



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Nely Grillo Guzmán

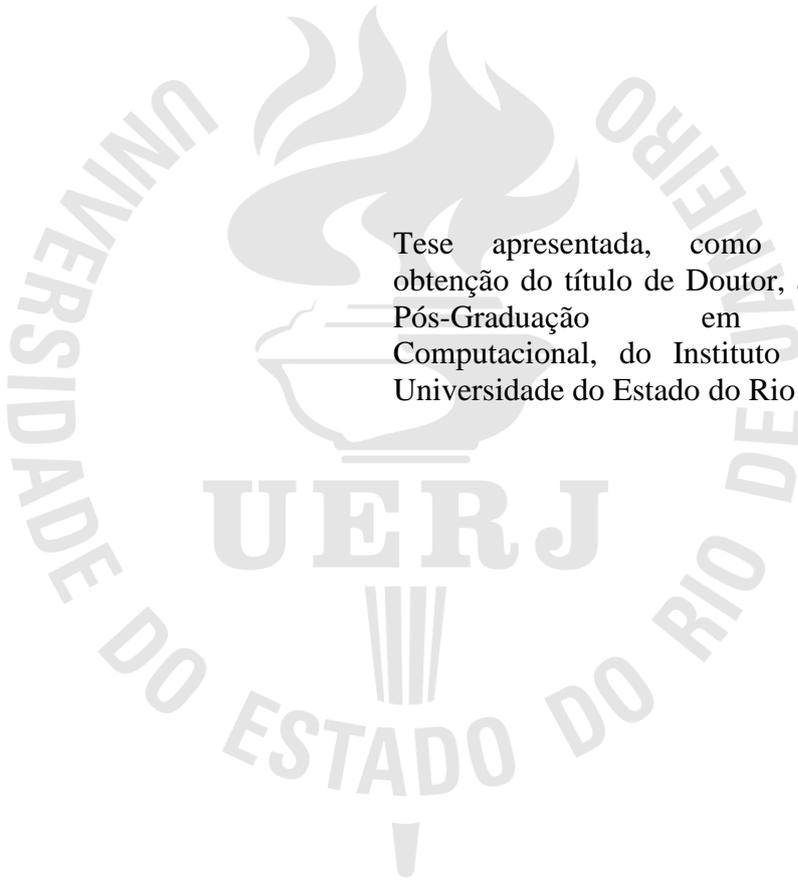
**Desenvolvimento de ferramentas para modelar a dispersão de  
contaminantes atmosféricos com dados públicos brasileiros, usando o  
modelo AERMOD**

Nova Friburgo

2023

Nely Grillo Guzmán

**Desenvolvimento de ferramentas para modelar a dispersão de contaminantes atmosféricos com dados públicos brasileiros, usando o modelo AERMOD**



Tese apresentada, como requisito para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientadores: Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis  
Prof. Dr. Joel Sánchez Domínguez

Nova Friburgo

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

G993 Guzmán, Nely Grillo  
Desenvolvimento de ferramentas para modelar a dispersão de contaminantes atmosféricos com dados públicos brasileiros, usando modelo AERMOD / Nely Grill Guzmán. - 2023.  
99 f. : il.

Orientadores: Joaquim Teixeira de Assis  
Joel Sánchez Domínguez  
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Espalhamento (Física) – Teses. 2. Ar - Poluição – Teses. 3. Métodos de simulação – Teses. I. Assis, Joaquim Teixeira de. II. Domínguez, Joel Sánchez III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. IV. Título.

CDU 539.171

Bibliotecária Pâmela Lisboa CRB7/ 5965

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Nely Grillo Guzmán

**Desenvolvimento de ferramentas para modelar a dispersão de contaminantes atmosféricos com dados públicos brasileiros, usando o modelo AERMOD**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 28 de março de 2023.

Banca examinadora:



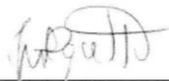
Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc. (Orientador)  
Instituto Politécnico – UERJ



Prof. Joel Sánchez Domínguez, D.Sc. (Orientador)  
Instituto Politécnico – UERJ

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** FLAVIA NORONHA DUTRA RIBEIRO  
Data: 29/03/2023 08:08:55-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof<sup>a</sup>. Flávia Noronha Dutra Ribeiro, D.Sc.  
Universidade de São Paulo – USP



Prof. Julio Barbosa Chiquetto, D.Sc.  
Universidade de São Paulo - USP



Prof. Mauro Cesar Geraldês, D.Sc.  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ



Prof. Luiz Nélio Henderson Guedes de Oliveira, D.Sc.  
Instituto Politécnico – UERJ

Nova Friburgo

2023

## **DEDICATÓRIA**

À minha família de longe e de perto, de sangue e de coração.

El que busca la verdad corre el riesgo de encontrarla

*Isabel Allende*

## RESUMO

GRILLO GUZMÁN, Nely. Desenvolvimento de ferramentas para modelar a dispersão de contaminantes atmosféricos com dados públicos brasileiros, usando o modelo AERMOD. 2023. Número de folhas f. Tese (Doutorado em Modelagem Computacional) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2023.

A relevância de simular a dispersão dos contaminantes atmosféricos é amplamente aceita pela comunidade científica e a sociedade. O AERMOD, é um modelo de dispersão de contaminantes que precisa da execução de alguns pré-processadores que preparam os dados de entrada necessários. As informações disponíveis internacionalmente para executar estes pré-processadores tem resoluções de 1000m, o que dificulta as simulações em regiões pequenas (alguns quilômetros ao redor da fonte de emissões) e com relevo irregular. Os dados públicos brasileiros têm maior resolução (30 m), mas com eles não é possível executar os pré-processadores AERSURFACE e AERMAP, verificando-se a necessidade de criar ferramentas que pudessem substituí-los. Foram criados o DATASURFACE e DATAMAP, os quais conseguem gerar os dados necessários para a execução do AERMOD usando os dados disponíveis publicamente no Brasil. Os resultados mostram que o DATASURFACE oferece maior praticidade para os usuários que desejam usar o AERMOD e consegue usar dados das características de superfície próprios da região de estudo, se disponíveis. Usando as ferramentas desenvolvidas foram executados três casos de estudo, dois deles em regiões com relevo irregular e um exemplo em uma região com relevo predominantemente plano. No terceiro exemplo foram obtidos resultados similares aos obtidos com o uso dos pré-processadores próprios do AERMOD. Para os dois primeiros exemplos, com o uso do DATAMAP, foram obtidos padrões de dispersão de contaminantes, em regiões menores, que respeitam a orografia do terreno e consideram o efeito de pequenas elevações presentes perto da fonte de contaminantes. Demonstrando assim a necessidade do uso das ferramentas desenvolvidas para este tipo de casos. As ferramentas desenvolvidas são muito necessárias se a região de estudo for de alguns  $m^2$ , mas podem ser usadas também para regiões maiores com  $1600 \text{ km}^2$ , onde são obtidos resultados similares aos obtidos com o uso dos pré-processadores próprios do AERMOD.

Palavras-chave: AERMOD. Dispersão de contaminantes. Contaminação atmosférica. Modelagem.

## ABSTRACT

GRILLO GUZMÁN, Nely. Development of tools to model the dispersion of atmospheric contaminants with Brazilian public data, using the AERMOD model. 2023. Número de folhas f. Tese (Doutorado em Modelagem Computacional) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2023.

The relevance of simulating the dispersion of atmospheric contaminants is widely accepted by the scientific community and society. AERMOD is a contaminant dispersion model that needs to run some preprocessors that prepare the necessary input data. The information available internationally to run these preprocessors has resolutions of 1000m, which makes simulations difficult in small regions (a few kilometers around the source of emissions) and with irregular relief. Brazilian public data have higher resolution (30 m), but with them it is not possible to run the AERSURFACE and AERMAP preprocessors, verifying the need to create tools that could replace them. DATASURFACE and DATAMAP were created, which manage to generate the necessary data for the execution of AERMOD using publicly available data in Brazil. The results show that DATASURFACE offers greater practicality for users who wish to use AERMOD and can use data from the surface characteristics of the study region, if available. Using the developed tools, three case studies were performed, two of them in regions with irregular relief and one example in a region with predominantly flat relief. In the third example, the results were similar to those obtained using AERMOD's own preprocessors. For the first two examples, with the use of DATAMAP, patterns of contaminants dispersion were obtained, in smaller regions, which respect the orography of the terrain and consider the effect of small elevations present near the source of contaminants. This way was demonstrated the need to use the tools developed for this type of cases. The developed tools are very necessary if the study area is a few  $m^2$ , but they can also be used for larger regions with  $1600 km^2$ , where similar results are obtained in both simulations.

Keywords: AERMOD. Contaminant dispersion. Atmospheric contamination. Modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Diagrama do modelo AERMOD .....	21
Figura 2 -	Perfil vertical da troposfera .....	22
Figura 3 -	Desenvolvimento da estrutura da CLA ao longo do dia .....	23
Figura 4 -	Relação entre a pluma real e a caracterização do AERMOD dela .....	26
Figura 5 -	Tratamento de três plumas do AERMOD da CLC .....	28
Figura 6 -	Formato da definição da grade cartesiana .....	50
Figura 7 -	Formato da definição da grade polar .....	51
Figura 8 -	Formato da definição da grade discreta de pontos cartesianos .....	51
Figura 9 -	Diagrama de passos para executar o AERMOD com as ferramentas desenvolvidas .....	56
Figura 10 -	Rosa dos ventos na estação meteorológica do IPRJ, do ano 2014, elaborada com WRPLOT View .....	60
Figura 11 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m .....	63
Figura 12 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m .....	63
Figura 13 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m .....	65
Figura 14 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m .....	65
Figura 15 -	Rosa dos ventos na estação meteorológica de Juiz de Fora, do ano 2014, elaborada com WRPLOT View .....	67
Figura 16 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m .....	69
Figura 17 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m .....	70
Figura 18 -	Imagem de satélite da região de estudo .....	71
Figura 19 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m .....	72
Figura 20 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m .....	73
Figura 21 -	Mapa de localização da região de estudo .....	74
Figura 22 -	Rosa dos ventos na estação meteorológica de Barcarena, do ano 2014, .....	75

	elaborada com WRPLOT View .....	
Figura 23 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte em Barcarena. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m .....	77
Figura 24 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte em Barcarena. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m .....	78
Figura 25 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte em Barcarena. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m .....	80
Figura 26 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte em Barcarena. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m .....	80
Figura 27 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km .....	90
Figura 28 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km .....	91
Figura 29 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km .....	92
Figura 30 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km .....	93
Figura 31 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte em Barcarena. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km .....	94
Figura 32 -	Dispersão de SO <sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte em Barcarena. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km .....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Padrões de Qualidade do Ar .....	17
Tabela 2 -	Classe de cobertura e uso da terra .....	41
Tabela 3 -	Classes de uso e cobertura da terra usadas no Brasil assemelhadas às usadas nos EEUU .....	43
Tabela 4 -	Comprimento de rugosidade da superfície para cada uma das classes de cobertura do uso do solo usadas no Brasil para cada estação do ano e situações com cobertura de neve constante .....	44
Tabela 5 -	Albedo para cada uma das classes de cobertura do uso do solo usadas no Brasil para cada estação do ano e situações com cobertura de neve constante .....	44
Tabela 6 -	Razão de Bowen para cada uma das classes de cobertura do uso do solo usadas no Brasil para cada estação do ano e situações com cobertura de neve constante .....	45
Tabela 7 -	Informações na primeira linha do arquivo de entrada do DATASURFACE.....	46
Tabela 8 -	Dados no segundo bloco de informações do arquivo de entrada do DATASURFACE .....	46
Tabela 9 -	Informações na penúltima linha do arquivo de entrada do DATASURFACE .....	47
Tabela 10 -	Dados no primeiro bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP .....	48
Tabela 11 -	Dados no segundo bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP .....	49
Tabela 12 -	Dados no terceiro bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP .....	49
Tabela 13 -	Dados no quarto bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP. Grade cartesiana .....	50
Tabela 14 -	Dados no quarto bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP. Grade polar .....	50
Tabela 15 -	Dados no quarto bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP. Grade discreta de pontos cartesianos .....	51
Tabela 16 -	Dados no último bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP .....	51
Tabela 17 -	Critérios simplificados para estimar a altura da CLA baseado na velocidade do vento e o grau de radiação .....	55
Tabela 18 -	Escala Beaufort .....	60
Tabela 19 -	Dados de emissão fictícios de SO <sub>2</sub> , para a simulação do IPRJ .....	61
Tabela 20 -	Quantidade de pontos e espaçamento das grades testadas .....	64

Tabela 21 - Dados de emissão de SO <sub>2</sub> , para a simulação de Juiz de Fora .....	68
Tabela 22 - Dados de emissão de SO <sub>2</sub> , para a simulação de Barcarena .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Atmosfera Livre
Al	Albedo
ASOS	Estações Automatizadas de Observação de Superfície
Bw	Razão de Bowen
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLC	Camada Limite Convectiva
CLE	Camada Limite Estável
CLN	Camada Limite Noturna
CLS	Camada Limite Superficial
CO	Monóxido de Carbono
CR	Camada Residual
DEM	Digital Elevation Models (Modelo Digital de Elevação)
EEUU	Estados Unidos
GEE	Gases do Efeito Estufa
FAA	Federal Aviation Administration (Administração da Aviação Federal)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPRJ	Instituto Politécnico de Rio de Janeiro
MG	Minas Gerais
MP10	Material Particulado (partículas entre 2.5 e 10 micrometros)
MP2.5	Material Particulado (partículas menores de 2.5 micrometros)
NLCD	National Land Cover Database (Base de Dados Nacional de cobertura do Solo dos EEUU)
NO2	Dióxido de Nitrogénio
NWS	National Weather Service (Serviço Meteorológico Nacional)
O3	Ozônio
PA	Pará
Pb5	Chumbo
PRIME	Plume Rise Model Enhancements (Aprimoramentos do modelo de ascensão de pluma)
RJ	Rio de Janeiro
SIG	Sistema de Informação Geográfico
SO2	Dióxido de enxofre
UFRGS	Universidade Federal de Rio Grande do Sul
USGS	United States Geological Survey (Pesquisa Geológica dos EEUU)
UTM	Universal Transverse Mercator (Transversal Universal Mercator)
Z <sub>0</sub>	Comprimento de Rugosidade da Superfície
ZE	Zona de Entranhamento

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1	<b>AERMOD E SEUS PRÉ-PROCESSADORES. DESAFIOS PARA SEU USO</b> .....	21
1.1	<b>Fundamentação físico-matemática do AERMOD</b> .....	22
1.2	<b>AERSURFACE, dificuldades para seu uso</b> .....	29
1.2.1	<u>Caraterísticas de superfície</u> .....	30
1.2.2	<u>Informações de entrada</u> .....	30
1.2.3	<u>Informações de saída</u> .....	31
1.3	<b>AERMINUTE</b> .....	32
1.3.1	<u>Informações de entrada</u> .....	32
1.3.2	<u>Informações de saída</u> .....	33
1.4	<b>AERMET</b> .....	33
1.4.1	<u>Estágios de AERMET</u> .....	33
1.4.2	<u>Informações de saída</u> .....	34
1.5	<b>BPIPPRM</b> .....	34
1.5.1	<u>Informações de entrada</u> .....	35
1.5.2	<u>Informações de saída</u> .....	35
1.6	<b>AERMAP, dificuldades para seu uso</b> .....	35
1.6.1	<u>Passos para o cálculo da escala de altura de colina (HILL)</u> .....	36
1.6.2	<u>Informações de entrada</u> .....	37
1.6.3	<u>Informações de saída</u> .....	37
1.7	<b>AERMOD</b> .....	37
1.7.1	<u>Informações de entrada</u> .....	38
1.7.2	<u>Informações de saída</u> .....	38
1.8	<b>AERPLOT</b> .....	39
1.8.1	<u>Informações de entrada</u> .....	39
1.8.2	<u>Informações de saída</u> .....	39
2	<b>DATASURFACE E DATAMAP, SUBSTITUTOS DO AERSURFACE E O AERMAP</b> .....	40
2.1	<b>DATASURFACE</b> .....	40
2.1.1	<u>Cobertura e uso do solo</u> .....	40
2.1.2	<u>Caraterísticas de superfície</u> .....	43
2.1.3	<u>Informações de entrada</u> .....	45
2.1.4	<u>Informações de saída</u> .....	47
2.2	<b>DATAMAP</b> .....	47
2.2.1	<u>Informações de entrada</u> .....	48
2.2.2	<u>Cálculo de escala de altura de colina (HILL)</u> .....	52
2.2.3	<u>Informações de saída</u> .....	52
2.3	<b>Ferramentas auxiliares</b> .....	52
2.3.1	<u>Converter de coordenadas Geográficas a UTM e vice-versa</u> .....	53
2.3.2	<u>Formatar os dados meteorológicos para usar no AERMET</u> .....	53
2.3.3	<u>Estimar os valores da altura da Camada Limite Atmosférica</u> .....	55
2.4	<b>Metodologia de uso do AERMOD com as ferramentas desenvolvidas</b> .....	56

2.5	<b>Disponibilização dos códigos desenvolvidos</b> .....	56
3	<b>RESULTADOS OBTIDOS COM O USO DAS FERRAMENTAS DESENVOLVIDAS</b> .....	59
3.1	<b>Exemplo de fonte fictícia no Instituto Politécnico – IPRJ</b> .....	59
3.2	<b>Exemplo de fonte na zona industrial de Juiz de Fora</b> .....	66
3.3	<b>Exemplo de fonte na zona industrial de Barcarena</b> .....	74
	<b>CONCLUSÕES</b> .....	81
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	84
	<b>APÊNDICE A</b> - Trabalhos apresentados em congressos e publicações .....	89
	<b>APÊNDICE B</b> - Dispersão do gás SO <sub>2</sub> considerando uma fonte pontual localizada no Instituto Politécnico - IPRJ e com grade quadrada de 1600 pontos e espaçamento de 1km.....	90
	<b>APÊNDICE C</b> - Dispersão do gás SO <sub>2</sub> considerando uma fonte pontual localizada na zona industrial de Juiz de Fora e com grade quadrada de 1600 pontos e espaçamento de 1km.....	92
	<b>APÊNDICE D</b> - Dispersão do gás SO <sub>2</sub> considerando uma fonte pontual localizada em Barcarena e com grade quadrada de 1600 pontos e espaçamento de 1km.....	94
	<b>APÊNDICE E</b> - Pseudocódigo para converter pontos de coordenadas geográficas a UTM.....	96
	<b>ANEXO</b> - Classificação de Köppen-Geiger.....	98

## INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é a presença no ar de materiais ou formas de energia que impliquem risco, dano ou grave incômodo para pessoas e seres vivos. Esta poluição pode afetar diversos materiais, reduzir a visibilidade ou produzir odores desagradáveis. (SEWELL, 1978). A Resolução nº 003/1990, em seu art. 1º, define que são padrões de qualidade ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Define como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna e flora; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade. (CONAMA, 1990)

Mesmo que o Brasil não disponha de inventários nacionais completos e atualizados das emissões de poluentes atmosféricos pelas diferentes fontes, estimativas de iniciativas como a *Emission Database for Global Atmospheric Research* (Banco de Dados de Emissões para Pesquisa Atmosférica Global) (CRIPPA et. al., 2019) apontam que as principais fontes são o setor de transporte, os processos industriais e a queima de biomassa.

