



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**OBSERVAÇÕES DAS PLUMAS DE AEROSSÓIS DEIXADAS PELA
ERUPÇÃO DO VULCÃO HUNGA TONGA-HUNGA HA'APAI EM
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**

Pedro Luís Rocha Maia

Relatório de Iniciação Científica
do programa PIBIC, orientada pela
Dra. Maria Paulete Pereira
Martins.

INPE
São José dos Campos
2023

RESUMO

O objetivo deste trabalho é observar a presença de aerossóis na estratosfera utilizando o LIDAR de Sódio e Potássio do Laboratório Conjunto de Cooperação China-Brasil para estudos do Clima Espacial (CBJLSW-NaK), situado no INPE. O Grupo de Física da Alta Atmosfera (FISAT) do INPE tem conduzido pesquisas sobre aerossóis estratosféricos utilizando LiDAR desde 1972, mas desde 2012 que as medidas de aerossóis estavam suspensas. No dia 14 de janeiro de 2022 ocorreu uma erupção vulcânica na ilha de Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, no sul do Pacífico. Devido à submersão do vulcão, por razões físico-químicas, quando o magma liberado entrou em contato com a água, transformou-se rapidamente em gás e se expandiu pela atmosfera de forma acelerada. No dia 17 de janeiro de 2022, o LiDAR CBJLSW-NaK estava operando na cidade de São José dos Campos e foram observados sinais correspondentes ao espalhamento por aerossóis entre 20 e 40 km de altitude, na região da estratosfera. Desde então os aerossóis do vulcão Tonga estão sendo analisados. Com os dados de Na e K observados pelo radar de laser, no período de 17 de fevereiro a 8 de agosto de 2022, foi realizada uma filtragem dos valores correspondentes à faixa de altitude de 20 a 40 km. Em seguida foi desenvolvido, durante o primeiro semestre de 2023, um programa em Python no ambiente do Google Collaboratory (Colab), um serviço de nuvem gratuito, para análise de dados. Tal programa foi criado com o objetivo de fazer a leitura dos dados de Na e K, além de facilitar a criação rápida e dinâmica de gráficos. Utilizando as bibliotecas e recursos disponíveis no ambiente Colab, foi possível implementar as funcionalidades necessárias para manipular os dados e gerar visualizações gráficas de forma eficiente. Essa abordagem permitiu uma análise mais ágil e simplificada dos dados coletados, facilitando a interpretação dos resultados e possibilitando uma compreensão mais aprofundada dos fenômenos observados.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	4
1.1. Objetivo Geral.....	5
1.2. Objetivos Específicos.....	5
2. DESENVOLVIMENTO.....	6
2.1. Dados e Referências.....	6
2.2. Metodologia.....	6
2.3. Resultados e Conclusões.....	8
3. CONCLUSÃO.....	13
4. REFERÊNCIAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

A emissão de gases e aerossóis na atmosfera provenientes de erupções vulcânicas é um tema amplamente abordado por diversos centros de pesquisa espaciais. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) não é exceção, sendo que o mesmo realiza a medição de aerossóis por meio do Radar de Laser há muitos anos.

O LiDAR (Light Detection and Ranging) é um sensor remoto ativo e é um método direto de aquisição de dados. Esse sistema utiliza uma fonte própria de energia, um laser que emite feixes de luz para a atmosfera, em comprimentos de onda específicos, e um telescópio para coletar o feixe refletido pela atmosfera. No caso do LiDAR instalado no INPE, os feixes de luz são produzidos em dois comprimentos de ondas distintas, que são 589 nm e 770 nm, para medidas de sódio e potássio, respectivamente.

No dia 17 de janeiro de 2022, o LiDAR do INPE detectou um aumento do sinal de fóton-contagem recebido na região compreendida entre a estratosfera e a baixa mesosfera (de 20 a 40 km). Posteriormente, verificou-se que esse aumento do sinal estava associado à erupção do vulcão submerso Hunga Tonga-Hunga Ha'apai. Na figura 1.1 é mostrado os níveis da atmosfera para uma melhor compreensão.

