dados, uma vez que as medidas apresentam alta variabilidade, os limites de incerteza inferiores acabam excluindo praticamente todas as medidas, inviabilizando qualquer tipo de análise. Um cenário atmosférico como esse torna difícil qualquer tipo de comparação entre instrumentos que não estão co-localizados, uma vez que os valores de AOD são instáveis e possuem alta incerteza. Além disso, o algoritmo de ambos instrumentos (Fotômetro e ATLID) trabalha com a filtragem de dados detectados como nuvens, o que pode ocorrer com as plumas de fumaça nessas épocas.

Figura 4.7 – Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 21/09/2024, dentro do raio de alcance definido (100 km)



Os cálculos estatísticos apresentados na Tabela 4.2 mostram que os dados da AERONET apresentaram uma média de AOD de 2.11, com baixa dispersão, indicando estabilidade nas medições e reforçando a intensidade do evento de poluição atmosférica. Por outro lado, os dados do EarthCARE revelaram uma média significativamente menor, de 1.14, com maior variabilidade entre as medições desvio padrão de 0.415. A diferença absoluta entre as médias foi de 0.97, resultando em um erro percentual de 46.12%, um valor elevado que, combinado à maior dispersão dos dados do EarthCARE, pode refletir tanto a escassez de observações (apenas 6 medidas) quanto as limitações da detecção do satélite em condições de saturação óptica elevada por fumaça densa.

Além disso, o ajuste no critério de filtragem de incerteza para 50% foi necessário para manter um número mínimo de observações, o que deve ser interpretado como uma limitação na confiabilidade estatística das medições do satélite para esse evento extremo.

Tabela 4.2 – Resumo estatístico das medidas de AOD 355 nm do EarthCARE e da AERONET em 21/09/2024.

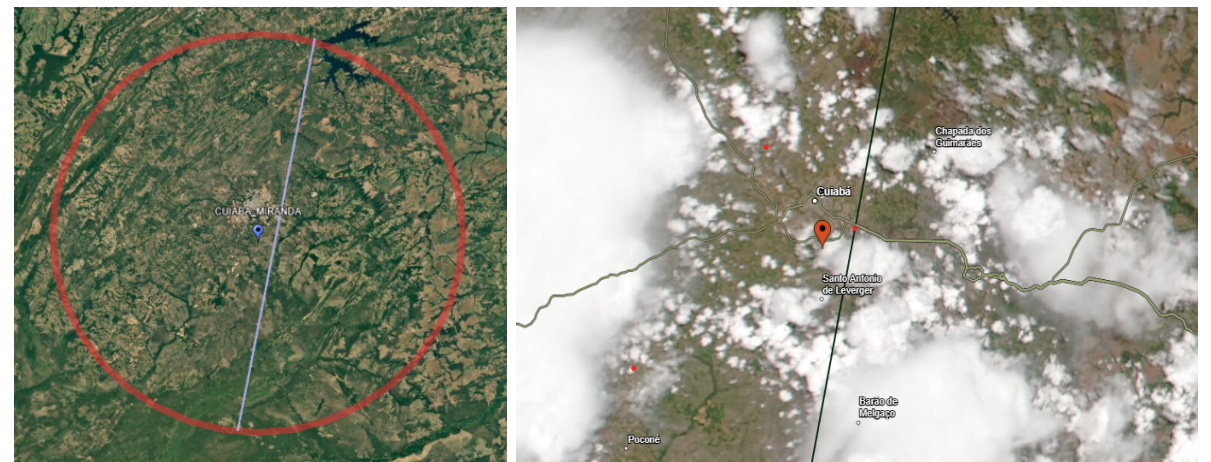
| Parâmetro           | EarthCARE | AERONET |
|---------------------|-----------|---------|
| Nº de medições      | 6         | 11      |
| Média simples       | 1.14      | 2.11    |
| Mediana             | 1.02      | 2.09    |
| Desvio padrão       | 0.415     | 0.068   |
| Diferença absoluta  | 0.97      | —       |
| Erro percentual (%) | 46.12%    | —       |

Apesar das limitações, os dados do EarthCARE ainda demonstram sensibilidade à presença de altos níveis de aerossóis, mas neste caso tenderam a subestimar os valores de AOD em eventos severos de fumaça. Esses resultados reforçam a importância de considerar o contexto atmosférico e as incertezas instrumentais nas análises comparativas, especialmente em campanhas de validação.

4.5. ESTUDO DE CASO 3: 25/10/2024

No dia 25 de outubro de 2024, observou-se uma significativa redução nos focos de queimadas em comparação aos episódios registrados no mês anterior. As imagens do VIIRS revelam apenas dois focos ativos de queimada dentro do raio de 100 km centrado no fotômetro de Cuiabá-Miranda (Figura 4.8). A trajetória do satélite EarthCARE, nessa data, cruzou de forma abrangente a área de interesse, com o menor afastamento registrado de 8.9 km em relação à estação da AERONET. Nota-se, pelas imagens, que a linha de passagem do satélite coincidiu quase exatamente com um dos focos de queimada ativos identificados no dia.

Figura 4.8 – À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do EarthCARE e destaque dos focos de queimadas em vermelho

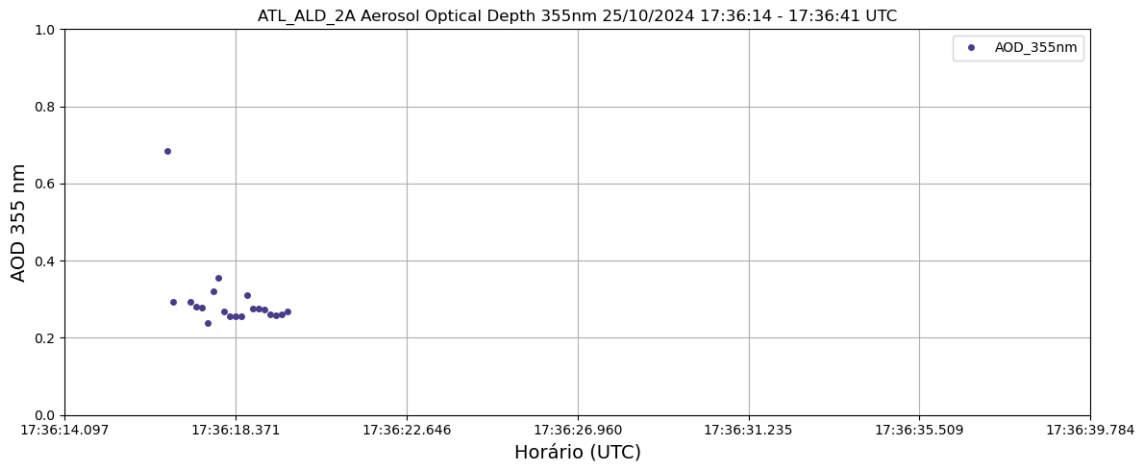


Fonte: NASA WorldView, disponível em: <[worldview.earthdata.nasa.gov](https://worldview.earthdata.nasa.gov)>

Apesar da proximidade com o foco de queimada, as imagens de refletância corrigida do VIIRS não indicaram presença visível de fumos ou plumas de aerossóis, sendo a cobertura de nuvens o único fenômeno atmosférico claramente identificado. Esse cenário marca uma transição importante no comportamento atmosférico da região, contrastando com os dias anteriores analisados, os quais apresentavam alta carga de aerossóis oriundos de queimadas. Portanto, este estudo de caso oferece a oportunidade de avaliar o desempenho das medições de AOD do EarthCARE em um cenário com baixa influência direta de queimadas, mas sob possível interferência de cobertura de nuvens.