O setor de transporte é uma importante fonte de poluentes urbanos, 90% das emissões de gases poluentes e de dióxido de carbono são oriundos da queima de combustíveis de veículos do modal rodoviário (CORRÊA, 2010). Vale ressaltar que, segundo CARVALHO (2011), nos grandes centros urbanos brasileiros, o transporte individual responde por cerca de 57% das emissões de dióxido de carbono, o transporte público coletivo, por 27% das emissões, enquanto veículos pesados para transporte de carga, por 12%.

As queimadas e os incêndios florestais compõem a principal fonte de emissão de poluentes atmosféricos nas regiões do Brasil central e na Amazônia. A queima de biomassa decorrente das áreas desmatadas e do manejo de pastos, além de liberarem GEE (Gases de Efeito Estufa), liberam também grandes quantidades de material particulado. Esse material particulado atua como núcleo de condensação de nuvens alterando a física das mesmas e influenciando as chuvas (OLIVEIRA et al., 2007). Portanto, a fumaça liberada pelas queimadas impacta diretamente o ciclo hidrológico, pois aumenta a disponibilidade de

partículas na atmosfera que interferem na formação de gotículas de chuva, de modo que elas demoram para atingir seu tamanho ideal e precipitem como chuva, gerando um ciclo vicioso entre queimadas e secas (LIU et al., 2020; ARTAXO et al., 2013; NEPSTAD et al., 2001).

A poluição atmosférica resultante das atividades produtivas do setor industrial e da produção de energia por meio da queima de combustível fóssil e biomassa (usinas termelétricas) são decorrentes de fontes estacionárias ou fixas. As fontes fixas de emissão podem ser definidas como “qualquer instalação, equipamento ou processo, situado em local fixo, que libere ou emita matéria para a atmosfera, por emissão pontual ou fugitiva” (BRASIL, 2007). De maneira geral, as emissões de poluentes dessas fontes são provenientes dos processos de fabricação e transformação dos produtos, da queima de combustíveis para a produção de energia ou mesmo da movimentação de materiais. A geração de energia por meio da queima de combustíveis fósseis cresceu no país nas últimas décadas (ANGELO e RITTL, 2019), e se caracteriza por ser uma fonte potencial de emissão de poluentes.

O SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) é classificado como um poluente primário (emitido diretamente pela fonte de emissão). Entre os principais sintomas aparentes ao ser exposto a níveis elevados deste gás estão a tosse, irritação nos olhos, náuseas, vômitos e dificuldades ao respirar, mas podem causar outros efeitos nos seres humanos como irritação no sistema respiratório e na pele e podem levar ao desenvolvimento de doenças cardiovasculares. O SO<sub>2</sub> também está associado à chuva ácida, devido à sua reação com H<sub>2</sub>O (presente no ar). As chuvas ácidas podem afetar as plantas reduzindo a taxa de fotossíntese, podem causar a morte de espécies quando eleva a acidez do solo, rios e lagos e corroer a estrutura de monumentos e edificações. (VERGNHANINI, 2020)

Uma série de estudos nacionais aponta os impactos em saúde por diferentes tipologias de fontes de emissões, tais como: queima de combustíveis fósseis para geração de energia no transporte (ANDRÉ et al., 2012; VORMITTAG et al., 2018; INSTITUTO DE SAÚDE E SUSTENTABILIDADE, 2019); processos industriais (SPEKTOR et al., 1991; BRAGA et al., 2007); atividades agrossilvopastoris associadas a queimadas, incêndios florestais e movimentação do solo (ARBEX et al., 2014; CANÇADO et al., 2006), além de queimadas nas regiões Norte e Centro-Oeste (REDDINGTON et al., 2015; SILVA et al., 2016; ALVES, 2020), revelando um acúmulo de conhecimento e evidências suficientes para embasar ações de controle da poluição e gestão da qualidade do ar.

Todos os estudos sugerem que existe associação da poluição atmosférica com problemas na saúde da população, contando principalmente afetações por doenças respiratórias e cardiovasculares. Também pode se associar a outros problemas como o baixo

peso ao nascer, incidência e mortalidade por câncer, partos prematuros e anemia falciforme. (DAPPER, SPOHR e ZANINI, 2016)

A concentração dos contaminantes reduz-se à medida que estes são dispersos na atmosfera, o que depende de fatores climatológicos, como a temperatura, a velocidade do vento, o movimento de sistemas de alta e baixa pressão e a interação destes com a topografia local, montanhas e vales, por exemplo. Para analisar a dispersão, recorre-se a modelos de dispersão atmosférica, que são modelos computadorizados onde através de formas matemáticas complexas são simulados os comportamentos físico e químicos dos contaminantes, podendo caracterizar ou prever a ação dos mesmos no meio ambiente. (INSTITUTO ASTRONÓMICO E GEOFÍSICO, 2021)

### **Modelos de dispersão de contaminantes**

A análise do comportamento dos diferentes poluentes e das emissões de contaminantes é de vital importância para a tomada de decisões por parte do governo com o objetivo de manter os níveis de poluentes dentro dos padrões permissíveis. Os padrões permissíveis para o Brasil foram atualizados no ano 2018 pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente como mostrado na Tabela 1.

Para analisar o comportamento dos materiais e gases considerados poluentes é necessário contar com um modelo de dispersão de contaminantes que consiga simular e até prever estes comportamentos. Existem numerosos modelos matemáticos de difusão de poluentes na atmosfera, também notavelmente diferentes uns dos outros.

Tabela 1 - Padrões de Qualidade do Ar.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	ppm
		mg/m <sup>3</sup>	m/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	
Material Particulado - MP10	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP2,5	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual <sup>1</sup>	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO <sub>2</sub>	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual <sup>1</sup>	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO <sub>2</sub>	1 hora <sup>2</sup>	260	240	220	200	-
	Anual <sup>1</sup>	60	50	45	40	-
Ozônio - O <sub>3</sub>	8 horas <sup>3</sup>	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas <sup>3</sup>	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual <sup>4</sup>	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb <sub>5</sub>	Anual <sup>1</sup>	-	-	-	0,5	-
1 - média aritmética anual						
2 - média horária						
3 - máxima média móvel obtida no dia						
4 - média geométrica anual						
5 - medido nas partículas totais em suspensão						

Fonte: BRASIL, 2018.

A aproximação teórica ao problema é essencialmente subdividida em quatro formulações fundamentais: (MOREIRA e TIRABASSI, 2004)

- A aproximação K, onde a difusão é considerada em um ponto fixo no espaço, é proporcional ao gradiente local da concentração do material difundido. Conseqüentemente, tal aproximação é fundamentalmente Euleriana, considerando-se o movimento do fluido relacionado a um sistema de referência fixo no espaço. Entre os modelos Eulerianos, o modelo a box constitui a aproximação matemática mais simples porque ignora a estrutura espacial do fenômeno. Ele assume que os poluentes são distribuídos uniformemente no interior de um paralelepípedo (um box). Do ponto de vista teórico, isto equivale a assumir coeficientes de difusão infinitos que provocam uma propagação instantânea do poluente imerso no box considerado. O poluente presente no box provém da fonte interna, da contribuição externa transportada pelo vento ou flui através do topo em consequência da variação de altura do box, que geralmente coincide com a altura da camada limite.
- Os modelos Lagrangeanos se diferenciam dos Eulerianos porque utilizam um sistema de referência que segue o movimento da atmosfera. Inicialmente, com o termo Lagrangeano indicava-se somente o modelo a box com box "móvel", que segue a trajetória do vento médio. Atualmente, são imersos nesta classe todos os modelos que

acompanham a nuvem de poluentes em "elementos" discretos, como segmento "puff" ou partículas fictícias. Os movimentos destas partículas podem ser reproduzidos de modo determinístico e em modo estocástico.

- O modelo Gaussiano fundamenta o pressuposto teórico na solução exata, mas não real, da equação de transporte e difusão na atmosfera, no caso em que o vento e o coeficiente de difusão turbulenta são constantes com a altura. A solução é forçada a representar situações reais através de parâmetros empíricos, os chamados "sigmas". Podem ser estacionários (independentes do tempo, e considerados "modelos pluma") e os que dependem do tempo (os modelos "puff"). As várias versões dos modelos Gaussianos se diferenciam essencialmente pela técnica utilizada para calcular o sigma em função da estabilidade atmosférica e da distância da fonte emissora.
- Os modelos analíticos podem ser considerados intermediários entre o modelo K e o Gaussiano. Do segundo conservam a simplicidade, pois o campo de concentração é descrito através de uma fórmula simples, mas, ao mesmo tempo, são capazes de considerar, de modo teoricamente mais correto, situações em que o vento e o coeficiente de difusão turbulento variam com a altura.

O AERMOD é um sistema de modelagem de dispersão atmosférica que foi introduzido por meio da *American Meteorological Society / Environmental Protection Agency Regulatory Model Improvement Committee (AERMIC)*. Este é um modelo de pluma gaussiana cujo uso no Brasil é limitado para regiões pequenas (tipo dentro de uma cidade) pela dificuldade de adequar os dados disponíveis aos dados de entrada necessários; especificamente a cobertura e uso do solo e a elevação do terreno. (AERMOD a, 2019)

O modelo AERMOD é usado no Brasil, principalmente em regiões com relevo plano ou quase plano, como as pesquisas desenvolvidas por ROSA (2012), STINGELIN (2016) e BUHR (2010), onde a dispersão dos contaminantes está dada principalmente pela direção e velocidade do vento predominante. Já em estudos com velocidade do vento predominante inferiores a 3m/s, e um relevo irregular, é preciso fazer simulações a escalas maiores para perceber o efeito da orografia na dispersão dos contaminantes, como aconteceu na pesquisa de AUGUSTO (2015), onde também é usado o AERMOD para simular a dispersão de contaminantes.

## **Motivação da pesquisa**

As imagens de elevação do terreno disponíveis no Brasil têm uma melhor resolução do que as disponibilizadas mundialmente para serem usadas na execução do AERMOD, e as informações de cobertura e uso do solo brasileiras tem uma classificação e tabela de dados diferentes das usadas pelos pré-processadores do modelo. Estas informações, as quais não são totalmente compatíveis com o AERMOD, não permitem a execução de alguns dos seus pré-processadores, imprescindíveis para obter resultados com boa acurácia.

Desta forma a nossa motivação é conseguir obter resultados aprimorados ao usar o modelo AERMOD com os dados públicos brasileiros. Para isto estaremos desenvolvendo ferramentas com o objetivo de processar os dados de cobertura e uso do solo e elevação do terreno para que possam ser usados pelo AERMOD, e dessa forma conseguir fazer simulações de dispersão de contaminantes em escalas espaciais mais finas do Brasil, com este modelo, considerando a influência dos fatores orográficos e da vegetação.

## **Objetivos da pesquisa**

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de ferramentas que permitam usar o modelo AERMOD, para analisar a dispersão de contaminantes no Brasil, usando os dados públicos brasileiros disponíveis com melhor resolução do que os encontrados mundialmente. Para atingir este objetivo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o modelo AERMOD, identificar os dados disponíveis para sua execução no Brasil e analisar as principais dificuldades do seu uso com os dados públicos brasileiros.
- Desenvolver as ferramentas necessárias para processar os dados públicos brasileiros que são necessárias para executar o AERMOD.
- Definir uma metodologia de uso do AERMOD usando as ferramentas desenvolvidas.
- Modelar eventos de dispersão de contaminantes usando as ferramentas desenvolvidas.

- Comparar os resultados obtidos ao executar o modelo com as ferramentas desenvolvidas e com os pré-processadores próprios do AERMOD, para diferentes tipos de relevo e tamanho da região de estudo.
- Comparar os resultados obtidos ao executar o modelo com as ferramentas desenvolvidas e os resultados de outros pesquisadores para a mesma região de estudo.
- Definir a quantidade máxima de pontos receptores que pode ter a grade para as simulações usando as ferramentas desenvolvidas.

### **Organização do trabalho**

No capítulo 1 é apresentado, para cada um dos componentes do modelo AERMOD, um resumo das características, funcionamento, informações iniciais para execução e dificuldades para seu uso com os dados públicos brasileiros (nos casos aplicáveis).

No capítulo 2 são descritos detalhadamente o DATASURFACE e DATAMAP, dois programas desenvolvidos com o objetivo de substituir dois dos pré-processadores do AERMOD. Se explica o funcionamento, informações de entrada e resultados que são obtidos com a execução deles.

No capítulo 3 se amostram três exemplos do uso das ferramentas desenvolvidas, com fontes localizadas em: Instituto Politécnico - IPRJ (Nova Friburgo - RJ), zona industrial de Juiz de Fora (Juiz de Fora - MG), e zona industrial de Barcarena (Barcarena - PA). Nos três casos foram descritas as características físico-geográficas e meteorológicas da região de estudo, os parâmetros usados para executar a simulação e os resultados obtidos com cada uma das simulações apresentadas.

Por último são expostas as conclusões da pesquisa, as recomendações e trabalhos futuros que poderiam ser de interesse para dar seguimento ao trabalho.

## 1 AERMOD E SEUS PRÉ-PROCESSADORES. DESAFIOS PARA SEU USO.

O AERMOD é um modelo gaussiano de pluma em estado estacionário que incorpora a dispersão do ar com base na estrutura de turbulência da camada limite planetária e conceitos de dimensionamento, incluindo o tratamento de fontes superficiais e elevadas e terrenos simples e complexos.

Ele se auxilia de vários pré-processadores para a formatação dos dados a serem introduzidos para sua execução. Estes são: AERSURFACE, AERMINUTE, AERMET, BPIPPRM, AERMAP, que a partir dos dados nacionais de cobertura do solo, dados meteorológicos de superfície e ar superior e dados de elevação de terreno e outras informações, geram os arquivos de dados necessários para a execução do AERMOD. (SCRAM, 2021). O pós-processador AERPLOT facilita a visualização dos resultados. A Figura 1 mostra um diagrama do modelo AERMOD e sua interação com seus pré e pós processadores, especificando as informações processadas por eles.

Figura 1 – Diagrama do modelo AERMOD.



Fonte: O autor, 2022.

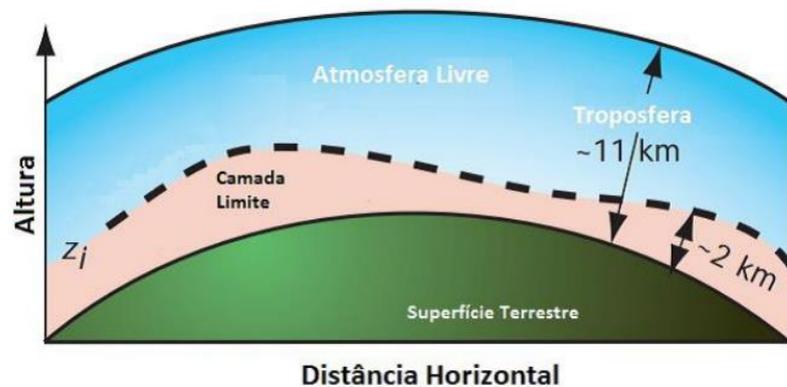
O AERMOD (SCRAM, 2021) é um modelo desenvolvido na linguagem de programação Fortran, assim como seus pré-processadores. A versão atual do modelo foi desenvolvida no sistema operacional Microsoft Windows (Windows) e foi projetada para ser executada em computadores com Windows em um prompt de comando usando linhas de comando para iniciar a execução do modelo. A quantidade de espaço de armazenamento necessária no disco rígido para um determinado aplicativo dependerá muito das opções de saída selecionadas, pois alguns dos arquivos de saída opcionais de dados de concentração podem ser relativamente grandes.