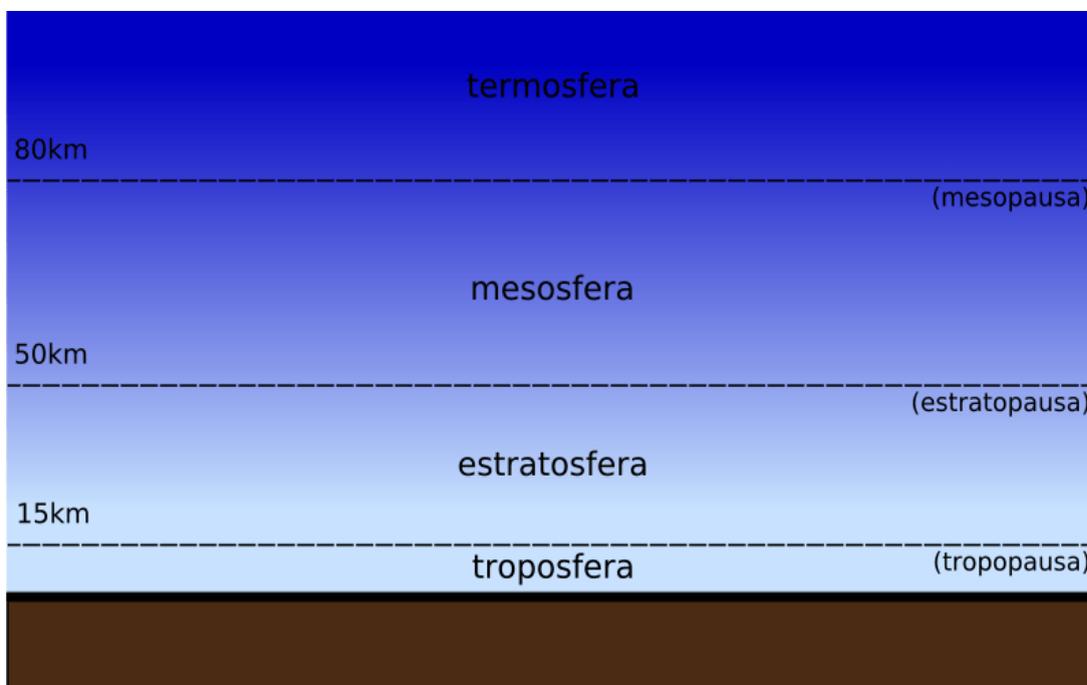


Figura 1.1: Camadas da atmosfera em função da altura.

Devido à configuração do LiDAR ser para medir os metais na mesosfera, foi preciso fazer uma adaptação para que fosse possível observar os aerossóis na estratosfera. Na saída do feixe do laser foi colocada uma íris que, no início da noite, era parcialmente fechada para que pudesse diminuir a intensidade do feixe. Assim ele chegaria com menos intensidade na média atmosfera e conseguiria observar espalhamento da luz pelos aerossóis, o que anteriormente não era possível com a íris totalmente aberta.

Os registros coletados em relação às plumas de aerossóis deixadas pela erupção vulcânica permitiram a análise e interpretação dos dados recebidos, possibilitando a continuidade da série histórica de medições de aerossóis estratosféricos na cidade de São José dos Campos.

Para garantir a precisão dos dados, foi necessário realizar uma filtragem da base de dados coletada. Isso possibilitou uma melhor visualização das camadas de aerossóis, além de identificar as altitudes específicas na atmosfera onde os aerossóis estavam.

1.1. Objetivo Geral

Desenvolvimento das funcionalidades do sistema para processamento dos dados do LiDAR durante o período de observação dos aerossóis do vulcão Hunga Tonga, bem como a análise dos dados resultantes.

1.2. Objetivos Específicos

- Compreensão do princípio de funcionamento do LiDAR
- Compreensão das estruturas da atmosfera e a presença de aerossóis na estratosfera
- Desenvolvimento de um programa para análise dos dados dos aerossóis do Vulcão Hunga Tonga
- Elaboração da documentação do projeto
- Criação de relatórios de acompanhamento

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Dados e Referências

Os dados e referências utilizados neste relatório baseiam-se em uma extensa pesquisa realizada no INPE, que incluiu a leitura de diversos artigos relacionados à geofísica espacial e ao estudo de erupções vulcânicas ocorridas no final do século 20. Esses artigos foram essenciais para o entendimento do funcionamento de um LiDAR e proporcionaram uma contextualização dos principais motivos que impulsionam os estudos sobre aerossóis na atmosfera.

A leitura dos artigos do INPE permitiu um aprofundamento significativo no conhecimento sobre as propriedades e características dos aerossóis atmosféricos, bem como a interação entre essas partículas e a radiação laser utilizada no Lidar. Essa compreensão ampla foi fundamental para uma análise consistente dos dados coletados durante o estudo dos aerossóis provenientes do vulcão Hunga Tonga.