As medidas de AOD do satélite EarthCARE, registradas dentro do raio de 100 km ao redor da estação da AERONET Cuiabá-Miranda, estão representadas na Figura 4.9, considerando-se apenas os pontos com incerteza inferior a 20%. Nesse terceiro estudo de caso, observa-se uma baixa variabilidade nos valores de AOD, com as medições se mantendo próximas de 0.3 ao longo da trajetória. Ressalta-se que o algoritmo de detecção de nuvens do instrumento ATLID descarta automaticamente as medições em que há identificação de cobertura nebulosa. Esse critério de filtragem explica a ausência de dados em uma grande parte do trajeto sobre a região, uma vez que as imagens do satélite VIIRS evidenciaram a presença significativa de nuvens nesse dia.

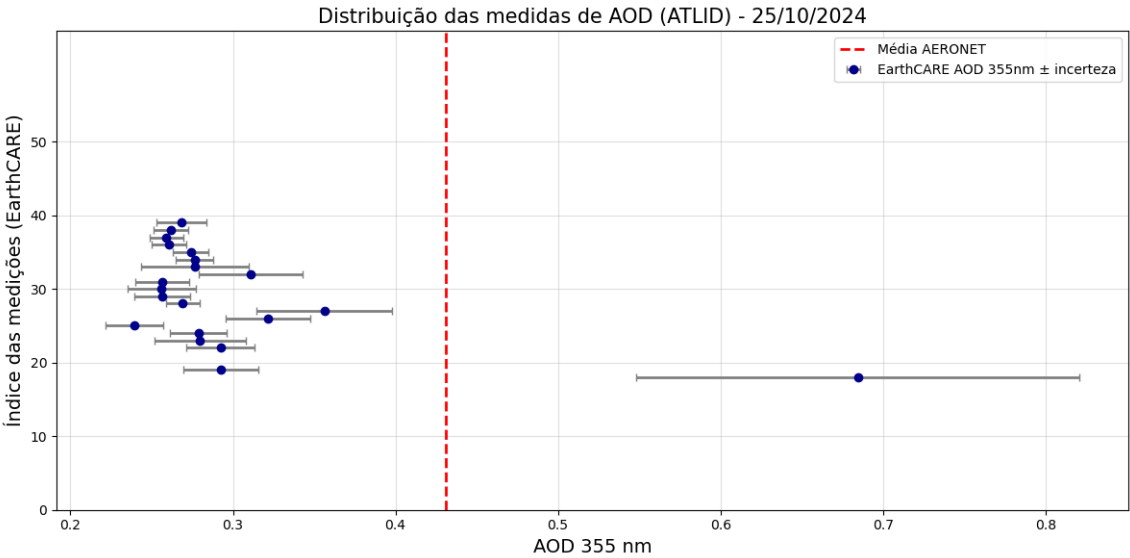
Figura 4.9 – Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 25/10/2024, dentro do raio de alcance definido (100 km)



A Tabela 4.3 apresenta um resumo estatístico das medidas de AOD obtidas no período desse caso pelo EarthCARE e pelo fotômetro da AERONET. Apesar da diferença no número de amostras, com 20 medições válidas pelo ATLID e apenas 4 pela AERONET, é possível observar que os valores registrados pelo satélite ficaram sistematicamente abaixo dos da estação de referência (Figura 4.10), apresentando uma média simples de 0.3, contra 0.43 da AERONET, o que representa uma diferença absoluta de 0.13 e um erro percentual de aproximadamente 30.8%.

A variabilidade nas medições do EarthCARE é consideravelmente maior, como evidenciado pelo desvio padrão de 0.094. Esse comportamento pode estar relacionado

Figura 4.10 – Variabilidade das medidas de AOD do EarthCARE em relação a média obtida com a AERONET, para a passagem do dia 25/10/2024



à presença de nuvens ao longo da trajetória do satélite, como revelado pelas imagens do VIIRS. Como o algoritmo de detecção de nuvens do ATLID filtra automaticamente as regiões com cobertura nebulosa, a amostragem resultante é fragmentada, o que pode contribuir para a variabilidade observada.

Tabela 4.3 – Resumo estatístico das medidas de AOD 355 nm do EarthCARE e da AERONET em 25/10/2024.

| Parâmetro           | EarthCARE | AERONET |
|---------------------|-----------|---------|
| Nº de medições      | 20        | 4       |
| Média simples       | 0.30      | 0.43    |
| Mediana             | 0.27      | 0.43    |
| Desvio padrão       | 0.094     | 0.010   |
| Diferença absoluta  | 0.13      | —       |
| Erro percentual (%) | 30.8%     | —       |

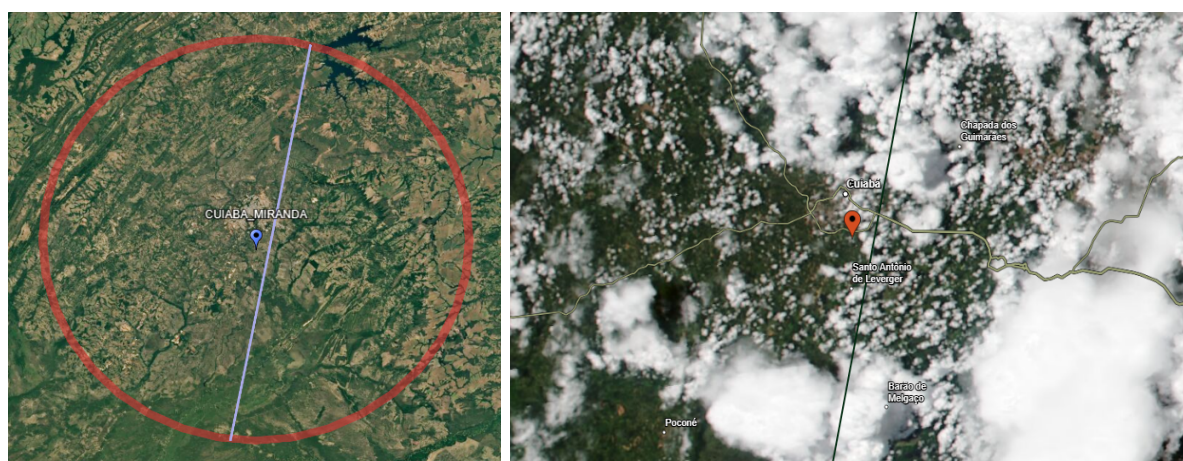
Ainda que os valores do EarthCARE estejam abaixo do estimado pela AERONET, a ordem de magnitude das medições é semelhante, e a diferença percentual pode estar relacionada a incertezas instrumentais, geolocalização relativa e à própria diferença de amostragem vertical entre os sistemas. É importante destacar que, embora a cobertura de fumaça nesse dia tenha sido mínima (diferentemente dos casos anteriores), a presença de nuvens impôs um desafio adicional na obtenção de medições contínuas, tanto para o satélite quanto para a estação em superfície.