## 1.1 Fundamentação físico-matemática do AERMOD.

O AERMOD foi projetado para lidar com o cálculo de concentração e dispersão de poluentes em terrenos planos e complexos dentro da mesma estrutura de modelagem. De fato, com a estrutura AERMOD, não há necessidade de especificação do tipo de terreno (plano, simples ou complexo) em relação à altura da pilha, pois os receptores em todas as elevações são tratados com a mesma metodologia geral. Para definir a forma das equações de concentração do AERMOD, é necessário discutir simultaneamente o manejo do terreno.

A troposfera, que é a primeira camada da atmosfera, pode ser dividida em duas partes considerando os processos físicos e químicos predominantes: Camada Limite Atmosférica (CLA) e Atmosfera Livre (AL), como mostrado na Figura 2. A primeira é a que se encontra mais baixa e próxima a superfície terrestre e possui características predominantemente turbulentas, e a segunda é dominada por processos meteorológicos associados a sistemas atmosférico de grande e meso-escala e possui um escoamento denominado laminar.

Figura 2 – Perfil vertical da troposfera.

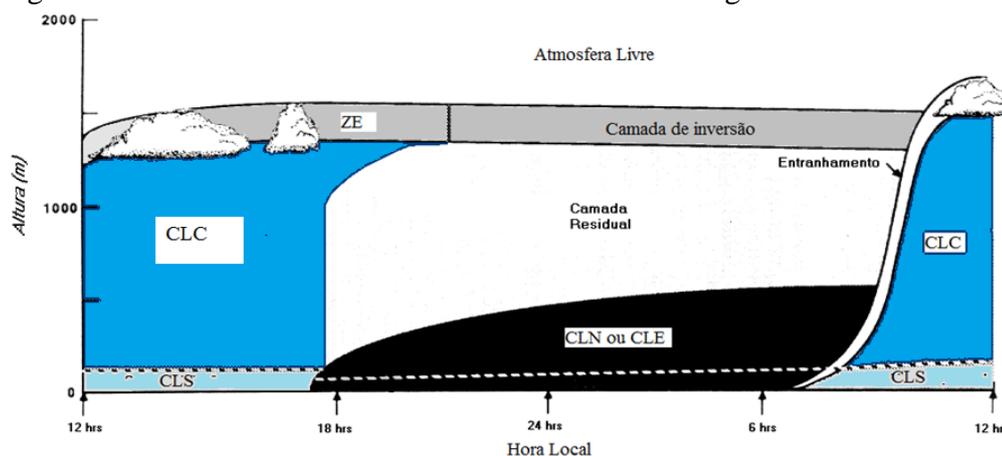


Fonte: BARBOSA, 2018.

As variações da altura da CLA vão de centenas de metros até alguns quilômetros e tal altura é um importante parâmetro para a determinação de diversos processos que ocorrem dentro da troposfera, como por exemplo, a formação de nuvens, distribuição de aerossóis, assim como, a determinação do volume disponível para dispersão de poluentes.

O desenvolvimento da estrutura da CLA (Figura 3) pode ser entendido através do ciclo diário do fluxo de radiação solar.

Figura 3 – Desenvolvimento da estrutura da CLA ao longo do dia.



Fonte: Barbosa, 2018.

Este ciclo se inicia ao nascer do sol, que aquece a superfície da terra que vai liberando energia aquecendo a CLA na forma de calor sensível, surgindo assim a Camada Limite Superficial (CLS). Esta é a camada que fica em contato com a superfície e pode variar desde poucos milímetros a poucas dezenas de metros, com pouca influência da viscosidade. Durante o dia, a CLS possui intensos gradientes verticais de umidade, velocidade do vento e temperatura, alta concentração de correntes térmicas, as quais se fundem e formam turbilhões maiores e mais organizados na Camada Limite Convectiva (CLC), a qual pode ser assim chamada devido à forte mistura na sua parte interna, indicando a existência de grande turbulência oriunda de intensa convecção. A CLC se estende até aproximadamente 1-2 km de altura. O topo desta camada é estável e serve como um tampão, impedindo a subida das correntes térmicas e contendo assim o domínio da turbulência. A região do topo da camada é chamada de Zona de Entranhamento (ZE), onde existe um empuxo negativo, fazendo com que as correntes térmicas, que ascendem verticalmente com o empuxo positivo, voltem à CLC. No início da noite, quando o saldo de radiação passa a ser negativo, a CLA não apresenta mais a influência dos processos turbulentos da mesma maneira que ocorrem durante o dia. A partir daí, surge uma camada de inversão, a Camada Limite Estável ou Camada Limite Noturna (CLE ou CLN), a qual causa um desacoplamento entre a superfície e a CLC acima dela. A camada logo acima desta camada estável recebe o nome de Camada Residual (CR), por possuir características remanescentes da CLC formada durante o dia. Ao contrário do que ocorre na CLC, a CLN não possui um topo bem definido e se mistura suavemente com a CR logo acima. (BARBOSA, 2018)

O AERMOD considera que na CLE, a distribuição de concentração é assumida como gaussiana tanto na vertical quanto na horizontal. Na CLC, a distribuição horizontal é assumida como gaussiana, mas a distribuição vertical é descrita com uma função de densidade de probabilidade bi-Gaussiana. Além disso, na CLC, o AERMOD trata o “plume lofting”, pelo qual uma porção da massa da pluma, liberada de uma fonte flutuante, sobe e permanece perto do topo da camada limite antes de se misturar verticalmente em toda a CLC. O modelo também rastreia qualquer massa de pluma que penetre em uma camada estável elevada e, em seguida, permite que ela entre novamente na camada limite quando e se apropriado.

Em terrenos complexos, o AERMOD incorpora o conceito de linha de corrente divisória (SNYDER et al., 1985) para condições de estratificação estável. Quando apropriado, a pluma é modelada como uma combinação de dois casos limites: uma pluma horizontal e uma pluma que segue o terreno. Ou seja, o AERMOD lida com o cálculo do impacto dos poluentes em terrenos planos e complexos dentro da mesma estrutura de modelagem. Geralmente, em escoamentos estáveis, desenvolve-se uma estrutura de duas camadas na qual a camada inferior permanece horizontal enquanto a camada superior tende a se elevar sobre o terreno. O conceito de escoamento em duas camadas, distinguido na altura da linha divisória ( $H_c$ ), foi sugerido pela primeira vez pelos argumentos teóricos de SHEPPARD (1956) e demonstrado através de experimentos de laboratório, particularmente os de SNYDER et al. (1985). Em condições neutras e instáveis  $H_c = 0$ .

Uma pluma embutida no escoamento abaixo de  $H_c$  tende a permanecer horizontal; pode dar a volta na colina ou impactar nela. Uma pluma acima de  $H_c$  passará sobre a colina. Associado a isso está a tendência de a pluma ser deprimida em direção à superfície do terreno, de acelerar o fluxo e de aumentar as intensidades turbulentas verticais.

O pré-processador de terreno AERMOD (AERMAP) usa dados de terreno em grade para calcular uma altura de influência de terreno ( $h_c$ ) representativa para cada receptor com o qual o AERMOD calcula valores de  $H_c$  específicos do receptor. Por meio dessa abordagem, o AERMOD lida com o cálculo de impactos de poluentes em terrenos planos e elevados dentro da mesma estrutura de modelagem, eliminando assim a necessidade de diferenciar as formulações para terrenos simples e complexos.

O AERMOD captura o efeito do fluxo acima e abaixo da linha divisória, ponderando a concentração da pluma associada a dois possíveis estados extremos da camada limite (pluma horizontal e seguimento do terreno). Conforme discutido abaixo, o peso relativo dos dois estados depende: 1) do grau de estabilidade atmosférica; 2) a velocidade do vento; e 3) a altura da pluma em relação ao terreno. Em condições estáveis, a pluma horizontal “domina” e

recebe maior peso, enquanto em condições neutras e instáveis, a pluma viajando sobre o terreno é mais pesada.

A equação geral de concentração, que se aplica em condições estáveis ou convectivas é dada por:

$$C_T\{x_r, y_r, z_r\} = f \cdot C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\} + (1-f) C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\} \quad [1]$$

Onde  $C_T\{x_r, y_r, z_r\}$  é a concentração total,  $C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\}$  é a contribuição do estado da pluma horizontal ( $c$  e  $s$  referem-se a condições convectivas e estáveis, respectivamente),  $C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\}$  é a contribuição do estado de seguimento do terreno,  $f$  é a função de ponderação do estado da pluma,  $\{x_r, y_r, z_r\}$  é a representação coordenada de um receptor (com  $z_r$  definido em relação à elevação da base),  $z_p = z_r - z_t$  é a altura de um receptor acima do solo local, e  $z_t$  é a altura do terreno em um receptor.

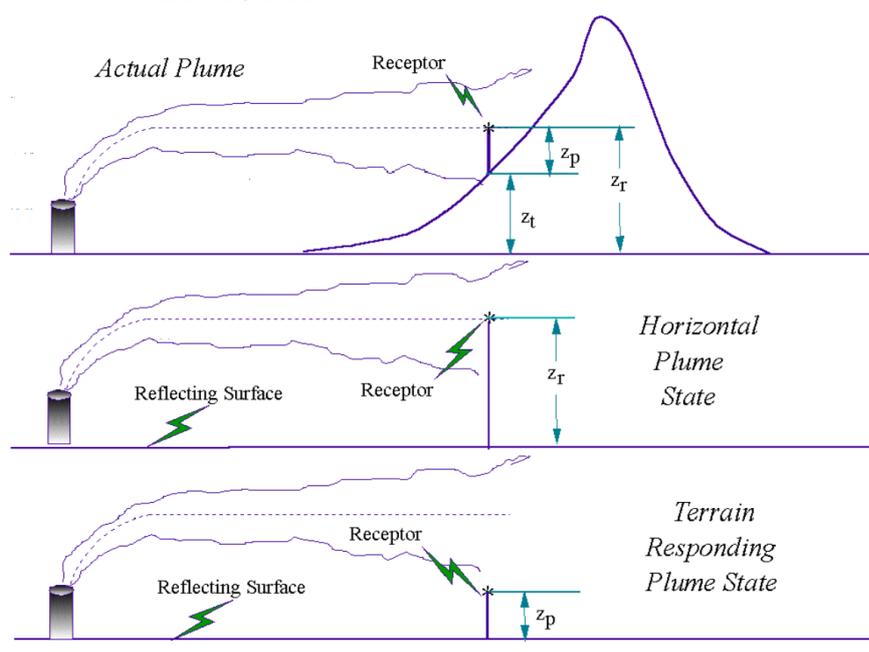
Observe que em terreno plano,  $z_t = 0$ ,  $z_p = z_r$  e a concentração total, se reduz à forma de uma única pluma horizontal. É importante notar que para qualquer cálculo de concentração todas as alturas ( $z$ ) são referenciadas à elevação da base. A Figura 4 ilustra a relação entre a pluma real e a caracterização do AERMOD dela, já que o modelo considera a concentração total prevista (primeira faixa da figura, de cima para abaixo) como a soma ponderada dos dois estados extremos de pluma possíveis (segunda e terceiras faixas da figura).

A formulação do fator de ponderação requer o cálculo de  $H_c$ . Usando a escala de altura do terreno específica do receptor ( $h_c$ ) do AERMAP,  $H_c$  é calculado:

$$\frac{1}{2} \cdot u^2\{H_c\} = \int_{H_c}^{h_c} N^2(h_c - z) dz \quad [2]$$

Onde  $u\{H_c\}$  é a velocidade do vento na altura  $H_c$ , e  $N = \left[ \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]^{1/2}$  é a frequência de Brunt-Vaisala. A escala de altura  $h_c$  caracteriza a altura do terreno circundante que mais domina o fluxo nas proximidades do receptor.

Figura 4 – Relação entre a pluma real e a caracterização do AERMOD dela.



Fonte: AERMOD b, 2019.

Na abordagem AERMOD, a altura da pluma, a elevação do receptor e o  $H_c$  determinarão a quantidade de material da pluma que reside em cada estado da pluma. Para um receptor na altitude  $z_t$  e uma pluma efetiva na altura  $h_e$ , a altura que as linhas de corrente devem atingir para estar no estado de seguimento do terreno é  $z_t + h_e$ . Portanto, a altura do terreno,  $h_c$ , na determinação de  $H_c$  é simplesmente igual a esta altura local de seguimento do terreno. Qualquer terreno real acima de  $h_c = z_t + h_e$  não tem consequências para a concentração no receptor. Para qualquer receptor,  $h_c$  é definido como o mínimo entre o terreno real mais alto e a altura de seguimento do terreno local. A fração da massa da pluma abaixo de  $H_c$  (ou seja,  $\varphi_p$ ) é calculada como:

$$\varphi_p = \frac{\int_0^{H_c} C_s\{x_r, y_r, z_r\} dz}{\int_0^{\infty} C_s\{x_r, y_r, z_r\} dz} \quad [3]$$

Onde  $C_s\{x_r, y_r, z_r\}$  é a concentração na ausência do morro para condições estáveis. Em condições convectivas  $H_c = 0$  e  $\varphi_p = 0$ . O fator de ponderação  $f$  do estado da pluma é dado por  $f = 0,5 \cdot (1 + \varphi_p)$ . Quando a pluma está inteiramente abaixo de  $H_c$  ( $\varphi_p = 1.0$  e  $f = 1.0$ ) a concentração é determinada apenas pela pluma horizontal. Quando a pluma está totalmente

acima da altura crítica da linha de corrente divisória ou quando a atmosfera é neutra ou convectiva, ( $\varphi_p = 0$  e  $f = 0.5$ ).

A forma geral das expressões de concentração em cada termo da equação geral de concentração, tanto para o CLC quanto para o CLE pode ser escrito da seguinte forma:

$$C\{x, y, z\} = \left( \frac{Q}{\bar{u}} \right) P_y\{y; x\} P_z\{z; x\} \quad [4]$$

Onde  $Q$  é a taxa de emissão da fonte,  $\bar{u}$  é a velocidade efetiva do vento e  $p_y$  e  $p_z$  são funções de densidade de probabilidade que descrevem as distribuições de concentração lateral e vertical, respectivamente. AERMOD assume uma pluma gaussiana tradicional para ambas as distribuições lateral e vertical no CLE e para a distribuição lateral no CLC. A distribuição vertical do material de pluma da CLC reflete a natureza distintamente não gaussiana da distribuição vertical de velocidade em camadas misturadas por convecção.

O AERMOD simula cinco tipos diferentes de plumas dependendo da estabilidade atmosférica e da localização dentro e acima da camada limite: 1) direta, 2) indireta, 3) penetrada, 4) injetada e 5) estável. Durante condições estáveis, as plumas são modeladas com as formulações gaussianas horizontais e verticais. Durante condições convectivas ( $L < 0$ ), a distribuição horizontal ainda é gaussiana; a distribuição vertical da concentração resulta de uma combinação de três tipos de plumas: 1) o material direto da pluma dentro da camada de mistura que inicialmente não interage com a tampa da camada de mistura; 2) o material da pluma indireta dentro da camada de mistura que sobe e tende a se elevar inicialmente próximo ao topo da camada de mistura; e 3) o material de pluma penetrado que é liberado na camada mista, mas, devido à sua flutuabilidade, penetra na camada estável elevada.

Durante condições convectivas, o AERMOD também lida com um caso especial chamado de fonte injetada, onde o topo da pilha (ou altura de liberação) é maior que a altura de mistura. As fontes injetadas são modeladas como plumas em condições estáveis, porém a influência da turbulência e dos ventos dentro da camada de mistura são consideradas nos cálculos de não homogeneidade à medida que o material da pluma passa pela camada de mistura para atingir os receptores.

Existem três fontes primárias que contribuem para o campo de concentração modelado (Figura 5): 1) a fonte “direta” ou real, 2) uma fonte “indireta” que o modelo localiza acima do topo do CLC para explicar a lenta dispersão descendente de plumas flutuantes que permanecem próximas, mas abaixo,  $z_p$ , e 3) uma “fonte penetrada” que contém a porção de pluma material que penetrou na camada estável acima de  $z_p$ .



$$C_p\{x_r, y_r, z\} = \frac{Q(1-f_p)}{\sqrt{2\pi}\tilde{\sigma}_{zp}} F_y \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[ \exp\left(-\frac{(z-h_{ep}+2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_{ep}+2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) \right] \quad [7]$$

onde  $z_{ieff}$  é a altura da superfície refletora superior em uma camada estável e  $z$  é  $z_r$  para o estado de pluma horizontal ou  $z_p$  para o estado de seguimento do terreno. A altura da pluma penetrada,  $h_{ep}$ , é tomada como a altura do centroide da pluma acima da camada de mistura.

Para condições estáveis, a expressão de concentração no AERMOD tem a forma gaussiana e é descrita da seguinte forma:

$$C_s\{x_r, y_r, z\} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\tilde{\sigma}_{zs}} \cdot F_y \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[ \exp\left(-\frac{(z-h_{es}-2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_{es}+2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) \right] \quad [8]$$

onde  $z_{ieff}$  é a altura efetiva da camada de mistura mecânica,  $\sigma_{zs}$  é a dispersão vertical total no CLE e  $h_{es}$  é a altura da pluma (ou seja, altura da pilha mais o aumento da pluma).