2.2. Metodologia

A metodologia utilizada neste estudo envolveu o uso do radar de laser (LiDAR) disponibilizado pelo INPE, bem como a análise dos dados obtidos.

Inicialmente, a análise dos dados foi realizada utilizando programação no software Excel, onde foram aplicados filtros para selecionar os dados relevantes relacionados aos aerossóis. Uma tabela foi criada com a relação entre a altura e o horário durante a noite em que o laser estava ativo. Além disso, foi calculada a média dos ruídos existentes entre 120 e 140 km.

No âmbito do processamento de dados do radar de laser, a melhor opção foi utilizar a linguagem Python devido à sua ampla utilização na área de processamento de dados e análise científica. Em relação ao software, foi usado o Google Colab, reconhecido por sua utilização em aplicações científicas e técnicas e pela sua facilidade de uso. Ambas as ferramentas oferecem recursos avançados para o processamento e análise dos dados LiDAR, permitindo a extração de informações relevantes sobre os aerossóis do vulcão Hunga Tonga, com o objetivo de automatizar o processo anteriormente realizado manualmente no Excel.

Tal programa permitiu a execução das etapas de filtragem de dados, cálculo da média dos resíduos e geração de gráficos. Essa metodologia permitiu a visualização e interpretação dos resultados obtidos. Na figura 2.1. é mostrada a primeira parte do processo de filtragem dos dados feito no Excel.

DATA	INICIO	FINAL
24/03	23:24	00:24
29/03	22:40	23:17
21/4	22:18	22:59
09/05	22:01	22:40
10/05	02:22	03:03
17/05	22:00	23:00
18/05	23:21	23:51

Figura 2.1: Tabela com os horários de abertura e fechamento da íris.

Nessa parte é mostrada apenas uma parte da filtragem feita no Excel, no qual foi usado um relatório físico que é atualizado a cada vez que há abertura ou fechamento da íris do LiDAR. A partir do relatório foi feita uma planilha com a data e os horários de abertura (início) e do fechamento (final) da íris

Com a tabela feita, foi necessário importar dados de um arquivo .dat usando a biblioteca Pandas no ambiente Python. Os dados contêm informações sobre ruídos atmosféricos em diferentes altitudes, e o foco foi na faixa entre 120 km e 140 km de altitude. Utilizando as funções disponíveis na linguagem Python, foi feita a separação dos valores de altitude correspondentes à faixa de interesse. Em seguida, foi calculada a média dos ruídos para cada valor de altitude presente neste intervalo de altura. Esse cálculo fornece uma visão geral das tendências dos ruídos atmosféricos nessa região da atmosfera.

Posteriormente, os dados foram normalizados, o que implicou na subtração dos valores médios de ruídos das respectivas colunas e linhas da matriz original. Essa etapa foi fundamental para isolar variações significativas dos ruídos em relação à média estabelecida, permitindo uma análise mais precisa das informações. Com os ruídos já subtraídos de maneira correta foi possível o desenvolvimento de uma função de plotagem de gráficos adequada.

Na figura 2.4 encontra-se uma parte simples do código, no qual foi escrito uma estrutura que consegue filtrar e explicitar a matriz de maneira que fique apenas os dados dos aerossóis captados até 40km de altitude, mostrado logo em seguida na figura 2.5.

```
[ ] import pandas as pd

primeiras_40_linhas = trans.head(418)

# atribua ao dataframe somente as primeiras 40 linhas
Trans_Excl = trans[:418]
Trans_Excl = Trans_Excl.drop(['0.00'], axis = 0)
Trans_Excl
```

Figura 2.4: Código para separação das alturas onde se encontram os aerossóis.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
0.10	2954	2932	2852	2868	2940	2914	3005	2937	2992	2932	...
0.19	3324	3295	3264	3199	3073	3192	3183	3101	3180	3159	...
0.29	3771	3760	3705	3663	3583	3704	3766	3739	3718	3668	...
0.38	3349	3248	3260	3257	3287	3185	3330	3165	3285	3316	...
...
39.74	17	44	31	72	34	53	57	60	75	63	...
39.84	25	39	20	63	35	51	60	72	52	51	...
39.94	17	43	37	46	31	59	54	46	58	48	...
40.03	22	44	29	53	42	64	52	61	58	51	...