#### 4.6. ESTUDO DE CASO 4: 27/02/2025

No dia 27 de fevereiro de 2025, o EarthCARE realizou uma passagem quase integral pelo raio de 100 km centrado no fotômetro da AERONET em Cuiabá, alcançando uma distância mínima de 6,9 km do instrumento. As imagens do VIIRS não indicaram a presença de focos de queimadas ativos dentro da área de estudo, o que sugere uma atmosfera menos influenciada por emissões de aerossóis provenientes de queima de biomassa, diferentemente dos estudos de caso anteriores.

As condições atmosféricas observadas foram similares às do caso anterior, com presença de cobertura de nuvens visível nas imagens em alta resolução (Figura 4.11). A trajetória do satélite cruzou a área de interesse pelo setor leste da estação AERONET, oferecendo mais uma oportunidade relevante para comparar as medidas de AOD do ATLID com os dados de referência adquiridos a partir do solo.

Figura 4.11 – À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do EarthCARE



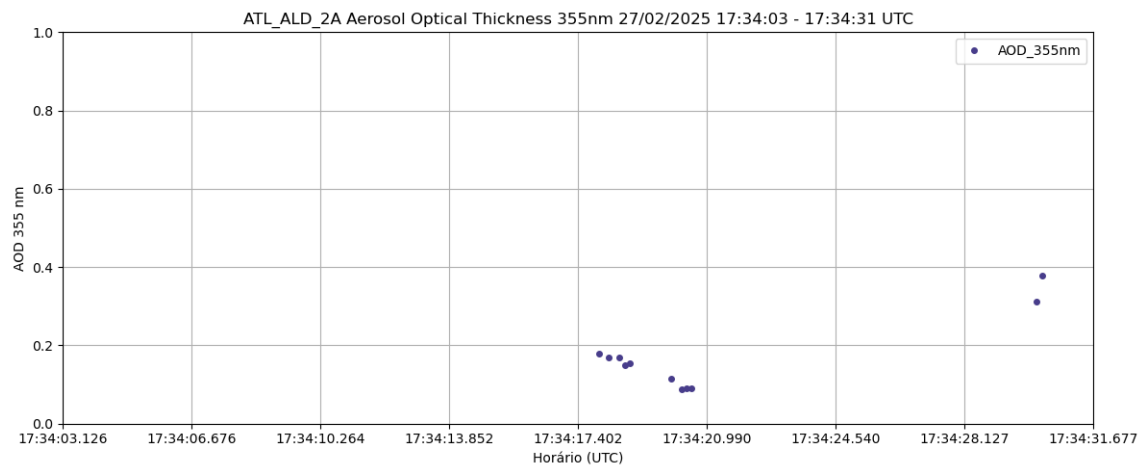
Fonte: NASA WorldView, disponível em: <[worldview.earthdata.nasa.gov](https://worldview.earthdata.nasa.gov)>

As medidas de AOD do EarthCARE referentes a essa passagem foram as mais baixas entre todos os estudos de caso analisados, com a maioria dos valores situando-se abaixo de 0.2 (Figura 4.12). Foi mantido o critério de filtragem por incerteza inferior a 20%, já que havia uma quantidade razoável de pontos disponíveis para análise. Um aspecto particularmente relevante nesta passagem é que ela inclui medições realizadas no momento de maior proximidade entre o satélite e o fotômetro da AERONET, ocorridas entre os horários de 17:34:17 e 17:34:20.

Os resultados para o dia 27 de fevereiro de 2025 apresentados na Tabela 4.4, bem como na Figura 4.13, indicaram a melhor concordância entre as medições do EarthCARE e da AERONET entre todos os estudos de caso. Após as aproximações de casas decimais, as médias dos dois conjuntos coincidiram, resultando no valor de 0.17 e um erro

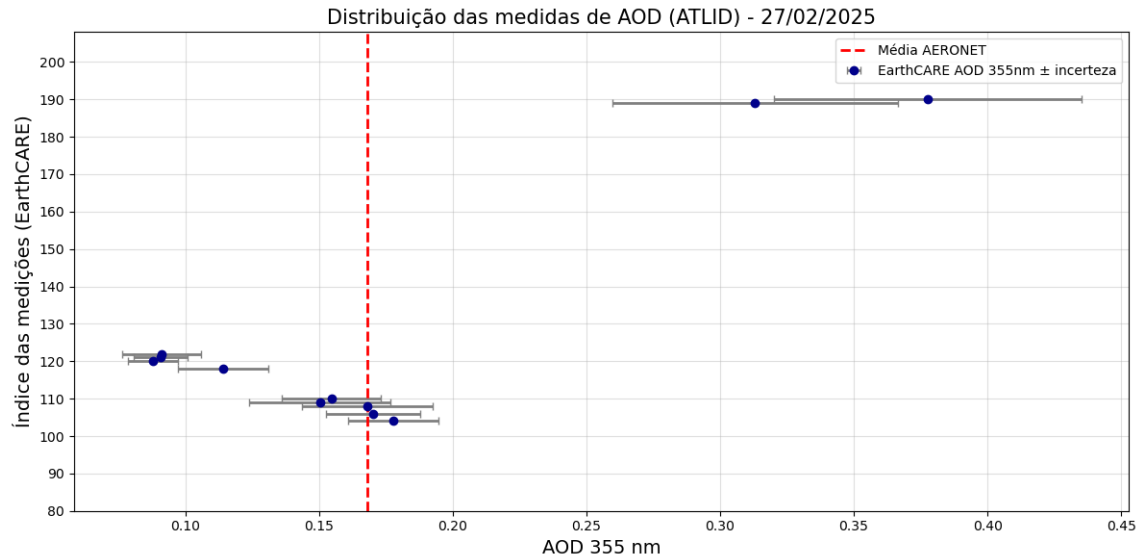


Figura 4.12 – Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 27/02/2025, dentro do raio de alcance definido (100 km)



percentual de 2.76%, sendo inegavelmente o menor dentre todos os dias analisados. O EarthCARE apresentou um desvio padrão de 0.093, possivelmente refletindo pequenas variações espaciais ao longo da trajetória.

Figura 4.13 – Variabilidade das medidas de AOD do EarthCARE em relação a média obtida com a AERONET, para a passagem do dia 27/02/2025



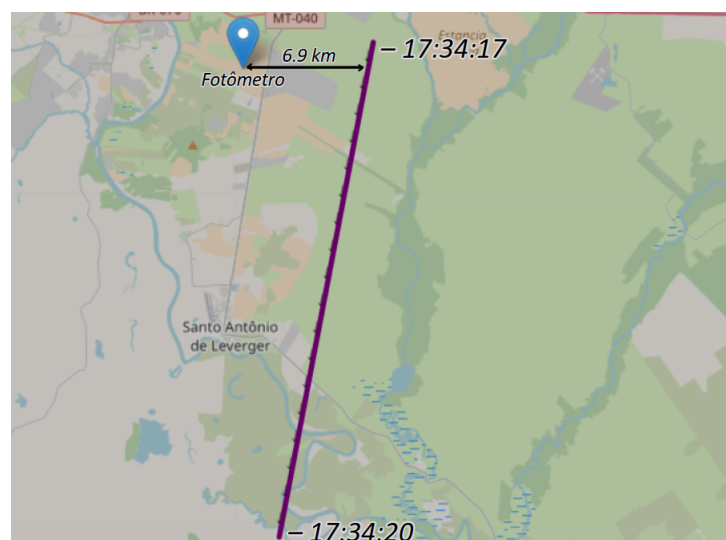
Através da variabilidade, pode-se observar que nesse caso algumas medidas de AOD do ATLID coincidiram com a média do conjunto da AERONET, com a maioria dos pontos se concentrando abaixo da média. Dois pontos distinguiram-se de forma expressiva acima dos demais, apresentando valores e incertezas de graus mais elevados.