Para mais informações e um desenvolvimento matemático mais detalhado, por favor, consultar nas referências AERMOD b (2019).

## 1.2 AERSURFACE, dificuldades para seu uso.

A ferramenta AERSURFACE foi desenvolvida para auxiliar os usuários na obtenção de valores característicos de superfície realistas e reproduzíveis para albedo, razão de Bowen e comprimento de rugosidade da superfície, para entrada no AERMET. A ferramenta usa dados do National Land Cover Database (NLCD) do United States Geological Survey (USGS) (USGS, 2021) e tabelas de consulta de valores de características de superfície que variam de acordo com o tipo de cobertura do solo e estação do ano.

### 1.2.1 Caraterísticas de superfície.

Ao aplicar o processador meteorológico AERMET (AERMET, 2019) para processar dados meteorológicos para o modelo AERMOD (AERMOD a, 2019), o usuário deve determinar os valores apropriados para as três características de superfície obtidas pelo AERSURFACE (AERSURFACE, 2020): comprimento de rugosidade da superfície, albedo ao meio-dia e razão de Bowen diurna.

O comprimento da rugosidade da superfície está relacionado à altura dos obstáculos ao fluxo do vento e é, em princípio, a altura na qual a velocidade média do vento horizontal é zero com base em um perfil logarítmico. Esta característica influencia a tensão de cisalhamento da superfície e é um fator importante na determinação da magnitude da turbulência mecânica e da estabilidade da camada limite. O albedo é a fração da radiação solar incidente total refletida pela superfície de volta ao espaço sem absorção. A razão de Bowen, um indicador da umidade da superfície, é a proporção do fluxo de calor sensível para o fluxo de calor latente.

Estas três características de superfície são usadas para determinar os parâmetros da camada limite planetária para condições convectivas impulsionadas pelo fluxo de calor sensível da superfície.

### 1.2.2 Informações de entrada.

O AERSURFACE, para ser executado precisa, de no mínimo, um arquivo de cobertura do solo, mas podem ser incluídas as informações de: por cento de impermeabilidade e por cento do dossel; incluindo um único arquivo de cada tipo.

O dossel é apenas uma das camadas verticais da floresta tropical (entre 100 e 125 pés aproximadamente). Na floresta tropical a vida animal e vegetal nem sempre é encontrada sobre o chão da floresta, mas sim nas folhagens das árvores muito acima do chão, conhecido como dossel. O dossel, que pode ter mais do que 25 metros de altura, é resultado da sobreposição dos galhos e folhas das árvores. Os cientistas estimam que 70-90% da vida na floresta tropical é encontrada sobre as árvores, fazendo com que o dossel seja o mais rico habitat para a vida das plantas e animais. O ambiente do dossel é muito diferente do ambiente

próximo ao chão da floresta. Durante o dia, o dossel é mais seco e mais quente do que outras partes da floresta.

O por cento de impermeabilidade é um parâmetro que define a porcentagem (0-100) de cada célula da grade que é coberta por uma superfície impermeável, esta porcentagem é um indicativo de urbanização.

O arquivo de cobertura do solo, identifica a cobertura predominante do solo em uma resolução de células de grade de 30 x 30 metros. AERSURFACE atribui a cada categoria de cobertura da terra dentro de cada célula da grade de cobertura da terra de 30 x 30 metros, valores sazonais de albedo, razão de Bowen e rugosidade da superfície. Valores médios temporariamente representativos (por exemplo, anual, sazonal ou mensal) são calculados para a área de interesse a partir dos valores sazonais. (AERSURFACE, 2020)

Estes arquivos precisam estar no formato do *National Land Cover Database* (NLCD) do *United States Geological Survey* (USGS). Neste site são encontrados os dados para os EEUU, mas não encontramos as informações para o Brasil.

Os dados de uso e cobertura do solo para o Brasil podem ser encontrados no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, mas com um formato e tabela de dados com nomenclatura e classificação diferentes às usadas nos EEUU, daí a necessidade de criar um programa que conseguisse gerar os mesmos resultados que o AERSURFACE para serem usados para a execução do AERMET.

### 1.2.3 Informações de saída.

A saída deste pré-processador é um arquivo de dados com as informações de: albedo, razão de Bowen e comprimento de rugosidade para cada setor definido com diferente tipo de uso do solo pela frequência definida. Também podem ser gerados arquivos com os dados de: por cento de impermeabilidade e por cento do dossel, para a região de domínio definida. Estas informações vão ser usadas pelo AERMET no estágio 3. Podem ser colocados no final do arquivo todas as informações geradas pelo AERSURFACE porque o AERMET desconsidera qualquer informação que estiver depois de “\*\*\*”, mas só serão precisas as informações a partir da palavra-chave “FREQ\_SECT” e até o final do arquivo.

### 1.3 AERMINUTE.

Esta ferramenta foi criada como o objetivo de diminuir o número de calmarias e ventos ausentes nos dados de superfície, pois atualmente o modelo AERMOD não pode simular a dispersão de contaminantes em condições calmas ou sem vento.

Os dados meteorológicos de superfície coletados pelo National Weather Service (NWS) e pela Federal Aviation Administration (FAA) são frequentemente usados como fonte de dados meteorológicos de entrada para AERMOD (AERMOD a, 2019). Uma preocupação potencial relacionada ao uso de dados meteorológicos NWS para modelagem de dispersão é a frequentemente alta incidência de calmaria e condições variáveis de vento relatadas para as Estações Automatizadas de Observação de Superfície (ASOS) em uso na maioria das estações NWS desde meados da década de 1990.

Na codificação METAR usada para relatar observações de superfície começando em julho de 1996, um vento calmo é definido como uma velocidade do vento menor que 3 nós e é atribuído um valor de 0 nós. O código METAR também introduziu a observação de vento variável que pode incluir velocidades de vento de até 6 nós, mas a direção do vento é relatada como ausente, se a direção do vento variar mais de 60 graus durante o período médio de 2 minutos para a observação. (AERMINUTE, 2015)

Para reduzir o número de calmas e ventos ausentes nos dados de superfície, os ventos de 1 minuto arquivados para as estações ASOS podem ser usados para calcular a velocidade média do vento por hora e as direções, que são usadas para complementar o arquivo padrão de ventos observados por hora processados no AERMET.

Também podem ser usados os dados ASOS de 5 minutos para complementar os dados de 1 minuto quando estiverem faltando. Os dados de 5 minutos consistem nas velocidades do vento de 2 minutos relatadas a cada 5 minutos.

#### 1.3.1 Informações de entrada.

O AERMINUTE precisa para ser executado, os arquivos de dados de 1 minuto e arquivos opcionais de 5 minutos. O arquivo de saída deste pré-processador, com os valores de velocidade do vento médios por hora é o arquivo que entra no processamento do estágio 2 do

AERMET. O nome do arquivo é definido pelo usuário usando a palavra-chave HOURFILE no arquivo de entrada de controle. Para horas que estão faltando ou não são consideradas válidas devido a um número insuficiente de observações não calmas, a velocidade e a direção do vento são ambas definidas como 999,0. As horas calmas são indicadas por uma velocidade do vento de 0,0 e direção do vento de 0,0.

### 1.3.2 Informações de saída.

A saída deste pré-processador é um arquivo de dados com valores médios de velocidade e direção do vento por horas que pode ser introduzido no estágio 3 do AERMET para garantir que a modelagem de dispersão dos contaminantes seja feita com maior precisão, já que diminui a quantidade de reportes com velocidades do vento muito fracas ou nulas.

## **1.4 AERMET**

O AERMET é um pré-processador meteorológico de propósito geral para organizar os dados meteorológicos disponíveis em um formato adequado para ser usado pelo modelo AERMOD. (AERMET, 2019)

### 1.4.1 Estágios do AERMET.

Existem três estágios para processar os dados:

- O primeiro estágio extrai dados meteorológicos de arquivos de dados e processa os dados por meio de várias verificações de avaliação de qualidade. Aqui o modelo precisa dos dados meteorológicos de superfície (pode usar também dados de ar superior). No Brasil, os dados meteorológicos são armazenados em um formato diferente aos dados dos EEUU, pelo que os dados de superfície são introduzidos ao AERMET usando a sessão ONSITE, onde podemos definir quais são as informações e

o formato que o modelo vai encontrar no arquivo. Este arquivo pode ser no formato CSV.

- O segundo estágio mescla todos os dados disponíveis para períodos de 24 horas (NWS / FAA e dados específicos do local) e armazena esses dados juntos em um único arquivo. Aqui será preciso o arquivo de saída do primeiro estágio. O nome desse arquivo é definido no ONSITE - QAOUT com extensão “\*.OQA”. No caso de o usuário contar com os dados de velocidade e direção do vento para cada 1 minuto, saída do AERMINUTE, este arquivo também será inserido nesta parte do processo com a palavra-chave ASOS1MIN. Vale sinalizar que este arquivo não é imprescindível para a execução do modelo, mas ajuda a diminuir os valores de calmaria onde o modelo não poderia calcular.
- O terceiro estágio lê os dados meteorológicos combinados e estima os parâmetros da camada limite necessários para ser usados pelo AERMOD. Neste estágio será preciso o arquivo de saída do segundo estágio e a informação das características de superfície obtidas como saída do AERSURFACE (comprimento de rugosidade da superfície, albedo e razão de Bowen).

#### 1.4.2 Informações de saída.

O AERMET gera dois arquivos de saída meteorológica para entrada no AERMOD: um arquivo de estimativas de parâmetro de camada limite por hora (\*.PFL) e um arquivo de observações de vários níveis da velocidade e direção do vento, temperatura e desvio padrão dos componentes flutuantes do vento (\*.SFC).

### **1.5 BPIPPRM.**

Os modelos *Plume Rise Model Enhancements* (PRIME), como o BPIPPRM, foram projetados para incorporar as duas características fundamentais associadas ao fluxo descendente das edificações: coeficientes de dispersão de pluma aprimorados devido à esteira turbulenta e aumento de pluma reduzido causado por uma combinação de linhas de fluxo

descendentes à sotavento do edifício e o aumento do arrastamento na esteira. (BPIPFRM, 1995)

#### 1.5.1 Informações de entrada.

Este pré-processador não precisa de arquivo externo, dentro do arquivo com os dados de entrada e configuração, são introduzidas as localizações dos vértices dos diferentes prédios ou obstáculos que estejam perto da fonte de emissão que está sendo simulada. Nos casos que o obstáculo seja de forma circular, serão definidos 36 vértices equitativamente espaçados a cada 10 graus para descrevê-lo.

#### 1.5.2 Informações de saída.

As informações que o AERMOD vai precisar estão no final do arquivo de saída, pelo que será preciso apagar todas as informações referentes à execução no início do arquivo. No caso de não serem usados estes dados, os resultados não seriam uma representação real do comportamento dos contaminantes, pois os obstáculos no caminho deformam a trajetória e o comportamento do vento na região que está sendo modelada.

### **1.6 AERMAP, dificuldades para seu uso.**

AERMAP produz elevações de base de terreno para cada receptor e fonte e um valor de escala de altura de colina para cada receptor. O AERMAP produz os resultados da elevação em um formato que pode ser inserido diretamente no arquivo de controle do AERMOD.

### 1.6.1 Passos para o cálculo da escala de altura de colina (hill).

Para aplicações que envolvem terrenos elevados, o modelo AERMOD requer de uma escala de altura de colina que é usada para calcular a altura crítica da linha de fluxo para cada receptor. O objetivo principal desde pré-processador é determinar a escala de altura do morro para cada receptor. Este cálculo é feito baseado no seguinte procedimento: (AERMAP, 2018)

1. Leia o registro de cabeçalho de cada arquivo DEM nomeado no fluxo de execução (entrada) e retenha o valor de “maior elevação” encontrado em cada registro.
2. Determine e armazene a altura de elevação para cada receptor (e fonte).
3. Para cada receptor, use a altura de elevação do receptor como a escala inicial de controle da altura do morro.
4. Pesquise a altura da colina de controle no arquivo DEM no qual o receptor está localizado. Isso é feito calculando a inclinação entre o receptor e cada nó com base na respectiva distância e diferença de elevação. Se a inclinação for de 10% ou maior, a elevação do nó DEM é comparada com a escala de controle da altura do morro. Se mais alto, a escala de controle de altura do monte é substituída pelo valor de elevação do nó como a nova escala de controle de altura do monte. Todos os nós no arquivo DEM que estão no DOMAIN são pesquisados.
5. Usando o respectivo valor de elevação mais alto de cada arquivo DEM restante, calcule a inclinação entre o receptor e o ponto mais próximo em cada um dos arquivos DEM restantes. Use a respectiva elevação mais alta e a elevação do receptor para calcular uma inclinação inicial. Se a inclinação inicial for maior que 10% para um arquivo DEM específico, use as etapas do procedimento 4 para pesquisar uma altura de colina de controle neste arquivo DEM. Se um valor mais alto for encontrado, atualize a altura da colina de controle.
6. Repita o Procedimento 5 até que todos os arquivos DEM aplicáveis tenham sido pesquisados para uma escala de controle de altura de colina para cada receptor.

### 1.6.2 Informações de entrada.

Para executar o AERMAP existem dois tipos básicos de dados de entrada. Primeiro, é preciso de um arquivo de controle, que direciona as ações do modelo e define os locais do receptor e da fonte. Em segundo lugar, são necessários arquivos de computador padronizados com dados de elevação do terreno. O formato para o qual o AERMAP está preparado é para o oferecido pelo governo dos EEUU no *United States Geological Survey (USGS) The National Map* (USGS, 2021)

O principal problema na hora de ser executado com os dados disponíveis no Brasil é que eles não estão no mesmo formato que é requerido pelo AERMAP, daí a necessidade de criar um programa que conseguisse gerar os mesmos resultados que o AERMAP para serem usados para a execução do AERMOD.

### 1.6.3 Informações de saída.

Os arquivos de saída que precisam ser usados pelo AERMOD são os definidos no caminho de saída (Output Pathway) com as palavras-chave “RECEPTOR” e “SOURCLOC”. No arquivo que contém os dados dos receptores são descritos os valores de elevação de terreno e um parâmetro de colina (HILL) para cada ponto definido com antecedência na malha de receptores. No arquivo que contém os dados da fonte, se encontram os dados de localização e elevação nesse ponto.

## **1.7 AERMOD.**

O AERMOD é o encarregado de calcular o comportamento da dispersão dos contaminantes usando as informações já pré-processadas pelos programas anteriores.

### 1.7.1 Informações de entrada.

O principal arquivo que precisa para ser executado é o arquivo com as configurações, definido com o nome “aermod.inp”. Este arquivo está dividido em várias seções: configurações, fonte, receptores, meteorologia e saída.

- Na seção de configurações são definidos: título, métodos de cálculo, tipo de contaminante que será modelado, período a considerar entre outras informações.
- Na seção da fonte são definidos: localização e altitude da base da fonte, unidade de medida a usar nas altitudes, dados de emissão da fonte, e os resultados da execução do BPIPPRM.
- Na seção dos receptores são definidos: a mesma grade de receptores usada para a execução do AERMAP, e logo depois são colocados os valores de altitude e escala de altura de colina obtidos com a execução desse modelo.
- Na seção de meteorologia são colocados os nomes dos arquivos gerados pela execução do AERMET e informações das estações de onde estão sendo coletados os dados.
- Na seção de saída são definidas as configurações dos arquivos de saída do modelo, assim como o nome dos arquivos que serão obtidos com a execução.

### 1.7.2 Informações de saída.

Um dos arquivos de saída depois da execução do modelo é o “\*.out” (como o mesmo nome do arquivo de configurações “\*.inp”), o qual tem um resumo das informações descritas no arquivo de controle, as mensagens de erros e advertências e as tabelas de resultados. Outro dos arquivos de saída e o de maior importância para poder mostrar os resultados é o “\*.PLT”, com nome definido usando a palavra-chave PLOTFILE na seção de saída. Este é um arquivo de coordenadas (X, Y) que pode ser facilmente importado em muitos pacotes de plotagem de gráficos para gerar contornos gráficos dos valores de concentração.

## 1.8 AERPLOT.

O AERPLOT é um post-processador que tem como principal objetivo modificar o arquivo de saída do AERMOD para um formato que possa ser visualizado mais facilmente por qualquer Sistema de Informação Geográfico. Ele transforma o arquivo no formato PLT em um arquivo KMZ.

### 1.8.1 Informações de entrada.

Para ser executado precisa de um arquivo de configuração próprio do modelo e dos arquivos de saída e configuração do AERMOD, sendo este último opcional porque só será necessário se quiser ser colocada a localização da fonte no arquivo final.

No arquivo de configuração do AERPLOT serão definidos: a versão do AERMOD que foi usada para a geração do arquivo PLT, a altura na que foi baseada a execução do AERMOD, as coordenadas base UTM e a zona para converter as localizações a coordenadas geográficas, as configurações das linhas e pontos que serão visualizadas, entre outras informações de customização da saída. Também pode ser definida a visualização automática dos resultados no Google Earth depois de ser processado o arquivo de dados com as informações de dispersão de contaminantes.

A versão atual do AERPLOT assume que o arquivo de saída do AERMOD “PLT”, inclui todas as informações de cabeçalho incluídas por padrão no modelo. Sem o cabeçalho, AERPLOT não será capaz de ler o arquivo “PLT”.