Figura 2.5: Tabela com os dados até 40 km de altura.

Na figura 2.6 é mostrado mais etapas do processo de criação do código. Nela estão a subtração da média dos ruídos (figura 2.3) em cada horário e a altitude da matriz que faz a filtragem que contém os dados até 40km (figura 2.5). Nota-se a utilização de uma função .iloc a qual fez as subtrações de maneira automática e agilizou o trabalho para que não

fosse preciso utilizar laços de repetição para fazer o serviço. O resultado da subtração está mostrado na figura 7.

```
[8] #SUBTRAÇÃO DO RUIDO NOS DADOS
import pandas as pd
df4 = Trans_Excl
df5 = mediatrans
linha_df5 = df5.iloc[0]
subtracao = df4.sub(linha_df5, axis=1)
subtracao
```

Figura 2.6: Código para subtração dos ruídos dos dados

0.10	2949.661905	2929.433333	2848.857143	2866.047619	2937.233333	2912.080952	3003.12381	2935.042857	2990.042857	2929.985714	...
0.19	3319.661905	3292.433333	3260.857143	3197.047619	3070.233333	3190.080952	3181.12381	3099.042857	3178.042857	3156.985714	...
0.29	3766.661905	3757.433333	3701.857143	3661.047619	3580.233333	3702.080952	3764.12381	3737.042857	3716.042857	3665.985714	...
0.38	3344.661905	3245.433333	3256.857143	3255.047619	3284.233333	3183.080952	3328.12381	3163.042857	3283.042857	3313.985714	...
...
39.74	12.661905	41.433333	27.857143	70.047619	31.233333	51.080952	55.12381	58.042857	73.042857	60.985714	...
39.84	20.661905	36.433333	16.857143	61.047619	32.233333	49.080952	58.12381	70.042857	50.042857	48.985714	...
39.94	12.661905	40.433333	33.857143	44.047619	28.233333	57.080952	52.12381	44.042857	56.042857	45.985714	...
40.03	17.661905	41.433333	25.857143	51.047619	39.233333	62.080952	50.12381	59.042857	56.042857	48.985714	...

Figura 2.7: Planilha com os dados após subtração dos ruídos.

O que é mostrado na figura 2.8 é uma parte importante do código, pois com seu resultado foi possível a criação da função de plotagem dos gráficos.

```
[12] #MEDIA GERAL PARA PLOTAÇÃO DO GRAFICO
import pandas as pd
mediageral = pd.DataFrame(subtracao.mean(axis=1),
                           columns=['media'])
mediageral = mediageral.reset_index()
mediageral = mediageral.rename(columns={'index':
'altura', 'media': 'media'})

mediageral
```

Figura 2.8: Código para construção dos gráficos.

Nessa etapa, após a subtração dos ruídos, foi feita uma média geral para cada altura analisada (0km à 40km). A tabela resultante pode ser vista na figura 2.9.

altura	media
0.10	2420.745904
0.19	3042.573056
0.29	2829.862460
0.38	2582.708155
...	...

Figura 2.9: Tabela com a média dos sinais até 40 km de altura.

Concluindo a parte da programação do código segue sua parte final, mostrada na figura 2.10.

```
[14] import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.ticker import FuncFormatter

plt.plot(mediageral['media'], mediageral['altura'])
plt.yticks([0, 104, 208, 312, 416])
def y_formatter(value, _):
    if value == 0:
        return "0"
    elif value == 104:
        return "10"
    elif value == 208:
        return "20"
    elif value == 312:
        return "30"
    elif value == 416:
        return "40"

plt.xlabel('Sinal (nº de fótons)')
plt.ylabel('Altura (km)')

plt.gca().yaxis.set_major_formatter(FuncFormatter(y_formatter))

plt.show()
```

Figura 2.10: Código para construção dos gráficos.

Para que fosse possível a plotagem do gráfico, foi necessário utilizar outras 3 bibliotecas virtuais, são elas: Matplotlib.pyplot, Matplotlib.ticker e FuncFormatter.

Matplotlib.pyplot é uma biblioteca de visualização de dados em Python, que permite criar gráficos e plots de forma simples e intuitiva. Matplotlib.ticker permite personalizar os formatos dos rótulos nos eixos de um gráfico. Por fim, FuncFormatter permite criar formatações personalizadas para rótulos nos eixos de gráficos em Python.