Tabela 4.4 – Resumo estatístico das medidas de AOD 355 nm do EarthCARE e da AERONET em 27/02/2025.

| Parâmetro           | EarthCARE | AERONET |
|---------------------|-----------|---------|
| Nº de medições      | 11        | 6       |
| Média simples       | 0.17      | 0.17    |
| Mediana             | 0.15      | 0.16    |
| Desvio padrão       | 0.093     | 0.016   |
| Diferença absoluta  | 0.00      | —       |
| Erro percentual (%) | 2.76%     | —       |

A Figura 4.14 ilustra a trajetória do satélite EarthCARE sobre a região de estudo no dia 27 de fevereiro de 2025, destacando em especial o intervalo de tempo entre 17:34:17 e 17:34:20 (UTC), momento em que o satélite esteve mais próximo do fotômetro da AERONET localizado na Fazenda Miranda. A maioria das medições válidas do EarthCARE utilizadas neste estudo de caso foram obtidas justamente nesse curto intervalo, reforçando a representatividade espacial dos dados em relação à estação de referência. A proximidade entre o satélite e o fotômetro, combinada com as boas condições atmosféricas, contribuiu significativamente para a elevada concordância observada entre os dois conjuntos de dados. Esse alinhamento espacial e temporal torna esse momento particularmente relevante para análises e estudos de validação de produtos do EarthCARE.

Figura 4.14 – Plotagem da passagem do EarthCARE em 27/02/2025, através de um mapa em Python e destacando o intervalo de tempo entre 17:34:17 e 17:34:20 (UTC)



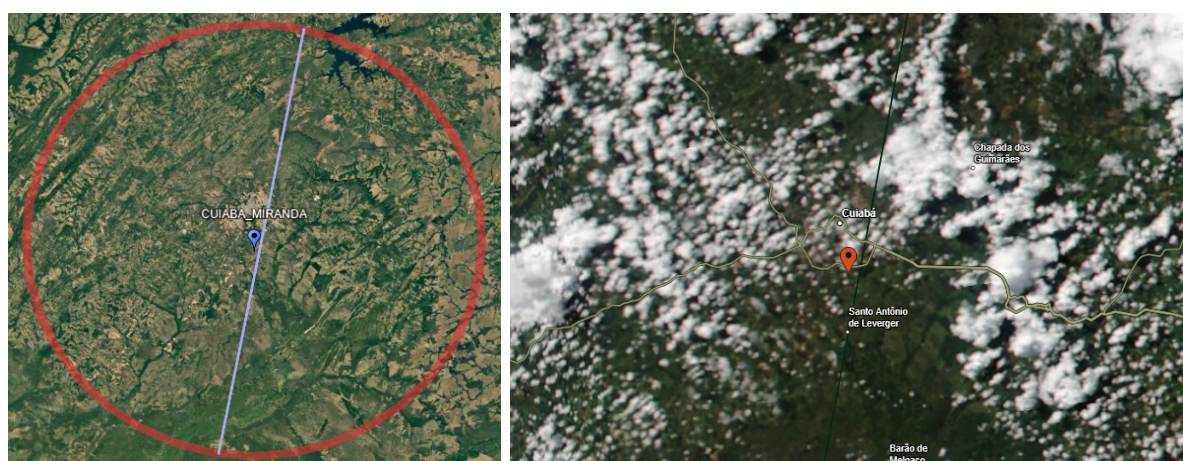
A coincidência temporal e espacial mais próxima registrada entre satélite e fotômetro, bem como a disponibilidade de medições neste trecho, provavelmente contribuíram para a excelente correspondência observada. Além disso, a ausência de focos de queimadas e a presença de nuvens observadas nas imagens do VIIRS sugerem um cenário atmosférico razoável, sem influência significativa de aerossóis advindos de queimadas ou

fontes antropogênicas intensas.

#### 4.7. ESTUDO DE CASO 5: 13/05/2025

Em 13 de maio de 2025, o EarthCARE realizou outra passagem significativa sobre a área de estudo, cruzando extensivamente o setor leste da estação AERONET em Cuiabá. Imagens de alta resolução do sensor VIIRS indicaram um cenário atmosférico semelhante ao observado nos estudos de caso 3 e 4, caracterizado pela ausência de pontos de calor de incêndios e pela presença parcial de cobertura de nuvens (Figura 4.15). Essa configuração sugere condições de observação intermediárias, com um impacto potencialmente moderado na detecção de aerossóis e nuvens pelo ATLID.

Figura 4.15 – À esquerda, visualização da trajetória do satélite no software Google Earth, na região de alcance definida. À direita, visualização de imagens do satélite NOAA-20, com a linha de passagem do EarthCARE



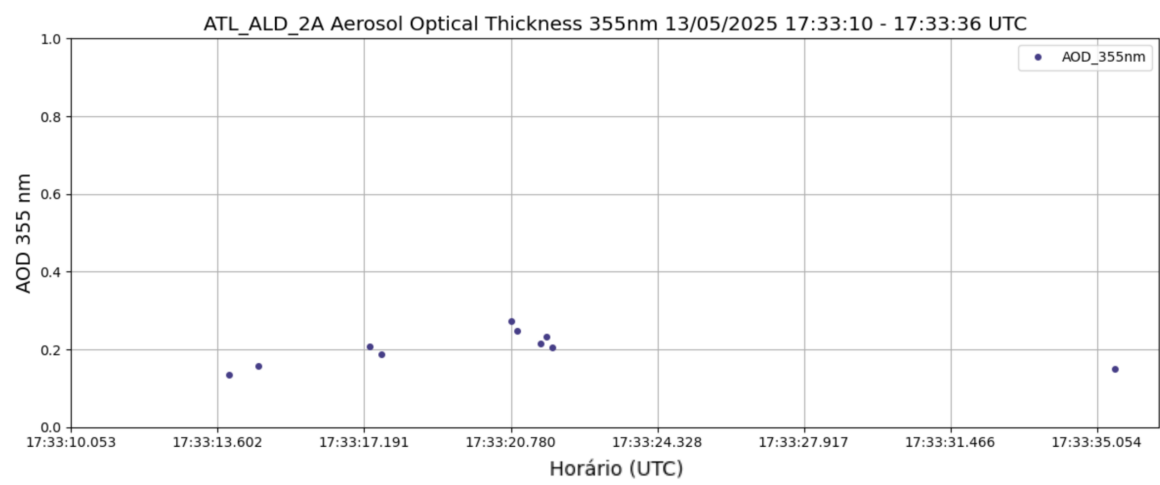
Fonte: NASA WorldView, disponível em: <[worldview.earthdata.nasa.gov](https://worldview.earthdata.nasa.gov)>

Considerando o mesmo limite de incerteza abaixo de 20%, as medições de AOD registradas pelo ATLID durante essa passagem mostraram valores moderados, com algumas observações concentradas acima de 0.20 e outras abaixo, conforme mostrado na Figura 4.16. Ao contrário do estudo de caso anterior, nenhuma medição ATLID foi registrada nos instantes em que o satélite estava mais próximo do fotômetro da AERONET. Esse comportamento pode estar associado à presença de cobertura de nuvens nesse segmento orbital, o que teria acionado o algoritmo de filtragem do ATLID, resultando na ausência de dados AOD para esse intervalo espacial.