### 1.8.2 Informações de saída.

Depois deste programa ser executado é obtido um arquivo no formato KMZ, que pode ser visualizado por qualquer programa de leitura de mapas ou SIGs, inclusive o Google Earth.

## **2 DATASURFACE E DATAMAP, SUBSTITUTOS DO AERSURFACE E O AERMAP.**

Alguns dos pré-processadores do AERMOD não podem ser executados com os dados públicos brasileiros, pelo que nos propusemos desenvolver as ferramentas necessárias para formatar os dados que precisa o modelo. Para isto foram definidos os nomes DATASURFACE, com substituto do AERSURFACE e o DATAMAP como substituto do AERMAP. Para desenvolver ambos os programas, foi usada a linguagem de programação C++, no Sistema Operacional Windows.

### **2.1 DATASURFACE.**

Para executar o DATASURFACE não é preciso de arquivo externo nenhum, só o arquivo com as configurações do programa, que pode ser identificado pelo nome, que precisa ser “datasurface.inp”. Ele se auxilia de tabelas com valores médios de comprimento de rugosidade, albedo e razão de Bowen para cada tipo de uso do solo definido no Brasil e para cada estação do ano.

#### **2.1.1 Cobertura e uso do solo.**

No Brasil, segundo (IBGE, 2021), a classificação de cobertura do solo é descrita como mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes de cobertura e uso da terra.

Id no mapa	Classe	Descrição
1	Área artificial	Áreas onde predominam superfícies antrópicas não-agrícolas. São aquelas estruturadas por edificações e sistema viário, nas quais estão incluídas as metrópoles, cidades, vilas, as aldeias indígenas e comunidades quilombolas, áreas ocupadas por complexos industriais e comerciais e edificações que podem, em alguns casos, estar situadas em áreas periurbanas. Também pertencem a essa classe as áreas onde ocorrem a exploração ou extração de substâncias minerais, por meio de lavra ou garimpo.
2	Área Agrícola	Área caracterizada por lavouras temporárias, semiperenes e permanentes, irrigadas ou não, sendo a terra utilizada para a produção de alimentos, fibras, combustíveis e outras matérias primas. Segue os parâmetros adotados nas pesquisas agrícolas do IBGE e inclui todas as áreas cultivadas, inclusive as que estão em pousio ou localizadas em terrenos alagáveis. Pode ser representada por zonas agrícolas heterogêneas ou extensas áreas de plantações. Inclui os tanques de aquicultura.
3	Pastagem com Manejo	Áreas destinadas ao pastoreio do gado e outros animais, com vegetação herbácea cultivada (braquiária, azevém, etc) ou vegetação campestre (natural), ambas apresentando interferências antrópicas de alta intensidade. Estas interferências podem incluir o plantio; a limpeza da terra (destocamento e despedramento); eliminação de ervas daninhas de forma mecânica ou química (aplicação de herbicidas); gradagem; calagem; adubação; entre outras que descaracterizem a cobertura natural.
4	Mosaico de Ocupações em Área Florestal	Área caracterizada por ocupação mista de área agrícola, pastagem e/ou silvicultura associada ou não a remanescentes florestais, na qual não é possível uma individualização de seus componentes. Inclui também áreas com perturbações naturais e antrópicas, mecânicas ou não mecânicas, que dificultem a caracterização da área.
5	Silvicultura	Área caracterizada por plantios florestais de espécies exóticas ou nativas como monoculturas. Segue os parâmetros adotados nas pesquisas de extração vegetal e silvicultura do IBGE.
6	Vegetação Florestal	Área ocupada por florestas. Consideram-se florestais as formações arbóreas com porte superior a 5 metros de altura, incluindo-se aí as áreas de Floresta Ombrófila Densa, de Floresta Ombrófila Aberta, de Floresta

		Estacional, além da Floresta Ombrófila Mista. Inclui outras feições em razão de seu porte superior a 5 metros de altura, como a Savana Florestada, Campinarana Florestada, Savana-Estépica Florestada, os Manguezais e os Buritizais, conforme o Manual Técnico de Uso da Terra.
9	Área úmida	Área caracterizada por vegetação natural herbácea ou arbustiva (cobertura de 10% ou mais), permanentemente ou periodicamente inundada por água doce ou salobra. Inclui os terrenos de charcos, pântanos, campos úmidos, estuários, entre outros. O período de inundação deve ser de no mínimo 2 meses por ano. Pode ocorrer vegetação arbustiva ou arbórea, desde que estas ocupem área inferior a 10% do total.
10	Vegetação Campestre	Área caracterizada por formações campestres. Entende-se como campestres as diferentes categorias de vegetação fisionomicamente bem diversas da florestal, ou seja, aquelas que se caracterizam por um estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre um estrato gramíneo-lenhoso. Incluem-se nessa categoria as Savanas, Estepes, Savanas Estépicas, Formações Pioneiras e Refúgios Ecológicos. Encontram-se disseminadas por diferentes regiões fitogeográficas, compreendendo diferentes tipologias primárias: estepes planaltinas, campos rupestres das serras costeiras e campos hidro arenosos litorâneos (restinga). Essas áreas podem estar sujeitas a pastoreio e outras interferências antrópicas de baixa intensidade como as áreas de pastagens não manejadas do Rio Grande do Sul e do Pantanal.
11	Mosaico de Ocupações em Área Campestre	Área caracterizada por ocupação mista de área agrícola, pastagem e/ou silvicultura associada ou não a remanescentes campestres, na qual não é possível uma individualização de seus componentes. Inclui também áreas com perturbações naturais e antrópicas, mecânicas ou não mecânicas, que dificultem a caracterização da área.
12	Corpo d'Água Continental	Inclui todas as águas interiores, como rios, riachos, canais e outros corpos d'água lineares. Também engloba corpos d'água naturalmente fechados (lagos naturais) e reservatórios artificiais (represamentos artificiais de água construídos para irrigação, controle de enchentes, fornecimento de água e geração de energia elétrica). Não inclui os tanques de aquicultura.
13	Corpo d'Água Costeiro	Inclui as águas inseridas nas 12 milhas náuticas, conforme Lei nº 8.617, de 4 de janeiro de 1993.

14	Área Descoberta	Esta categoria engloba locais sem vegetação, como os afloramentos rochosos, penhascos, recifes e terrenos com processos de erosão ativos. Também inclui as praias e dunas, litorâneas e interiores, e acúmulo de cascalho ao longo dos rios.
----	-----------------	--

Fonte: IBGE, 2021.

Com o objetivo de poder gerar as tabelas com os dados de albedo, razão de Bowen e comprimento de rugosidade da superfície, foi necessário definir quais das classes de cobertura da terra usadas no Brasil se assemelhavam às usadas nos EEUU (estas últimas definidas no “Appendix A: National Land Cover Database Definitions” da Guia de Usuário do AERSURFACE (AERSURFACE, 2020). Desta forma foram achadas semelhanças entre as duas classificações de uso do solo, e foi criada a Tabela 3, onde se mostram as classes de cobertura da terra usadas no Brasil assemelhadas às usadas nos EEUU.

Tabela 3 - Classes de cobertura da terra usadas no Brasil assemelhadas às usadas nos EEUU.

Id no mapa	Classe (Brasil)	Id no mapa	Classe (EEUU)
1	Área Artificial	23	Desenvolvido: Intensidade média
2	Área Agrícola	82	Cultivos
3	Pastagem com Manejo	81	Pastagem/Feno
4	Mosaico de Ocupações em Área Florestal	43	Floresta mista
5	Silvicultura	41	Floresta decidual
6	Vegetação Florestal	42	Floresta sempre verde
9	Área úmida	90	Pantanal arborizado
10	Vegetação Campestre	72	Junco / herbáceo
11	Mosaico de Ocupações em Área Campestre	52	Arbusto / matagal
12	Corpo d'Água Continental	11	Águas abertas
13	Corpo d'Água Costeiro	32	Costa não consolidada
14	Área Descoberta	31	Terra estéril (rocha/areia/argila) (região não árida)

Fonte: O autor, 2022 e AERSURFACE, 2020.

### 2.1.2 Caraterísticas de superfície.

Usando a Tabela 3, e baseadas nas tabelas usadas pelo AERSURFACE, foi conformada uma tabela para cada uma das características de superfície: Albedo, Razão de

Bowen e Comprimento de rugosidade da superfície para cada uma das classes usadas no Brasil para cada estação do ano. (Tabelas 4, 5 e 6)

Tabela 4 - Comprimento de rugosidade da superfície para cada uma das classes de cobertura do uso do solo usadas no Brasil para cada estação do ano e situações com cobertura de neve constante.

Id Brasil	Classe Brasil	Z_0 (Comprim. de rug. da superf.)				
		Inverno	Neve	Primav.	Verão	Outono
1	Área Artificial	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3
2	Área Agrícola	0,3	0,014	0,04	0,2	0,2
3	Pastagem com Manejo	0,02	0,01	0,03	0,15	0,15
4	Mosaico de Ocupações em Área Florestal	0,9	0,8	1,1	1,3	1,3
5	Silvicultura	0,6	0,5	1	1,3	1,3
6	Vegetação Florestal	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
9	Área úmida	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5
10	Vegetação Campestre	0,01	0,005	0,05	0,1	0,1
11	Mosaico de Ocupações em Área Campestre	0,3	0,15	0,3	0,3	0,3
12	Corpo d'Água Continental	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
13	Corpo d'Água Costeiro	0,05	0,01	0,05	0,05	0,05
14	Área Descoberta	0,05	0,01	0,05	0,05	0,05

Fonte: O autor, 2022 e AERSURFACE, 2020.

Tabela 5 - Albedo para cada uma das classes de cobertura do uso do solo usadas no Brasil para cada estação do ano e situações com cobertura de neve constante.

Id Brasil	Classe Brasil	Al (Albedo)				
		Inverno	Neve	Primav.	Verão	Outono
1	Área Artificial	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
2	Área Agrícola	0,18	0,6	0,14	0,2	0,2
3	Pastagem com Manejo	0,18	0,6	0,14	0,2	0,2
4	Mosaico de Ocupações em Área Florestal	0,14	0,42	0,14	0,14	0,14
5	Silvicultura	0,17	0,5	0,16	0,16	0,16
6	Vegetação Florestal	0,12	0,35	0,12	0,12	0,12
9	Área úmida	0,14	0,3	0,14	0,14	0,14
10	Vegetação Campestre	0,2	0,6	0,18	0,18	0,18
11	Mosaico de Ocupações em Área Campestre	0,18	0,5	0,18	0,18	0,18
12	Corpo d'Água Continental	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
13	Corpo d'Água Costeiro	0,14	0,3	0,14	0,14	0,14
14	Área Descoberta	0,2	0,6	0,2	0,2	0,2

Fonte: O autor, 2022 e AERSURFACE, 2020.

Tabela 6 - Razão de Bowen para cada uma das classes de cobertura do uso do solo usadas no Brasil para cada estação do ano e situações com cobertura de neve constante.

Id Brasil	Classe Brasil	Bw (Razão de Bowen)				
		Inverno	Neve	Primav.	Verão	Outono
1	Área Artificial	1,2	0,5	1,1	1,1	1,2
2	Área Agrícola	0,7	0,5	0,3	0,5	0,7
3	Pastagem com Manejo	0,7	0,5	0,3	0,5	0,7
4	Mosaico de Ocupações em Área Florestal	0,9	0,5	0,7	0,3	0,9
5	Silvicultura	1	0,5	0,7	0,3	1
6	Vegetação Florestal	0,8	0,7	0,3	0,3	0,8
9	Área úmida	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2
10	Vegetação Campestre	1	0,5	0,4	0,8	1
11	Mosaico de Ocupações em Área Campestre	1,5	0,5	1	1	1,5
12	Corpo d'Água Continental	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
13	Corpo d'Água Costeiro	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2
14	Área Descoberta	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5

Fonte: O autor, 2022.

O Datasurface está configurado para usar os dados presentes nas Tabelas 4, 5 e 6, mas no caso que o pesquisador possua valores más específicos para a região de estudo, provenientes de alguma outra pesquisa feito com antecedência, estes valores podem ser modificados no arquivo de texto de nome “tabelas\_aermet.txt”. Modificando estes valores podem ser obtidos resultados aprimorados e específicos para a região que está sendo estudada com a execução do modelo.

### 2.1.3 Informações de entrada.

No arquivo de configurações, que será usado como arquivo de entrada no DATASURFACE, serão definidas todas as informações necessárias para a execução do modelo.

As especificações para preencher este arquivo de dados de entrada se mostram a seguir nas Tabelas 7, 8 e 9.

Na Tabela 7 são mostradas as informações que devem ser introduzidas na primeira linha do arquivo, onde serão indicadas a frequência e quantidade de setores que serão descritos com diferentes tipos de uso do solo ao redor da fonte.

Tabela 7 – Informações na primeira linha do arquivo de entrada do DATASURFACE.

Palavra-chave	Descrição
'FREQ_SECT'	Indica que a frequência e quantidade de setores serão indicados a seguir.
'FREQ'	Frequência mensal (MONTHLY)
	Frequência sazonal (SEASONAL)
	Frequência anual (ANNUAL)
'SECT'	Indica a quantidade de setores que serão descritos a seguir. Aqui deve ser colocado um número inteiro entre 1 e 12. Se for colocado um número fora desta faixa, ocorrerá um erro e será interrompida a execução do modelo.

Fonte: O autor, 2022.

Na Tabela 8 serão descritos os dados que deverão ser introduzidas no segundo bloco de informações no arquivo de entrada do DATASURFACE. Serão descritas as características para cada setor (quantidade definida em 'SECT'). Serão aceitas uma quantidade máxima de 12 setores e cada setor deverá ter no mínimo 30 graus de amplitude. Os setores deverão cobrir os 360 graus do círculo e serão descritos em sentido horário.

Tabela 8 – Dados no segundo bloco de informações do arquivo de entrada do DATASURFACE.

Palavra-chave	Descrição
'SECTOR'	Indica que serão descritas a seguir as características dos setores.
'ID_SECT'	Serão colocados em sequência os indicadores dos setores que estão sendo descritos.
'START_SECT'	Ângulo no que começa o setor que está sendo descrito. Deve ser um número real entre 0 e 360 graus. O ângulo de início do setor será incluído no setor.
'END_SECT'	Ângulo no que termina o setor que está sendo descrito. Deve ser um número real entre 0 e 360 graus. O ângulo final do setor não será incluído no setor e deve ser igual ao ângulo de início do próximo setor.
'SFC_SECT'	Indicador da classe de tipo de cobertura do solo predominante no setor que está sendo descrito. Deve ser um número inteiro entre 1 e 14, exceto 7 e 8, como se mostra na Tabela 2.

Fonte: O autor, 2022.

Na Tabela 9 serão descritas as informações a ser introduzidas na penúltima linha do arquivo de entrada do DATASURFACE, onde será definida a cobertura, ou não, de neve no solo durante algum período específico.

Tabela 9 – Informações na penúltima linha do arquivo de entrada do DATASURFACE.

Palavra-chave	Descrição
'NOSNOW'	Esta palavra-chave será usada se NÃO tiver cobertura contínua de neve no solo durante um mês.
'SNOW'	Esta palavra-chave será usada se tiver cobertura contínua de neve no solo durante um mês ou mais.
'SNOW_NUM'	Se for indicado 'SNOW', a seguir deve ser indicado a quantidade de meses com cobertura de neve no solo.
'SNOW_MONTH'	Nesta secção serão definidos os meses com cobertura de neve contínua. No caso de ser mais de um, eles devem ser separados por espaço. Deveriam ser números inteiros entre 1 e 12 e a quantidade deve coincidir com 'SNOW_NUM'. Se forem introduzidos uma quantidade maior que a definida com 'SNOW_NUM', os últimos não serão considerados. Se forem definidos menos do que o descrito com 'SNOW_NUM', será gerada uma mensagem de erro e será interrompida a execução do modelo.

Fonte: O autor, 2022.

Por último será definido o nome do arquivo de saída, onde serão exportados os dados das características da superfície: Albedo, Razão de Bowen e Comprimento de rugosidade da superfície. O nome deve ser inserido sem espaços e sem caracteres especiais para facilitar a sua interpretação.

#### 2.1.4 Informações de saída.

Para gerar finalmente o arquivo de texto com os dados necessários para o AERMET, se procuram os valores de comprimento de rugosidade, albedo e razão de Bowen para cada sector dependendo das especificações de cada um deles.

Estas informações serão inseridas no estágio 3 do AERMET, no final do arquivo de configurações.

## 2.2 DATAMAP.

Para executar o DATAMAP são precisos um arquivo de texto de configurações do modelo e um arquivo no formato GeoTiff com as informações de elevação do terreno. Os

dados de elevação do terreno podem ser encontrados no site “TOPODATA, Banco de dados Geomorfométricos de Brasil” (TOPODATA, 2021) ou, por estados, no site da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (WEBER, HASENACK e FERREIRA, 2022). Em ambas as fontes podem ser encontrados no formato GeoTiff.

Para o desenvolvimento do nosso modelo foi usada a biblioteca “Libgeotiff” (OSGEO, 2021) para a extração dos dados de altitude na imagem no formato GeoTiff.

### 2.2.1 Informações de entrada.

As especificações para preencher este arquivo de dados de entrada se mostram a seguir nas Tabelas da 10 a 16.

Na Tabela 10 serão descritos os dados a ser introduzidos no primeiro bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP, onde serão colocadas as informações referentes ao arquivo onde estarão os dados de altitude.