Dito tais descrições de uso das novas bibliotecas adicionadas, após as importações delas, foi criado um laço de repetição usando if e elif para que os dados mostrados nos gráficos estivessem de acordo com a norma estabelecida. Logo, na figura 2.11 e 2.12 encontram-se o resultado da plotagem do gráfico, para o comprimento de onda do Potássio (770 nm) e do Sódio (589 nm) respectivamente.

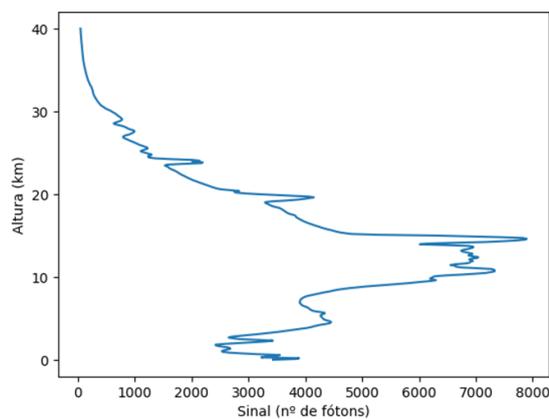


Figura 2.11: Perfil de aerossóis para 770 nm.

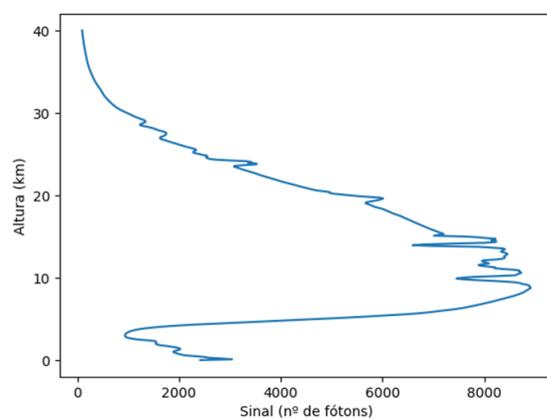


Figura 2.12: Perfil de aerossóis para 589 nm.

Os resultados obtidos a partir da análise dos dados coletados durante o estudo dos aerossóis provenientes do vulcão Hunga Tonga foram significativos e forneceram informações valiosas sobre as propriedades e características dessas partículas na atmosfera, onde a análise dos gráficos deixa claro a interferência que as plumas de aerossóis causaram na atmosfera, principalmente nas regiões entre 10 km e 20 km.

3. CONCLUSÃO

Este relatório descreve o desenvolvimento das funcionalidades do sistema de processamento de dados LiDAR durante o período de observação dos aerossóis provenientes do vulcão Hunga Tonga, bem como a análise dos dados resultantes. Através do uso do radar de laser do INPE e da coleta de dados sobre a poeira atmosférica proveniente da erupção vulcânica, foi possível obter informações valiosas sobre a presença de aerossóis na estratosfera.

A utilização do programa em Python no ambiente do Google Colab proporcionou uma abordagem eficiente para a leitura automatizada dos dados e a geração de gráficos, facilitando a análise dos resultados. As funcionalidades implementadas no programa permitiram a manipulação dos dados de K e Na, bem como a criação rápida e dinâmica de visualizações gráficas.

Através da compreensão do funcionamento do LiDAR e das estruturas da atmosfera, foi possível interpretar os dados coletados e obter uma compreensão mais aprofundada dos fenômenos observados. A filtragem dos valores correspondentes à faixa de altitude de 20 a 40 km possibilitou uma melhor visualização das camadas de aerossóis e identificou as altitudes específicas onde elas ocorreram. No geral, este estudo demonstrou a importância do LiDAR na análise de aerossóis estratosféricos e apresentou uma abordagem eficaz para o processamento e interpretação dos dados coletados. As informações obtidas contribuem para o avanço do conhecimento científico nessa área e podem ser aplicadas em estudos futuros relacionados à atmosfera e aos efeitos das erupções vulcânicas.

4. REFERÊNCIAS

BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B.R.; SIMONICH M. D. OBSERVATIONS OF ATMOSPHERIC DENSITY AND TEMPERATURE BETWEEN 35 AND 70 KM BY RAYLEIGH LIDAR AT SÃO JOSÉ DOS CAMPO, SP. 13. vol. São Paulo: 1995

CLEMESHA, B.R.; SIMONICH M. D. COMPARISON BETWEEN THE EL CHICHON AND PINATUBO AEROSOL, SP. São Paulo: 1990