A Tabela 4.5 resume os parâmetros estatísticos para este quinto estudo de caso, correspondente a 13 de maio de 2025. Nesta data, o sensor ATLID registrou 10 medições válidas com incerteza abaixo de 20%, enquanto o fotômetro da AERONET registrou 6 observações. A média do EarthCARE foi de 0.20, enquanto a do fotômetro foi de 0.14, resultando em uma diferença absoluta de 0.06 e um erro percentual de aproximadamente



Figura 4.16 – Medidas de AOD do EarthCARE durante a passagem pela região de estudo, no dia 27/02/2025, dentro do raio de alcance definido (100 km)



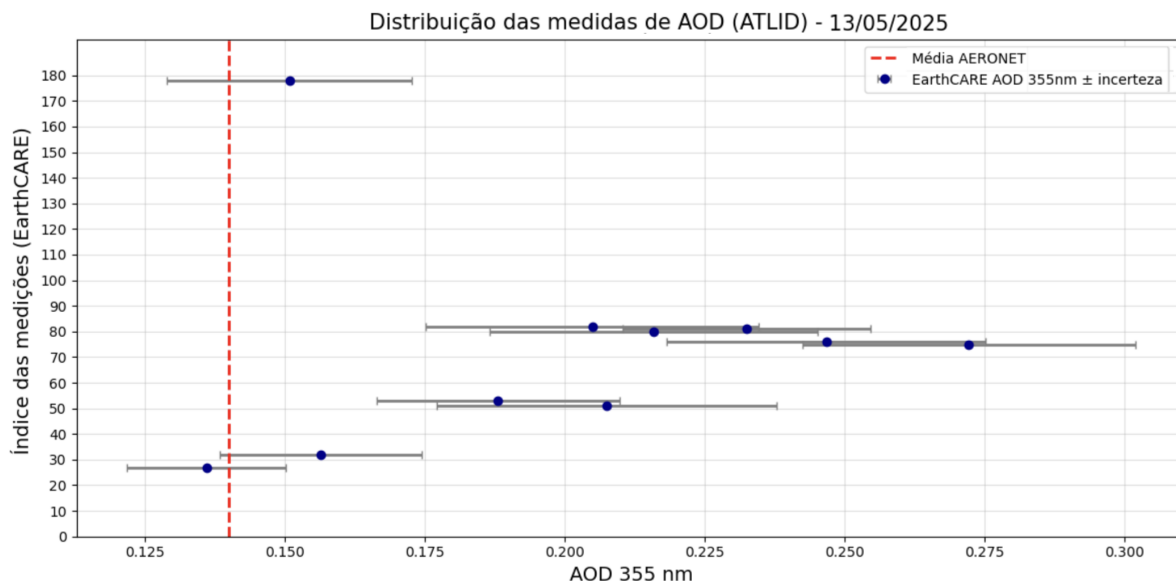
42.9%. Enquanto o desvio padrão das medições do ATLID (0.044) indica variabilidade moderada, os dados do AERONET exibiram uma distribuição mais concentrada, com um desvio padrão de apenas 0.006.

Tabela 4.5 – Resumo estatístico das medidas de AOD 355 nm do EarthCARE e da AERONET em 13/05/2025.

| Parâmetro           | EarthCARE | AERONET |
|---------------------|-----------|---------|
| Nº de medições      | 10        | 6       |
| Média simples       | 0.20      | 0.14    |
| Mediana             | 0.21      | 0.14    |
| Desvio padrão       | 0.044     | 0.006   |
| Diferença absoluta  | 0.06      | —       |
| Erro percentual (%) | 42.9%     | —       |

A Figura 4.17 ilustra a distribuição das medições do ATLID com suas respectivas barras de incerteza, em relação à média do AERONET representada pela linha tracejada vermelha. A maioria dos pontos de dados do EarthCARE está acima da média do AERONET, contribuindo para o viés positivo observado nesta data.

Figura 4.17 – Variabilidade das medidas de AOD do EarthCARE em relação a média obtida com a AERONET, para a passagem do dia 13/05/2025



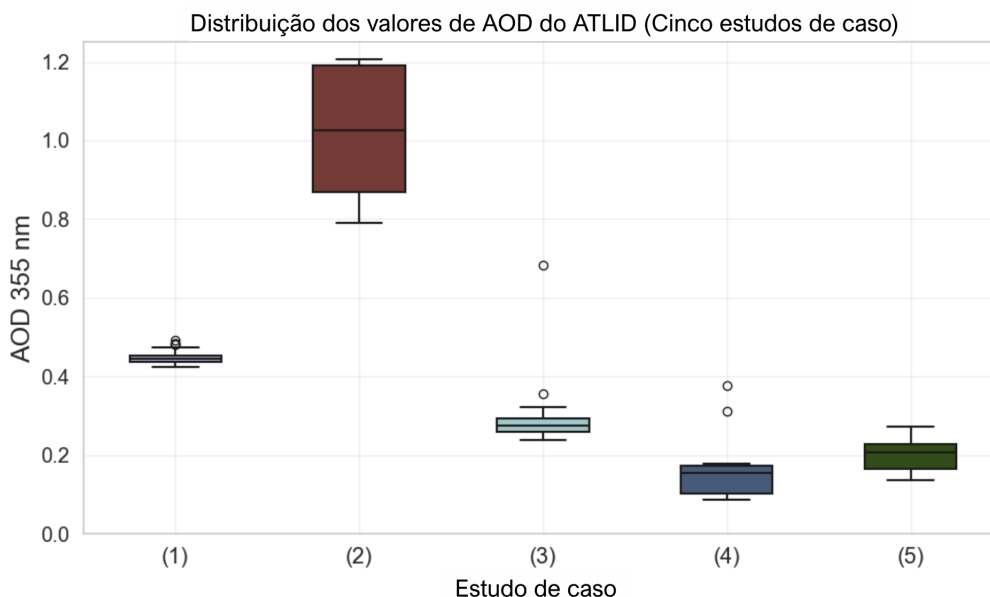
O resultado obtido difere substancialmente do estudo de caso anterior (27 de fevereiro de 2025), em que a concordância entre os sensores foi muito mais próxima. Conforme discutido anteriormente, essa discrepância observada pode estar relacionada a fatores atmosféricos locais, como a presença de nuvens, variações espaciais e temporais na distribuição de aerossóis ou mesmo diferenças nas geometrias de observação dos instrumentos. Notavelmente, este é o único resultado em que as medições do ATLID exibiram um viés positivo em relação ao fotômetro.