Tabela 10 – Dados no primeiro bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP.

Palavra-chave	Descrição
‘DATATYPE’	Indica que será definido o tipo de arquivo que terá os dados de altitude.
‘TIF’	É o tipo de arquivo admitido pelo DATAMAP.
‘DATAFILE’	Indica que será definido o nome do arquivo que contém os dados.
‘DATANAME’	logo depois da palavra-chave anterior, deve ser introduzido o nome do arquivo em questão.

Fonte: O autor, 2022.

Na Tabela 11 serão descritos os dados a ser introduzidos no segundo bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP, onde o usuário precisa relacionar o sistema de coordenadas especificado pelo ele para as localizações da fonte e do receptor ao sistema de coordenadas UTM.

Tabela 11 – Dados no segundo bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP.

Palavra-chave	Descrição
'ANCHORXY'	Indica que será relacionado o sistema de coordenadas especificado pelo usuário ao sistema de coordenadas UTM.
'Xauser' e 'Yauser'	São as coordenadas de qualquer localização geográfica, como a origem (0,0), no sistema de coordenadas do usuário.
'Xautm', 'Yautm' e 'Zautm'	São as coordenadas UTM Leste, Norte e Zona para o mesmo ponto
'NADA'	Especifica o datum horizontal que foi usado para estabelecer as coordenadas UTM do ponto de ancoragem. Os valores de NADA variam de 0 a 6, e na nossa versão deve sempre ser colocado '0', pois não serão feitas transformações ao sistema de coordenadas com esta informação.

Fonte: O autor, 2022.

Na Tabela 12 serão descritos os dados a ser introduzidos no terceiro bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP, onde serão definidas as características e localização da fonte.

Tabela 12 – Dados no terceiro bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP.

Palavra-chave	Descrição
'LOCATION'	Indica que vai ser definido o local da fonte com o propósito de obter os valores de elevação.
'Srcid'	ID de origem alfanumérico de até oito caracteres que serve como identificador da fonte.
'Srctyp'	Indica o tipo de fonte, que pode ser POINT, VOLUME, AREA, AREAPOLY ou AREACIRC
'long' e 'lat'	são as coordenadas longitude e latitude da localização da fonte.

Fonte: O autor, 2022.

Nas Tabelas 13, 14 e 15 serão descritos os dados a ser introduzidos no quarto bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP, onde serão indicados os receptores. Para isto pode ser usada uma grade cartesiana (Tabela 13, Figura 6), polar (Tabela 14, Figura 7), ou de pontos cartesianos discretos inseridos manualmente pelo usuário (Tabela 15, Figura 8).

Tabela 13 – Dados no quarto bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP.  
Grade cartesiana.

Palavra-chave	Descrição
'GRIDCART'	Indica o início do bloco da grade cartesiana.
'Netid'	ID de origem alfanumérico de até oito caracteres que serve como identificador da grade.
'STA'	Indica o início das especificações da grade.
'XYINC'	Indica que inicia a grade.
'Xinit', 'Xnum' e 'Xdelta'	Localização inicial da grade do eixo x em metros, Número de receptores do eixo x, Espaçamento em metros entre os receptores do eixo x.
'Yinit', 'Ynum', 'Ydelta'	Localização inicial da grade do eixo y em metros, Número de receptores do eixo y, Espaçamento em metros entre os receptores do eixo y.
'GRIDCART Netid END'	Indica a finalização das informações da grade cartesiana.

Fonte: O autor, 2022.

Figura 6 – Formato da definição da grade cartesiana.

```

GRIDCART Netid STA
        XYINC Xinit Xnum Xdelta Yinit Ynum Ydelta
GRIDCART Netid END

```

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 14 – Dados no quarto bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP.  
Grade polar.

Palavra-chave	Descrição
'GRIDPOLR'	Indica o início do bloco da grade polar.
'Netid'	ID de origem alfanumérico de até oito caracteres que serve como identificador da grade.
'STA'	Indica o início das especificações da grade.
'ORIG'	Identifica a origem da rede polar. Pode ser usado um par coordenado ou o identificador da fonte ('Srcid') para definir a localização da fonte como o centro da grade polar.
'Xinit' e 'Yinit'	Par coordenado definindo a localização da origem da grade polar.
'DIST'	Indica que serão definidas as distancias da origem da rede polar.
'Ring1', 'Ring2', ..., 'Ringn'	Distancias a cada um dos anéis dos pontos em coordenadas polares.
'DDIR' ou 'GDIR'	Define as direções da rede polar. 'DDIR' será usada no caso de serem especificadas as direções discretas, e 'GDIR' será usada no caso em que as direções serão geradas automaticamente.
'Dir1', 'Dir2', ..., 'Dirn'	Direções radiais em graus de 1 a 360. (No caso de ser usado 'DDIR')
'Dirnum'	número de direções usadas para definir a grade polar. (No caso de ser usado 'GDIR')
'Dirini'	primeira direção da grade polar. (No caso de ser usado 'GDIR')

'Dirinc'	o incremento usado para definir as direções da grade polar. (No caso de ser usado 'GDIR')
'GRIDPOLR Netid END'	Indica a finalização das informações da grade polar.

Fonte: O autor, 2022.

Figura 7 – Formato da definição da grade polar.

<pre> GRIDPOLR Netid STA   ORIG Xinit Yinit   DIST Ring1 Ring2 ... Ringn   DDIR Dir1 Dir2 ... Dirn GRIDPOLR Netid END </pre>	<pre> GRIDPOLR Netid STA   ORIG Srcid   DIST Ring1 Ring2 ... Ringn   GDIR Dirnum Dirini Dirinc GRIDPOLR Netid END </pre>
--	--

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 15 – Dados no quarto bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP. Grade discreta de pontos cartesianos.

Palavra-chave	Descrição
'DISCCART'	Indica que será inserido um ponto da grade de pontos discretos.
'Xcoord' e 'Ycoord'	Coordenadas do ponto que deseja ser definido como parte da grade discreta de pontos cartesianos.

Fonte: O autor, 2022.

Figura 8 – Formato da definição da grade discreta de pontos cartesianos.

DISCCART Xcoord Ycoord
------------------------

Fonte: O autor, 2022.

Na Tabela 16 serão descritos os dados a ser introduzidos no último bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP, onde serão definidos os nomes dos arquivos de saída, onde são colocados os dados de altitude e a escala de altura de colina para a fonte e os receptores.

Tabela 16 – Dados no último bloco de informações do arquivo de entrada do DATAMAP.

Palavra-chave	Descrição
'RECEPTOR'	Indica que será definido o nome do arquivo de saída que terá os dados de altitude e parâmetro de colina para os receptores.
'file out rec'	Define o nome do arquivo de saída para os receptores.
'SOURCLOC'	Indica que será definido o nome do arquivo de saída que terá os dados de altitude da fonte.
'file out src'	Define o nome do arquivo de saída para a fonte.

Fonte: O autor, 2022.

### 2.2.2 Cálculo da escala de altura de colina (HILL).

Depois de lidos os dados de elevação para cada ponto receptor e fonte, se determinou o parâmetro de escala de altura de colina para cada receptor, considerando os passos indicados na Guia de Usuário do AERMAP (AERMAP, 2018). Para nossos cálculos, o domínio considerado foi o domínio dos receptores.

Para calcular o parâmetro de escala de altura de colina (HILL) seguimos os seguintes passos:

1. HILL inicial = Elevação no ponto do receptor
2. Para cada receptor:
  - 1) Para cada ponto do domínio:
    - I. Calcular a distância do receptor ao ponto do domínio
    - II. Calcular o  $DECLIVE = \frac{|Elevação\_no\_ponto - Elevação\_receptor|}{DISTÂNCIA} * 100$
    - III. Se  $DECLIVE \geq 10\%$ 
      - i. Se  $HILL < Elevação\_no\_ponto$   
 →  $HILL = Elevação\_no\_ponto$

### 2.2.3 Informações de saída.

Depois de ler da imagem e calcular todas as informações necessárias, foram gerados os arquivos de saída: um com a informação da fonte e o outro com as informações dos receptores.

## 2.3 Ferramentas auxiliares.

Durante o desenvolvimento das ferramentas para a substituição dos pré-processadores AERSURFACE e AERMAP, foram encontradas algumas dificuldades, pelo que foi necessário desenvolver algumas outras ferramentas para facilitar o trabalho do usuário.

### 2.3.1 Converter de coordenadas Geográficas a UTM e vice-versa.

No Brasil é mais comum usarmos coordenadas geográficas (longitude e latitude) para definir pontos nos mapas, mas o AERMOD precisa das coordenadas usando o sistema UTM, este sistema é baseado no plano cartesiano e define a posição dos objetos usando distâncias em metros, tendo como origem o ponto de encontro entre o Equador e o meridiano de Greenwich. Com o objetivo de facilitar a introdução das informações de localizações em coordenadas geográficas, foi incluído dentro do DATAMAP uma rotina para converter as coordenadas geográficas a UTM, e vice-versa. Para isto foram usadas as equações de *Coticchia-Surace* para os problemas direto e inverso. (ANAGUANO, 2018)

Também foi criada uma ferramenta independente para converter de coordenadas geográficas a UTM, com o objetivo de ser usada antes de introduzir as coordenadas no pré-processador BPIPPRM. Na hora de definir os pontos dos prédios para serem introduzidos neste pré-processador, pode ser que seja necessário definir uma grande quantidade de pontos, para os quais seria muito trabalhoso ter que converter manualmente das coordenadas geográficas para UTM, e desta forma podem ser convertidos uma grande quantidade de pontos em pouco tempo. Esta ferramenta usa o arquivo de entrada do BPIPPRM com os pontos em coordenadas geográficas e devolve o arquivo que pode ser inserido diretamente no BPIPPRM já com os pontos nas coordenadas UTM.

No Apêndice E pode ser encontrado o pseudocódigo usado para converter os pontos de coordenadas geográficas a UTM.

### 2.3.2 Formatar os dados meteorológicos para usar no AERMET.

Outro dos problemas encontrados durante o trabalho com os pré-processadores foi que os dados meteorológicos precisavam estar formatados de uma forma específica para poder serem interpretados pelo AERMET. Fazer esta formatação manualmente, quando se tem uma grande quantidade de dados meteorológicos pode ser cansativo e demandar muito tempo. Por esta razão foi desenvolvida uma ferramenta para formatar os dados meteorológicos provenientes de estações meteorológicas de superfície no Brasil.

Para executar este programa serão precisos: um arquivo com os dados meteorológicos nos formatos: txt, csv ou exe, e um arquivo de texto de configurações com algumas informações referentes aos dados meteorológicos e de nome “FORMATACAO\_MET.INP”. E será obtido um arquivo, preferivelmente no formato csv com os dados meteorológicos formatados e prontos para serem inseridos no AERMET.

No arquivo de configuração devem estar, nesta ordem, as seguintes informações:

- 1- Nome do arquivo com dados meteorológicos (Exemplo: DADOS\_METEOROLOGICOS.csv).
- 2- Quantidade de colunas (Exemplo: 15).
- 3- Quantidade de fileiras (Exemplo: 4174).
- 4- Quantas fileiras de cabeçalho (Exemplo: 0).
- 5- Um parâmetro bool que define se precisa ser estimado (1) ou não (0) o valor da altura da CLA.
- 6- Qual a coluna que contém as horas (Exemplo: 3).
- 7- Qual a coluna que contém a velocidade do vento (Exemplo: 8).
- 8- Qual a coluna que contém a radiação (Exemplo: 11).
- 9- Nome do arquivo de saída com os dados formatados (Exemplo: DADOS\_FORMATADOS.csv).
- 10- Formato dos números no arquivo de saída.

Um exemplo do formato da linha número 10 do arquivo de entrada poderia ser:

```
I I I I X F2 F2 F2 F2 F2 F2 F1 F1 F1 F1
```

As colunas com números inteiros devem ser identificadas com “I”, as colunas das quais devem ser desconsideradas as informações devem ser identificadas com “X”, e quando as colunas sejam de números reais, estas devem ser identificadas com a letra “F” seguida da quantidade de casas decimais que se desejam colocar.

Os passos para o desenvolvimento desta ferramenta foram:

- 1- Definição de variáveis.
- 2- Ler os dados do arquivo de configurações.
- 3- Abrir o arquivo com os dados meteorológicos.
- 4- Desconsiderar as fileiras de cabeçalho.
- 5- Ler os dados meteorológicos.
- 6- Estimar os valores da altura da Camada Limite Atmosférica, se for preciso.

- 7- Definir um vetor com a quantidade máxima de dígitos por coluna para ajudar na formatação dos dados.
- 8- Imprimir o arquivo de saída com os dados meteorológicos formatados.

### 2.3.3 Estimar os valores da altura da Camada Limite Atmosférica.

Os valores da altura da Camada Limite Atmosférica usualmente são obtidos como resultado de rádio sondagens na atmosfera superior, pelo que não é possível acessar a estes dados para qualquer região do Brasil, o que dificulta o uso do modelo. Mas, segundo CARBONELL et.al (2006), existe um método mais simplificado para estimar o valor desta variável que se baseia na estabilidade atmosférica como mostrado na Tabela 7, na qual são usadas a velocidade do vento e o horário do dia para estimar a estabilidade e a altura da CLA.

Tabela 17 - Critérios simplificados para estimar a altura da CLA baseado na velocidade do vento e o grau de radiação.

	<b>Velocidade do vento</b>	<b>Altura da CLA</b>
<b>Horas de alta radiação</b>	0-2	1600
	2-3	1200
	3-4	800
	>5	560
<b>Horas de pouca radiação</b>	0-2	200
	2-3	800
	3-4	560
	>5	560
<b>Noite</b>	0-2	200
	2-3	200
	3-4	320
	>5	560
<b>Nublado</b>		560

Fonte: CARBONELL et.al, 2006.

Usando estes critérios foi criada uma função dentro da ferramenta para a formatação dos dados meteorológicos que consegue estimar os valores da altura da CLA, no caso que os dados não estiverem disponíveis para a região de estudo. Vale ressaltar que esta estimativa não substitui os valores reais desta variável e sempre deve se dar prioridade a valores medidos ou estimados por outras metodologias que considerem as condições meteorológicas reais existentes na região de estudo, assim como o fluxo convectivo da atmosfera.

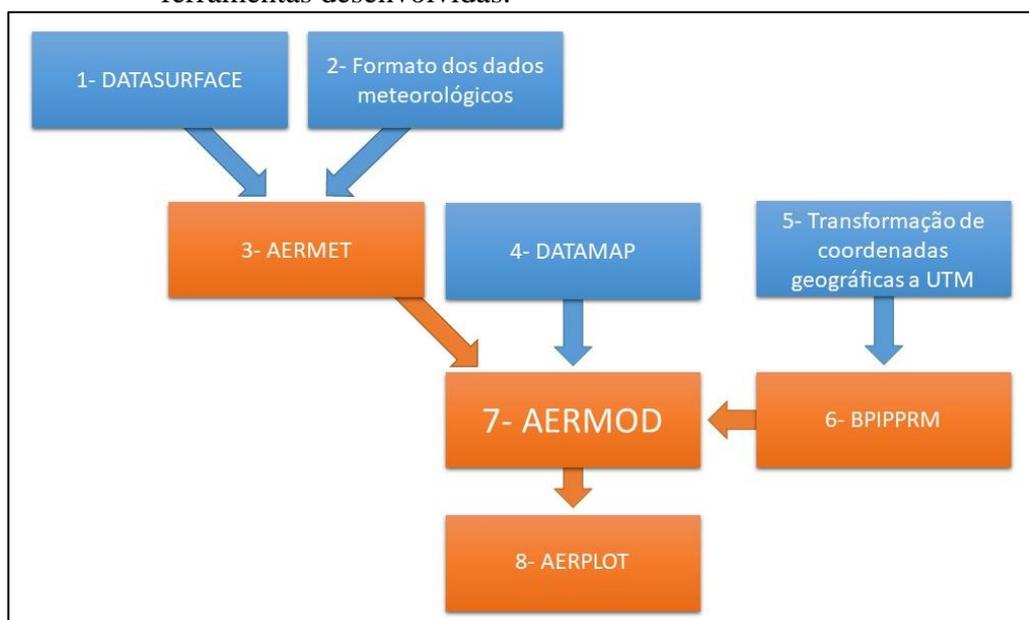
## 2.4 Disponibilização dos códigos desenvolvidos.

Como parte da divulgação dos resultados da pesquisa e com o objetivo de que as ferramentas desenvolvidas possam ser usadas pelos pesquisadores e especialistas interessados, foram disponibilizados os códigos das ferramentas desenvolvidas, tanto DATASURFACE e DATAMAP, como as auxiliares. Foram disponibilizadas usando a plataforma *Bitbucket*, no projeto “DTESE”, que pode ser encontrado em <https://bitbucket.org/nely-grillo/workspace/projects/DTESE>.

## 2.5 Metodologia de uso do AERMOD com as ferramentas desenvolvidas.

Procedimento para executar o modelo AERMOD, usando as ferramentas desenvolvidas e dados públicos brasileiros. Os pré-processadores e o AERMOD precisam ser executados na ordem sugerida porque os resultados de cada pré-processador são requeridos para o próximo a ser executado, como mostrado na Figura 9, onde na cor azul podem se observar as ferramentas desenvolvidas, e na cor laranja as que pertencem ao modelo AERMOD.

Figura 9 – Diagrama de passos para executar o modelo AERMOD com as ferramentas desenvolvidas.



Fonte: O autor, 2023.

1. **DATASURFACE:** para a execução desta ferramenta, o usuário precisa ter conhecimento de quantos e quais tipos de uso do solo diferentes existem ao redor da fonte, e em quais direções podem se encontrar cada um destes tipos de uso do solo. Com estas informações e a frequência com que desejam ser calculados (mensal, estacional ou anual), são obtidos os valores das características do solo: albedo, razão de Bowen e comprimento de rugosidade. Estes resultados serão introduzidos no AERMET.
2. **Formatação dos dados meteorológicos:** para a execução do AERMET é preciso de um documento com os dados meteorológicos devidamente formatados, e com a execução desta ferramenta pode se obter um documento com os dados na formatação definida no arquivo de configurações.
3. **AERMET:** para a execução deste pré-processador, o usuário precisa ter os dados meteorológicos devidamente formatados (resultados do uso da ferramenta descrita no item 2) e os resultados da execução do DATASURFACE. Os dados meteorológicos serão introduzidos na fase 1 e as características de superfície na fase 3. Desta forma serão obtidos dois arquivos que serão usados para a execução do AERMOD.
4. **DATAMAP:** para a execução desta ferramenta, o usuário precisa de uma imagem no formato GeoTiff com os dados de altitude da região que se deseja modelar e uma grade de pontos receptores (que será definida dentro do arquivo de configurações da ferramenta). Com a execução desta ferramenta, são obtidos os valores de altitude para cada ponto receptor definido e para a fonte, e o parâmetro de altura de colina para os pontos receptores. Estes dados de saída serão introduzidos no arquivo de configurações do AERMOD.
5. **Transformação de coordenadas geográficas a UTM:** antes de executar esta ferramenta, precisa ser configurado o arquivo de entrada do BPIPPRM com as coordenadas dos pontos que definem as construções em coordenadas geográficas. A ferramenta desenvolvida lê este arquivo de entrada, e converte os pontos, de coordenadas geográficas a coordenadas UTM. Desta forma, podemos obter o arquivo de configurações que é preciso para a execução do BPIPPRM, nas coordenadas UTM.
6. **BIPPRM:** para a execução deste pré-processador, é preciso o arquivo de configurações com as localizações dos pontos extremos dos prédios (ou

construções) que poderiam interferir no padrão de dispersão dos contaminantes ao redor da fonte. Com este pré-processador podem se obter uma série de parâmetros referentes às mudanças que poderiam gerar as edificações ao redor da fonte no padrão de dispersão dos contaminantes.

7. **AERMOD:** para a execução do modelo serão precisos os arquivos de saída do AERMET, e dentro do arquivo de configurações serão colocados os resultados de executar o DATAMAP e o BPIPFRM. Como resultado da execução deste modelo será obtido um arquivo com as concentrações modeladas nos pontos receptores para o período definido.
8. **AERPLOT:** com a ajuda deste pós-processador, pode ser modificado o arquivo de saída do AERMOD para melhor visualizar os resultados obtidos. Ele precisa do arquivo de saída o arquivo de configurações do AERMOD. Depois de ser executado, os resultados podem ser visualizados por programas como Google Earth.

### **3 RESULTADOS OBTIDOS COM O USO DAS FERRAMENTAS DESENVOLVIDAS.**

Com o objetivo de testar os resultados obtidos pelas ferramentas desenvolvidas, foram executados três casos de teste: uma fonte fictícia localizada no Instituto Politécnico – IPRJ (Nova Friburgo - Rio de Janeiro), por se tratar do nosso centro de ensino, constar com dados meteorológicos coletados por uma estação meteorológica automática e ter um relevo irregular com várias elevações ao redor da instituição. Uma fonte real na zona industrial de Juiz de Fora (Juiz de Fora – Minas Gerais), região que também possui um relevo irregular e com medições reais de emissão de contaminantes. E a última fonte considerada nas simulações foi a localizada na zona industrial de Barcarena (Barcarena – Pará), local que consta com um relevo predominantemente plano, e também com medições reais de emissão de contaminantes.

#### **3.1 Exemplo de fonte fictícia no Instituto Politécnico - IPRJ.**

O Instituto Politécnico - IPRJ, encontra-se localizado na cidade de Nova Friburgo, no centro-norte do estado do Rio de Janeiro. Como localizada na região serrana e a uma altitude média de 846 m, predomina um clima tropical de altitude, com temperaturas amenas no verão e frias no inverno e as quatro estações bem definidas. Localizado no IPRJ, encontra-se uma estação meteorológica automática, de onde foram obtidos os dados meteorológicos para usar na execução do modelo.

Para as execuções foram usados os dados do mês de novembro de 2016 por ser um mês em que não aconteceram fenômenos meteorológicos extremos, e porque não teve erros nem falhas nas medições.

As principais variáveis meteorológicas que interferem na dispersão dos contaminantes são a velocidade e direção do vento. Na região de estudo, predominam os ventos fracos com direções ao redor do sudoeste, como mostrado na Figura 10. Nesta figura se observa a rosa dos ventos elaborada como os dados de vento do mês de novembro da estação meteorológica localizada no IPRJ; com as cores são representadas as velocidades do vento em m/s. A frequência dos dados de vento usadas para a execução foi horária.

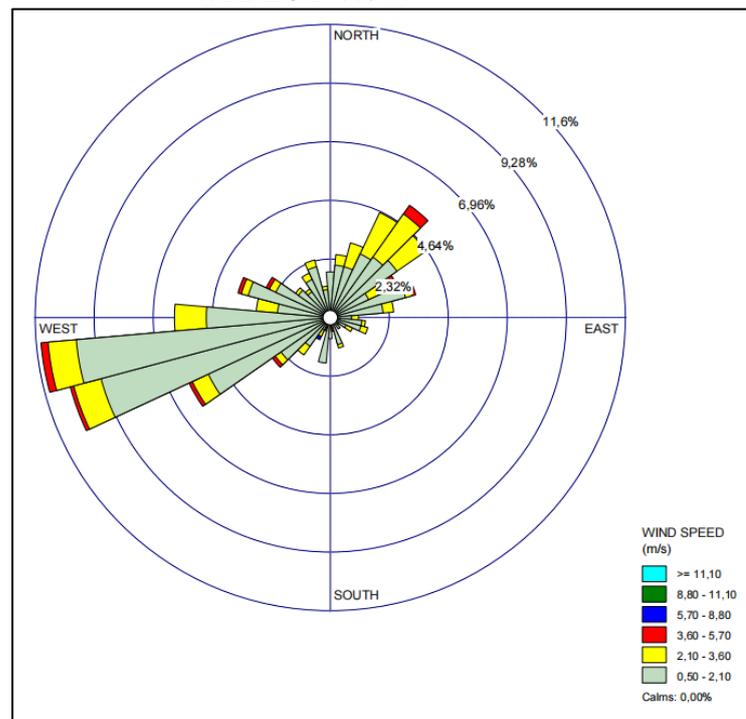
Na região e período de estudo, predominam os ventos calmos a fracos de acordo com a escala Beaufort (Tabela 18) que relaciona a velocidade do vento com a intensidade. Observa-se só uma ocorrência de vento moderado, e o 80% das ocorrências são de ventos entre calmos e aragem. As direções predominantes são do Sudoeste ao Oeste, como mostrado na Figura 10 (30% das ocorrências nesta parte do quadrante, e quase 40% das ocorrências no quadrante do Sul ao Oeste). Pode-se observar também, um 30% das ocorrências de vento no quadrante do Norte ao Leste, e este comportamento é esperado no mês de novembro, causado pelo passo de frentes frias fracas, com ventos fracos, próprias dessa época do ano.

Tabela 18 – Escala Beaufort.

Velocidade (m/s)	Intensidade
$\geq 17,00$	Muito forte
13,9 – 17,0	Forte
10,8 – 13,9	Muito fresco
8,2 – 10,8	Fresco
5,1 – 8,2	Moderado
3,1 – 5,1	Fraco
1,5 – 3,1	Aragem
0,5 – 1,5	Bafagem
0,0 – 0,5	Calmaria

Fonte: MARINHA, 2015.

Figura 10 – Rosa dos ventos na estação meteorológica do IPRJ, de novembro de 2016, elaborada com WRPLOT View.



Fonte: O autor, 2022.

Para testar o funcionamento das ferramentas desenvolvidas, foi executado um exemplo, simulando uma fonte pontual do contaminante SO<sub>2</sub> no campus do IPRJ na localização de 22,287 de latitude Sul e 42,542 de longitude Leste. Os dados de emissão do gás usados para este exemplo foram usados do trabalho de GRANATO (2016), como mostrado na Tabela 19, com o objetivo de usar valores mais parecidos com a realidade de uma indústria.

Tabela 19 - Dados de emissão fictícios de SO<sub>2</sub>, para a simulação do IPRJ

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Taxa de emissão	396,575 g/s
Altura da emissão	5,0 m
Temperatura do gás na saída	659,67 K
Velocidade do gás na saída	35,5 m/s
Diâmetro da chaminé	1,8 m

Fonte: GRANATO, 2016.

Para analisar o efeito de downwash pela influência das construções ao redor da fonte, foram considerados os quatro prédios principais do IPRJ. Ao redor da fonte, de forma radial, foram definidos, dois tipos principais de tipo de uso do solo: Área Artificial e Vegetação Florestal. Considerando como 0° a direção Norte, foi definida a presença de Vegetação Florestal entre 40° e 245°, e a Área Artificial no resto das direções. Como informação meteorológica foram usados os dados meteorológicos coletados pela estação automática localizada no campus do IPRJ, correspondente ao mês de novembro de 2016.

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos pelas ferramentas desenvolvidas com os resultados dos pré-processadores do AERMOD, foram usadas as imagens em formato GeoTiff fornecidas internacionalmente no site do USGS (USGS, 2021) para serem usadas pelo AERMAP, e as imagens disponíveis no site da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (WEBER, HASENACK e FERREIRA, 2022) para serem usadas pelo DATAMAP. O modelo foi executado com uma grade cartesiana quadrada de 1600 receptores com espaçamento de 100 m entre eles.

Assim, foi executado o AERMOD de duas formas, a primeira usando seus próprios pré-processadores (Figura 11) e a segunda, substituindo os pré-processadores pelas ferramentas desenvolvidas DATASURFACE e DATAMAP (Figura 12). Assim forma obtidos dois padrões de dispersão de contaminantes do gás SO<sub>2</sub>.

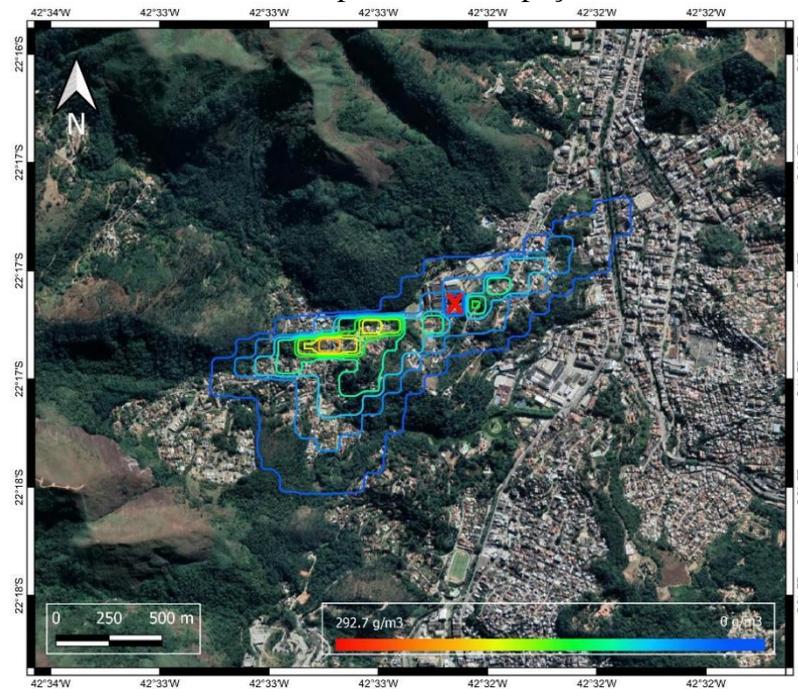
Nas Figuras 11 e 12, observa-se um padrão de dispersão do gás SO<sub>2</sub> durante 24 horas, com as concentrações máximas representadas pelas linhas de cor vermelha, na medida que diminui a concentração, esta é representada pelas cores laranja, amarelo, verde, e a cor azul representando concentrações próximas de 0. E com um “X” vermelho encontra-se representada a localização da fonte usada para esta simulação.

Na Figura 11, onde foram usados os dados de altitude disponibilizados internacionalmente, pode se observar um padrão de dispersão máxima entre o Oeste e o Sudoeste da fonte. Este comportamento não é o esperado, porque o padrão de direção dos ventos na estação meteorológica automática do IPRJ no período escolhido é precisamente desta direção, então a dispersão do gás não deveria ser contra a direção do vento, que é a principal variável meteorológica responsável pela dispersão dos contaminantes. Além disso, ao Sudoeste da fonte encontra-se uma pequena elevação que deveria diminuir também a dispersão do gás nesta direção.

Já na Figura 12, onde foram usados os dados de altitude disponibilizados no Brasil, pode se observar um padrão de dispersão máxima do gás entre o Leste e o Nordeste. Este comportamento é o esperado de acordo com o padrão da direção dos ventos na região. Observa-se também os máximos de concentração ao redor da fonte e ao Nordeste dela, coincidindo estas duas localizações com pontos de menor altitude na região de modelagem. Ao Sudoeste pode se observar uma diminuição da concentração do SO<sub>2</sub> coincidindo com uma pequena elevação que se encontra neste ponto.

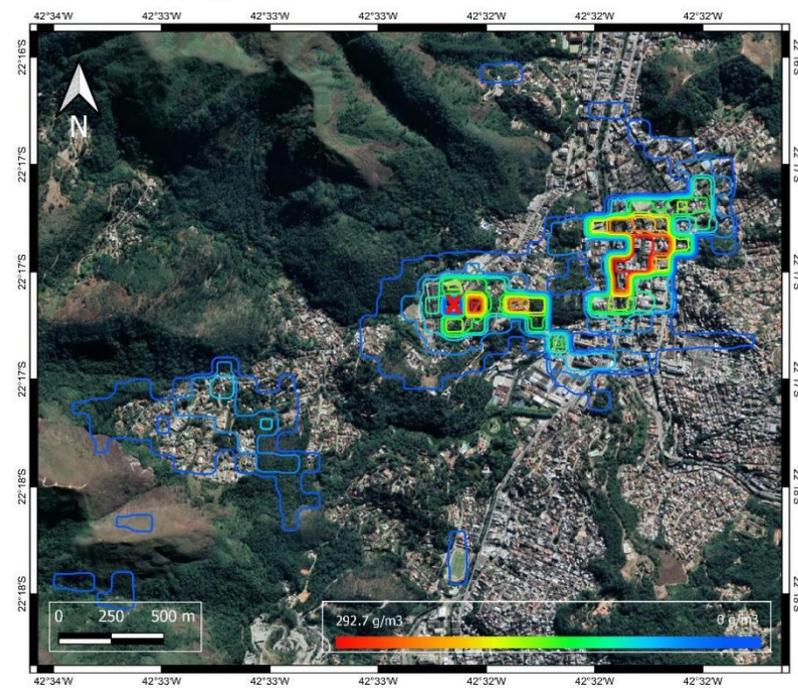
O padrão de dispersão obtido com o uso das ferramentas desenvolvidas, além de ter maior acurácia e relação com o relevo e a meteorologia da região, também demonstrou maior contaminação em áreas mais densamente urbanizadas, o que é relevante do ponto de vista da proteção da saúde pública, e que poderia ser negligenciado ao se utilizar apenas as ferramentas originais do AERMOD.

Figura 11 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 12 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m.



Fonte: O autor, 2022.

Com o objetivo de saber a quantidade de pontos que poderiam ser definidos dentro da grade para modelagem, foram feitos testes com diferentes quantidades de pontos dentro da mesma região de estudo, mas diminuindo o espaçamento entre os pontos. Foram testadas as grades com espaçamento e quantidade de pontos como mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 – Quantidade de pontos e espaçamento das grades testadas.

<b>Quantidade de pontos</b>	<b>Espaçamento (m)</b>
2500	79
3600	66
4900	56
6400	49
8100	43
10000	39
12100	35

Fonte: O autor, 2022.