## 4.8. DISCUSSÃO GERAL

Nesta seção, buscou-se integrar os resultados obtidos nos cinco estudos de caso analisados, a fim de traçar uma visão geral sobre as medidas do instrumento ATLID em relação às medidas AOD obtidas pelo fotômetro da estação AERONET em Cuiabá-Miranda. Como visto, cada estudo de caso correspondeu a um dia distinto em que o satélite sobrevoou a região dentro de um raio de 100 km do instrumento de solo, e em que houve coincidência temporal das medições. A Figura 4.18 apresenta um gráfico comparativo do tipo boxplot, mostrando a distribuição dos valores de AOD do ATLID abordados em cada estudo de caso, permitindo uma visualização direta das tendências, dispersões e discrepâncias observadas ao longo dos diferentes cenários atmosféricos.

A análise da distribuição dos valores AOD do ATLID nos cinco estudos de caso revela características atmosféricas específicas para cada dia. O primeiro caso (27 de agosto de 2024) mostra uma distribuição estreita concentrada em torno de 0.45, com baixa dispersão e poucos outliers, indicando uma atmosfera relativamente estável, apesar da presença de focos de queimada e fumaça na região. O segundo estudo (21 de setembro de 2024)

Figura 4.18 – Plotagem em boxplot da distribuição das medidas feitas pelo ATLID, apresentadas em cada estudo de caso, preservando as devidas filtragens de incerteza



se destaca pela maior concentração de aerossóis, evidenciada por uma mediana acima de 1.0 e alta variabilidade. A intensa presença de fumaça neste dia é consistente com a alta carga de AOD registrada e sugere uma distribuição espacial e vertical altamente heterogênea dos aerossóis. O terceiro caso (25 de outubro de 2024), sob condições atmosféricas mais limpas e com cobertura parcial de nuvens, apresenta valores moderados de AOD entre 0.2 e 0.3, com menos assimetria. Por outro lado, o quarto estudo (27 de fevereiro de 2025) demonstrou a melhor concordância entre os sensores, apresentando a mediana mais baixa ( $\approx 0.15$ ), baixa dispersão e ausência de fumaça. O quinto caso (13 de maio de 2025), também sem incêndios visíveis, mostra uma distribuição semelhante ao caso 4, mas com ligeira assimetria e valores ligeiramente mais altos, refletindo variações localizadas na concentração de aerossóis.

O conjunto dos cinco estudos de caso destaca a diversidade dos cenários atmosféricos encontrados durante as passagens do EarthCARE sobre Cuiabá. Os gráficos em boxplot ilustram efetivamente a influência das condições atmosféricas na variabilidade das medições de AOD feitas pelo ATLID. Estudos com maior presença de fumaça, como o segundo caso, resultaram em valores e dispersões mais altos, juntamente com possíveis limitações do sensor no tratamento de altas concentrações de aerossóis. Em contrapartida, dias com menor carga de aerossóis, como nos casos 4 e 5, apresentaram resultados mais consistentes, com desvios padrão mais baixos e melhor concordância com a AERONET. Essa diferença ressalta a importância de considerar o contexto atmosférico nas validações de sensores remotos, além de demonstrar o potencial do EarthCARE para operar em várias condições.

A Tabela 4.6 apresenta outros cálculos estatísticos usando os valores médios de

AOD para cada estudo de caso, a partir dos dados da AERONET e do EarthCARE. Apesar da alta correlação linear entre os valores médios de AOD do EarthCARE e da AERONET ( $r = 0.997$ ), um erro médio negativo ( $ME = -0.24$ ) e valores relativamente altos para o erro médio absoluto ( $MAE = 0.26$ ) e o erro quadrático médio ( $RMSE = 0.44$ ) apontam para um viés sistemático. Isso indica que o ATLID geralmente subestima os valores de AOD em comparação com a AERONET. Esses resultados sugerem consistência na tendência geral dos dados, mas também uma discrepância considerável nos valores absolutos, particularmente em dias com cargas mais altas de aerossóis. O erro médio negativo confirma essa tendência de subestimação, enquanto o MAE e o RMSE fornecem estimativas da magnitude média dos erros, sendo o RMSE mais sensível a desvios extremos.

Tabela 4.6 – Estatísticas comparativas entre as médias de AOD 355 nm do EarthCARE e da AERONET para os cinco estudos de caso.

| Parâmetro                                     | Valor |
|-----------------------------------------------|-------|
| Coefficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) | 0.997 |
| Erro médio (ME)                               | -0.24 |
| Erro absoluto médio (MAE)                     | 0.26  |
| Raiz do erro quadrático médio (RMSE)          | 0.44  |

Essas discrepâncias podem decorrer de fatores como diferenças nas geometrias de observação, o deslocamento espacial na maioria das medições ou mesmo interferências causadas pela presença de nuvens ou nuvens de fumaça. Embora essas métricas sejam úteis para caracterizar o desempenho do ATLID nos cinco estudos de caso analisados, é fundamental reiterar que o tamanho da amostra é muito limitado, restringindo a generalização desses resultados. O valor de  $r$ , neste contexto, deve ser considerado um indicador exploratório. No entanto, essas descobertas oferecem discussões iniciais sobre o comportamento do sensor em diferentes cenários atmosféricos e servem como ponto de partida para validações futuras com conjuntos de dados mais extensos.

Em comparação com estudos de validação anteriores, há uma diferença substancial em termos de tamanho da amostra. Por exemplo, Schuster et al. (2012) avaliou o desempenho do satélite CALIPSO comparando dados de AOD 532 nm com medições de 147 estações AERONET, considerando um total de 677 passagens adequadas do satélite ao longo de um período de três anos. Os autores relataram um viés de subestimação sistemática do CALIPSO em relação ao AERONET, com um valor médio de  $-13\%$  e um viés absoluto de  $-0.029$ . Embora o presente estudo se baseie em um conjunto de dados muito menor, restrito a um número limitado de passagens do EarthCARE sobre Cuiabá, os resultados indicam uma tendência semelhante de subestimação, reforçando a consistência desse comportamento entre as observações de satélite baseadas em Lidar quando comparadas às medições terrestres.

O presente estudo também é limitado pelo ciclo de revisitação de 25 dias do satélite EarthCARE, o que reduz consideravelmente a densidade temporal das passagens disponíveis para validação. Essa restrição é ainda mais acentuada em regiões equatoriais, como a parte central da América do Sul, onde o número de passagens efetivas é significativamente menor devido à geometria da órbita polar. Esses fatores limitam a robustez estatística dos esforços de validação de curto prazo. No entanto, a capacidade do satélite de fornecer medições contínuas em áreas vastas e remotas — particularmente regiões como a bacia amazônica, onde a rede AERONET e outros instrumentos terrestres são escassos — destaca a importância estratégica dos dados do EarthCARE para o avanço do monitoramento de aerossóis e estudos climáticos em regiões com amostragem limitada.

Além disso, estudos como o de Gupta et al. (2022), que analisaram tendências de longo prazo na profundidade óptica de aerossóis a partir de medições multissatélite em escala global, ressaltam a importância de séries temporais extensas para a identificação de padrões consistentes e redução das incertezas associadas à variabilidade atmosférica. Dessa forma, recomenda-se a continuidade do monitoramento e a expansão das análises em escalas temporal e espacial maiores, a fim de assegurar uma avaliação mais confiável e representativa das capacidades dos sensores orbitais.

## 4.9. DIFICULDADES E LIMITAÇÕES

Diante das limitações impostas pela escassez de dias com dados coincidentes entre o satélite EarthCARE e o fotômetro da AERONET em Cuiabá-Miranda, os cinco estudos de caso analisados forneceram um panorama das possibilidades de comparação de dados entre esses dois sistemas de observação. A abordagem adotada neste trabalho concentrou-se em análises estatísticas cuidadosas e contextualizadas, respeitando os limites da amostragem e apoiando-se em evidências complementares, como imagens de satélite e observações meteorológicas.

Dificuldades com as ferramentas de previsão e reconstrução das passagens do ATLID por Cuiabá foram encontradas, isso acarretou na reconstrução das trajetórias por diversas vezes. As passagens previstas/reconstruídas utilizando o ESOV apresentaram defasagem temporal de alguns segundos em alguns casos, causando comparações equivocadas entre os dados, pois o satélite não estava passando por Cuiabá exatamente no intervalo calculado pelo software. Defasagens de poucos segundos implicam em o EarthCARE estar em um local completamente diferente de Cuiabá. A solução encontrada para corrigir essa defasagem nos intervalos de passagem foi utilizar a metodologia do ESOV como uma aproximação inicial. Em seguida, plotar a mesma passagem utilizando as coordenadas de latitude, longitude e tempo (contidos no produto baixado) em um mapa com *Python*, fazendo os ajustes no intervalo temporal para garantir que a passagem estava dentro do raio de alcance.

Além disso, o propósito original deste trabalho era fazer as comparações estatísticas utilizando um sistema Lidar instalado em solo, juntamente ao fotômetro, para assim trabalhar com o processamento de dados provenientes não só de fotômetros, mas também perfis Lidar, como dos coeficientes de extinção e de retroespalhamento dos aerossóis. Tal abordagem não foi possível devido ao atraso da instalação de um sistema Lidar de superfície, mas que pode ser executada futuramente.

Para os trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do número de passagens pela região de estudo definida, à medida que mais dados orbitais e de superfície se tornarem disponíveis. A inclusão de uma série temporal mais extensa permitirá análises estatísticas mais robustas, reduzindo a incerteza associada aos indicadores como correlação, erro médio e RMSE, e viabilizando inclusive o uso de testes de hipótese com maior significância estatística.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar a acurácia e consistência dos dados de profundidade óptica dos aerossóis (AOD) obtidos pelo sensor ATLID, a bordo do satélite EarthCARE, por meio da comparação com medições da superfície realizadas pelo fotômetro solar da rede AERONET, localizado na estação Cuiabá-Miranda. A metodologia adotada se baseou em uma abordagem de estudos de caso, selecionando cinco datas em que houve simultaneidade de dados entre os dois sistemas, dentro de um raio de 100 km centrado na estação da AERONET.

Foram realizadas análises estatísticas descritivas para cada estudo de caso, incluindo o cálculo da média, mediana, desvio padrão, erro médio (ME), erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). Adicionalmente, foi feita uma análise exploratória da correlação linear entre as médias de AOD do EarthCARE e da AERONET. Embora o coeficiente de correlação de Pearson tenha indicado alta correlação ( $r = 0.997$ ), os resultados também apontaram a presença de viés sistemático nas medições do satélite, com tendência à subestimação em relação aos dados da AERONET, especialmente nos dias com maior carga de aerossóis. Conforme discutido anteriormente, as limitações espaciais e temporais inerentes aos sistemas Lidar embarcados em satélites impõem desafios à validação com fotômetros de solo. Por isso, é importante destacar que não se deve esperar, especialmente nos primeiros anos após o lançamento de um satélite com Lidar, a obtenção de comparações estatisticamente robustas com dados de estações AERONET (AMIRIDIS et al., 2025).

As imagens do sensor VIIRS, utilizadas para caracterizar o cenário atmosférico de cada dia, auxiliaram na compreensão dos resultados ao evidenciarem a presença de queimadas, fumaça e cobertura de nuvens. Esses elementos mostraram-se essenciais para interpretar as flutuações nos dados de AOD e a disponibilidade ou ausência de medições pelo ATLID, que possui algoritmos de filtragem no sinal sob condições de cobertura densa de nuvens. Apesar das limitações de amostragem e da natureza exploratória deste trabalho, os resultados obtidos oferecem uma contribuição inicial para o processo de validação do EarthCARE no contexto tropical brasileiro. As análises mostraram que, mesmo com desafios operacionais e atmosféricos, o ATLID é capaz de fornecer medições coerentes em diversos cenários, sendo promissor para aplicações futuras.

Os resultados obtidos, embora restritos em número, demonstram o potencial de uso combinado dos sensores em estudos de aerossóis, destacando também os desafios

metodológicos envolvidos em esforços no sentido de validação. Espera-se que este trabalho contribua para a consolidação de metodologias de validação e incentive a continuidade do monitoramento coordenado entre plataformas satelitais e instrumentos de superfície. Espera-se que, com a continuidade das medições e a incorporação de novos dados ao longo da missão, seja possível aprofundar essas análises, aprimorar os métodos de validação e ampliar a compreensão da performance do EarthCARE em regiões de interesse climático e ambiental, como o Centro-Oeste brasileiro.



## REFERÊNCIAS

- AMIRIDIS, V. et al. *Best Practice Protocol for the validation of Aerosol, Cloud, and Precipitation Profiles (ACPPV)*. Zenodo, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.15025627>>.
- BUCHOLTZ, A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Appl. Opt.*, Optica Publishing Group, v. 34, n. 15, p. 2765–2773, May 1995. Disponível em: <<https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-34-15-2765>>.
- BYJU. “*Electromagnetic Spectrum*”. 2025. Disponível em <[byjus.com/jee/electromagnetic-spectrum-and-electromagnetic-waves/](https://byjus.com/jee/electromagnetic-spectrum-and-electromagnetic-waves/)>.
- CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. *Introduction to remote sensing*. [S.l.]: Guilford press, 2011.
- EPA. “*Particulate Matter (PM) Basics*”. 2024. Disponível em <[www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics](https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics)>.
- ESA. “*Aeolus / formerly ADM (Atmospheric Dynamics Mission)*”. 2024. Disponível em <<https://directory.eoportal.org/satellite-missions/aeolus#eop-quick-facts-section>>.
- ESA. “*ATLID Overview*”. 2024. Disponível em <[earth.esa.int/eogateway/instruments/atlid/](https://earth.esa.int/eogateway/instruments/atlid/)>.
- ESA. “*EarthCARE Instrument Calibration*”. 2024. Disponível em <<https://earth.esa.int/eogateway/missions/earthcare/data/calibration-validation>>.
- ESA. “*EarthCARE Instruments Location*”. 2024. Disponível em <[www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2024/01/](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2024/01/)>.
- FINLAYSON-PITTS, B. J.; JR, J. N. P. *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications*. [S.l.]: Elsevier, 1999. 15 p.
- GUPTA, G. et al. Long-term trends in aerosol optical depth obtained across the globe using multi-satellite measurements. *Atmospheric Environment*, v. 273, p. 118953, 2022. ISSN 1352-2310. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231022000188>>.
- HECHT, E. *Optics, 5th ed., Global edition*. [S.l.]: Pearson, 2017.
- HOLBEN, B. N. et al. Aeronet—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment*, Elsevier, v. 66, n. 1, p. 1–16, 1998.

ILLINGWORTH, A. J. et al. The earthcare satellite: The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 96, n. 8, p. 1311–1332, 2015.

IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press Cambridge, UK, v. 2, n. 1, p. 2391, 2021.

JMA. “Observation of Aerosol Optical Depth”. 2005. Disponível em <[www.jma-net.go.jp/kousou/obs\\_third\\_div/rad/rad\\_aero-e.html](http://www.jma-net.go.jp/kousou/obs_third_div/rad/rad_aero-e.html)>.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D.; BOUCHER, O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 419, n. 6903, p. 215–223, 2002.

KOVALEV, V. A.; EICHINGER, W. E. *"ELASTIC LIDAR: Theory, Practice and Analysis Methods"*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2004.

LIU, K. N. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. [S.l.]: International Geophysics Series, 2002.

LOEB, N. G. et al. Toward optimal closure of the earth’s top-of-atmosphere radiation budget. *Journal of Climate*, American Meteorological Society, v. 22, n. 3, p. 748–766, 2009.

LOPES, F. *Validação dos dados do Satélite CALIPSO utilizando um sistema Lidar de retroespalhamento elástico e o fotômetro solar da rede AERONET*. Tese (Doutorado) — Tese de doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011.

MEASURES, R. M. *Laser remote sensing: Fundamentals and applications*(book). *New York, Wiley-Interscience, 1984, 521 p*, 1984.

MOREIRA, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. [S.l.]: Editora UFV, 2007.

MUKAKA, M. M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi medical journal*, v. 24, n. 3, p. 69–71, 2012.

NASA. “Aerosols in the Atmosphere”. 1997. Disponível em <[icp.giss.nasa.gov](http://icp.giss.nasa.gov)>.

NASA. “The Afternoon Constellation (A-train)”. 2005. Disponível em <[https://atrain.nasa.gov/historical\\_graphics.php](https://atrain.nasa.gov/historical_graphics.php)>.

NASA. “Keeping an eye on Earth’s energy budget”. 2017. Disponível em <[science.nasa.gov/science-research/earth-science](http://science.nasa.gov/science-research/earth-science)>.

NASA. “ARSET - Fundamentals of remote sensing”. 2023. Disponível em <[appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset](http://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset)>.

NASCIMENTO, D. T. F.; NOVAIS, G. T. Clima do cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. *Élisée - Revista de Geografia da UEG*, n. 2, p. e922021, 2020.

NOAA. “Lecture 3. Optical properties”. 2008. Disponível em <[www.gfdl.noaa.gov](http://www.gfdl.noaa.gov)>.

OLMEDA, C. T. *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación "El Arenosillo" de la red AERONET*. Tese (Doutorado) — Universidad de Valladolid, 2005.

PALÁCIOS, R. d. S. et al. Variabilidade espaço-temporal da profundidade Ótica de aerossóis em regiões de cerrado e pantanal na região central do Brasil. *Nativa*, n. 1, p. 56–65, 2020.

PALÁCIOS, R. S. *INTERAÇÃO ENTRE A RADIAÇÃO SOLAR DIRETA E OS AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NA AMAZÔNIA*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Mato Grosso, 2017.

PAPPALARDO, G. et al. Earlinet correlative measurements for calipso: First intercomparison results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 115, n. D4, 2010. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009JD012147>>.

PEREIRA, A. G. da C. et al. Aplicação dos produtos modis coleção 6 na análise da profundidade ótica do aerossol sobre regiões de floresta e cerrado na Amazonia legal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 02, p. 886–912, 2022.

PETERS, S. R. *Estudo da aplicação de técnicas de inversão e de redes neurais artificiais no monitoramento de aerossóis por LIDAR*. Tese (Doutorado) — Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

PRUPPACHER, H. R.; KLETT, J. D. Microphysics of clouds and precipitation. *D. Reidel Publishing Company*, v. 1, p. 78–9686, 1978.

ROSENFELD, D. et al. Global observations of aerosol-cloud-precipitation-climate interactions. *Reviews of Geophysics*, v. 52, n. 4, p. 750–808, 2014.

SCHUSTER, G. L. et al. Comparison of calipso aerosol optical depth retrievals to aeronet measurements, and a climatology for the lidar ratio of dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 12, n. 16, p. 7431–7452, 2012. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/12/7431/2012/>>.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1998.

SENA, E. T. *Variabilidade espacial e temporal da forçante radiativa direta de aerossóis de queimadas e os efeitos da mudança de uso do solo na Amazônia*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.

SILVA, J. J. *INTERAÇÃO AEROSSÓIS NUVENS: UM ESTUDO POR SENSORIAMENTO REMOTO*. Tese (Doutorado) — Tese de doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022.

SOGA. “State of Global Air 2019”. [S.l.]: Health Effects Institute, 2019.

STOFFELEN, A. et al. The atmospheric dynamics mission for global wind field measurement. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 86, n. 1, p. 73–87, 2005.

- STRAUME-LINDNER, A. G. et al. Esa's wind mission aeolus-overview, status and outlook. In: IEEE. *2021 IEEE international geoscience and remote sensing symposium IGARSS*. [S.l.], 2021. p. 755–758.
- TOLEDANO, C. et al. Aerosol optical depth and ångström exponent climatology at el arenosillo aeronet site (huelva, spain). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, Wiley Online Library, v. 133, n. 624, p. 795–807, 2007.
- TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. Earth's global energy budget. *Bulletin of the american meteorological society*, American Meteorological Society, v. 90, n. 3, p. 311–324, 2009.
- UFPR. “Coeficiente de Pearson”. 2005. Disponível em <<http://leg.ufpr.br/~silvia/CE701/node79.html>>.
- WANDINGER, U. et al. Cloud top heights and aerosol layer properties from earthcare lidar observations: the a-cth and a-ald products. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 16, p. 4031–4052, 2023.
- WEHR, T. et al. The earthcare mission - science and system overview. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 16, p. 3581–3608, 2023.
- WEITKAMP, C. *LIDAR: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. [S.l.]: Springer Science, 2005.
- WINKER, D. M.; COUCH, R. H.; MCCORMICK, M. P. An overview of lite: Nasa's lidar in-space technology experiment. *Proceedings of the IEEE*, v. 84, n. 2, p. 164–180, 1996.
- WINKER, D. M.; HUNT, W. H.; MCGILL, M. J. Initial performance assessment of caliop. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 34, n. 19, 2007.
- WINKER, D. M. et al. Overview of the calipso mission and caliop data processing algorithms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 26, n. 11, p. 2310–2323, 2009.
- YOUNG, A. T. *Rayleigh scattering*. [S.l.]: Physics Today, 1982.