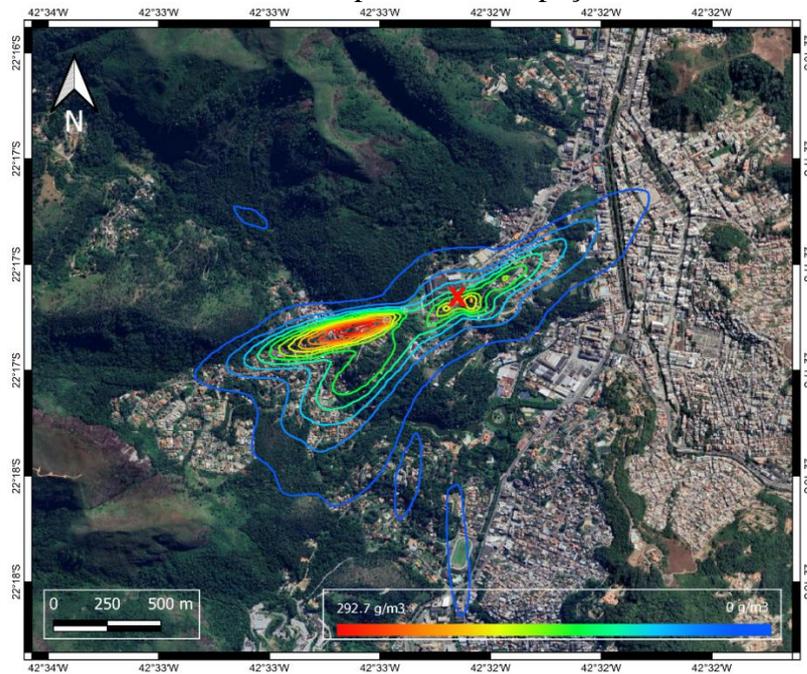
Desta forma foram analisados os resultados obtidos com cada teste e concluímos que a quantidade máxima de pontos a usar na grade, que obtém resultados que podem ser considerados como certos, é a grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m, porque ao aumentar a quantidade de pontos mais do que este valor, podem ser obtidos padrões de dispersão concêntricos, comportamento que difere do resultado esperado ao serem consideradas as condições físico-geográficas e meteorológicas da região.

Também foi executado o modelo AERMOD com uma grade de 10 000 pontos e espaçamento de 39m. Na Figura 13 se mostra a modelagem usando os seus próprios pre-processadores e na Figura 14 se mostram os resultados considerando as ferramentas desenvolvidas.

Nas Figuras 13 e 14 pode-se observar o padrão de dispersão do gás SO<sub>2</sub> durante 24 horas, com as concentrações máximas representadas pelas linhas da cor vermelha, e na medida que diminui a concentração, esta é representada pelas cores laranja, amarelo, verde e a cor azul representando as concentrações próximas de 0. Com um “X” vermelho encontra-se representada a localização da fonte usada para estas simulações.

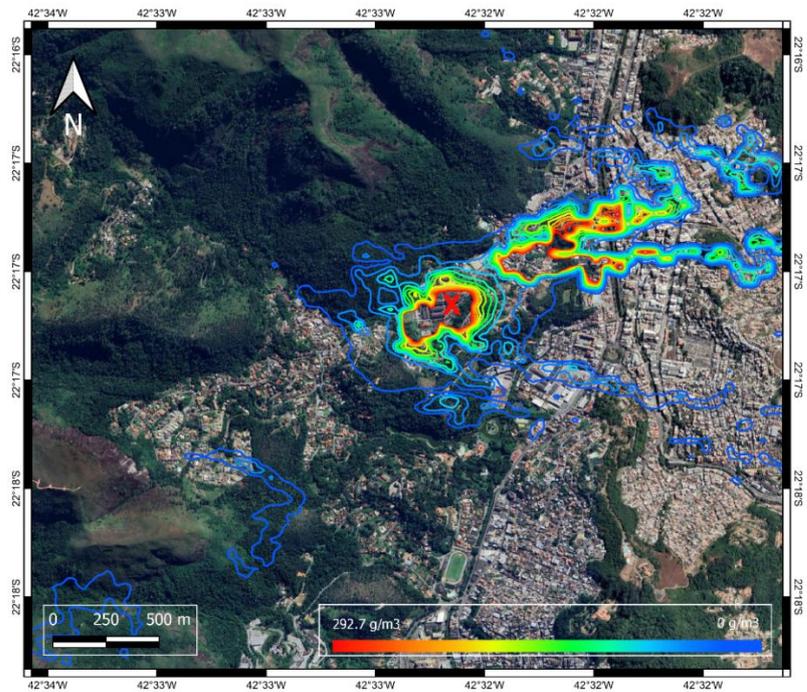
Na Figura 13, foram usados os dados de altitude disponibilizados internacionalmente, e na Figura 14, foram usados os dados de altitude disponibilizados no Brasil. Em ambas as simulações, foram obtidos resultados similares aos obtidos com a grade de 1600 pontos e espaçamento de 100m, diferenciando-se entre elas pelo suavizado nas linhas dado que foi aumentada a quantidade de pontos no mesmo espaço.

Figura 13 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 14 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m.



Fonte: O autor, 2022.

Com o objetivo de comparar os resultados das ferramentas desenvolvidas em uma área maior, foram feitas simulações similares, mas usando uma grade com 1600 pontos com espaçamento de 1km entre cada ponto. Desta forma foram obtidos padrões de dispersão dos contaminantes similares, com máximas concentrações ao Este Nordeste da fonte. Com o uso das imagens disponibilizadas no USGS, pode se observar uma região de concentração máxima ao sul da fonte. Este comportamento não é o esperado, porque o padrão de ventos nesta região é do Oeste Sudoeste, e porque ao sul da fonte tem elevações que não permitiriam as máximas concentrações se acumularem nesta região. Já na simulação usando os dados públicos brasileiros e as ferramentas desenvolvidas, pode se observar um padrão de dispersão só nas direções esperadas, respeitando as condições físico-geográficas e meteorológicas da região. No Apêndice B podem ser observados os resultados destas simulações.

### **3.2 Exemplo de fonte na zona industrial de Juiz de Fora.**

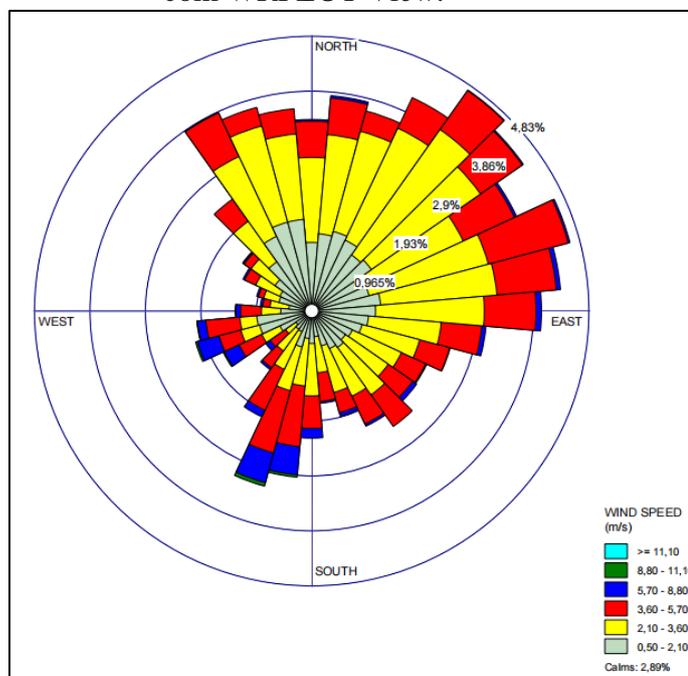
O município de Juiz de Fora encontra-se localizado ao sul do estado de Minas Gerais. O relevo na cidade é bem acidentado, apresentando o 98% da região com elevações que correspondem à Unidade Serrana da Zona da Mata, com uma altitude média de 677 m, aproximadamente. O clima na região é caracterizado como tropical de altitude segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Anexo), com temperaturas agradáveis durante o verão e frias durante o inverno e chuvas concentradas no verão.

A nossa simulação foi feita na região industrial de Juiz de Fora, localizada no norte da cidade. Os dados meteorológicos usados para as simulações foram coletados pela estação automática, operada pelo Laboratório de Análises Climáticas da Universidade Federal de Juiz de Fora, vinculada a rede de monitoramento do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e pela estação meteorológica convencional de Juiz de Fora - MG. Foi escolhido o ano de 2014 para fazer as simulações por tratar-se de um ano com poucas falhas nos dados meteorológicos coletados.

As principais variáveis meteorológicas que interferem na dispersão dos contaminantes são a velocidade e direção do vento. Na Figura 15, pode se observar a rosa dos ventos elaborada com os dados de vento do ano 2014 da estação meteorológica automática localizada

na Universidade Federal de Juiz de Fora – MG; com as cores são representadas as velocidades do vento em m/s. A frequência dos dados de vento usadas para a execução foi horária.

Figura 15 – Rosa dos ventos na estação meteorológica de Juiz de Fora, do ano 2014, elaborada com WRPLOT View.



Fonte: O autor, 2022.

Na região de estudo, predominam os ventos calmos a fracos (82% das ocorrências com velocidades até 4m/s) de acordo com a escala Beaufort (Tabela 18) que relaciona a velocidade do vento com a intensidade. As direções predominantes são do Noroeste ao Leste, como mostrado na Figura 15 (55% das ocorrências neste quadrante). A predominância de ventos do norte era esperada, de acordo com a localização e a disposição do Vale Paraibuna (GRANATO, 2016). Pode-se observar também a ocorrência de ventos moderados a muito frescos no quadrante de Oeste a Sul (16% das ocorrências nesse quadrante), comportamento que pode ser explicado pela inversão na direção dos ventos e o aumento da velocidade do vento na cidade com a entrada de frentes frias (GRANATO, 2016).

Foi simulada uma fonte pontual do contaminante SO<sub>2</sub> usando os dados de emissão da fonte “Industria 1”, apresentados por GRANATO (2016). A localização da fonte foi definida usando o Google Maps, no ponto onde se observa a localização da chaminé (21.624 graus de latitude Sul e 43.469 graus de longitude Oeste). Os dados de emissão do gás usados para este exemplo são mostrados na Tabela 21.

Tabela 21- Dados de emissão de SO<sub>2</sub>, para a simulação de Juiz de Fora

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Taxa de emissão	396,575 g/s
Altura da emissão	30,0 m
Temperatura do gás na saída	659,67 K
Velocidade do gás na saída	35,5 m/s
Diâmetro da chaminé	1,8 m

Fonte: GRANATO, 2016.

Perto da fonte de emissão do contaminante não se observaram prédios grandes que pudessem afetar significativamente a dispersão do gás, pelo que foi dispensado o uso do pré-processador BPIPPRM. Ao redor da fonte, de forma radial, foi definido um tipo principal de tipo de uso do solo: Vegetação Campestre.

Como informação meteorológica foram usados os dados meteorológicos coletados pela estação automática, operada pelo Laboratório de Análises Climáticas da Universidade Federal de Juiz de Fora, vinculada a rede de monitoramento do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Os valores de nebulosidade não são disponibilizados pela estação meteorológica automática, pelo que foram usados estes valores da estação meteorológica convencional de Juiz de Fora - MG, por localizar-se perto da estação meteorológica automática usada. Foi escolhido o ano de 2014 para fazer as simulações por tratar-se de um ano com poucas falhas nos dados meteorológicos coletados. Estes dados podem ser encontrados na plataforma on-line do INMET (INMETa, 2022).

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos pelas ferramentas desenvolvidas com os resultados obtidos usando os pré-processadores do AERMOD, foram usadas as imagens em formato GeoTiff fornecidas internacionalmente no site do USGS (USGS, 2021) para serem usadas pelo AERMAP, e as imagens disponíveis no site da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (WEBER, HASENACK e FERREIRA, 2022) para serem usadas pelo DATAMAP.

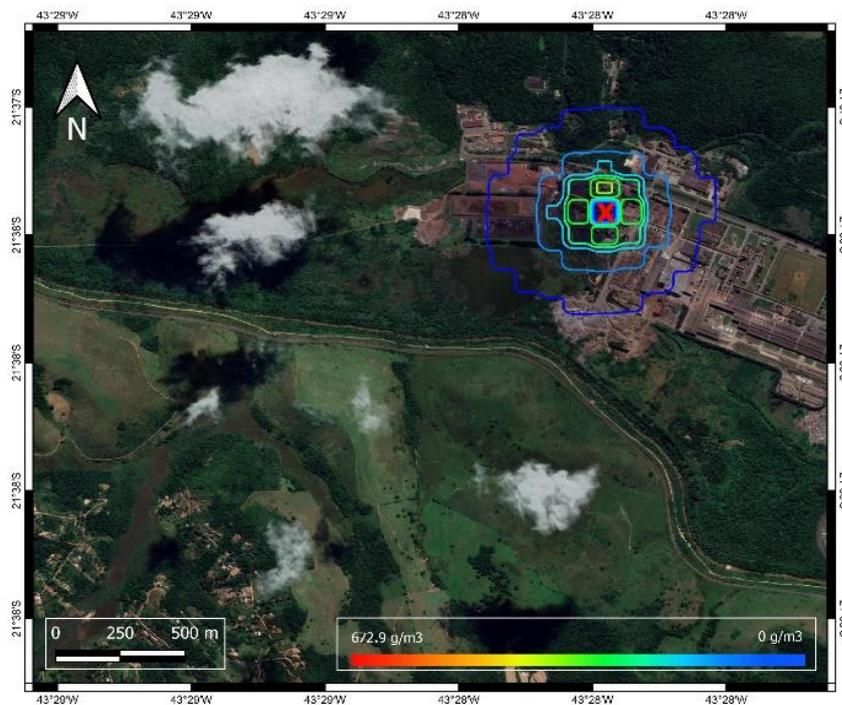
O modelo foi executado com uma grade cartesiana quadrada de 1600 receptores com espaçamento de 100 m entre eles. O AERMOD foi executado de duas formas, uma usando os pré-processadores próprios (Figura 16) e a segunda, substituindo os pré-processadores pelas ferramentas desenvolvidas: DATASURFACE e DATAMAP (Figura 17). Assim foram obtidos dois padrões de dispersão de contaminantes do gás SO<sub>2</sub>.

Nas Figuras 16 e 17, se observa um padrão de dispersão do gás  $\text{SO}_2$  durante 24 horas, com as concentrações máximas representadas pelas linhas de cor vermelha, na medida que diminui a concentração, esta é representada pelas cores laranja, amarelo, verde, e a cor azul representando concentrações próximas de 0. Com um “X” vermelho encontra-se representada a localização da fonte usada para esta simulação.

Na Figura 16, se representa a dispersão de  $\text{SO}_2$  usando os dados de altitude encontrados internacionalmente e os pré-processadores do AERMOD, e na Figura 17, se observa a dispersão de  $\text{SO}_2$  usando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens disponíveis no Brasil.

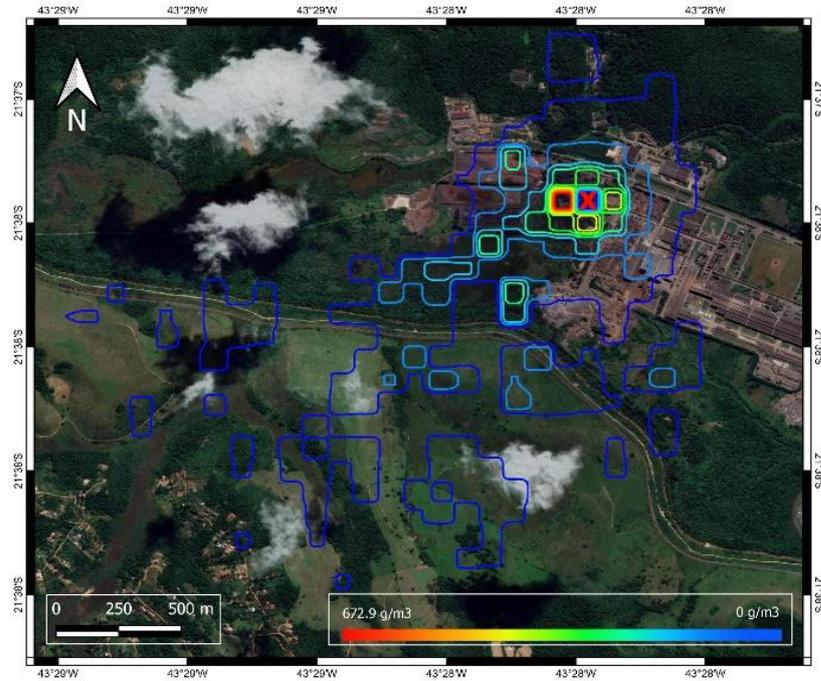
Na Figura 16, pode se observar um comportamento radial na dispersão do gás. Este comportamento não é o esperado, porque a direção do vento predominante é do nordeste, e ao norte da fonte encontram-se elevações que dificultariam a dispersão de qualquer gás nessa direção. Já na Figura 17, pode se observar um padrão de dispersão como o esperado, com maiores concentrações ao sudoeste da fonte e menores concentrações ao norte e leste da fonte. Este resultado é similar ao obtido por GRANATO (2016), nesta pesquisa os autores relatam uma dispersão em sentido Sul, de acordo com o estudo de vento da região.

Figura 16 - Dispersão de  $\text{SO}_2$  considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 17 - Dispersão de  $\text{SO}_2$  considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m.



Fonte: O autor, 2022.

Este comportamento esperado pode ser confirmado usando a imagem de satélite extraída do Google Maps (GOOGLE MAPS, 2022), mostrada na Figura 18, onde pode se observar uma mudança na coloração do solo e vegetação ao redor da chaminé em estudo, predominando uma cor mais escura ao sudoeste dela, como resultado da deposição de poluentes emitidos pela chaminé. Na Figura 17 pode se observar uma superposição das linhas de maior concentração do  $\text{SO}_2$  sobre a região de coloração mais escura na imagem de satélite.

Figura 18 – Imagem de satélite da região de estudo.



Fonte: GOOGLE MAPS, 2022.

Com o objetivo de saber a quantidade de pontos que poderiam ser definidos dentro da grade para modelagem, também nesta região, foram feitos testes com diferentes quantidades de pontos dentro da mesma região de estudo, mas diminuindo o espaçamento entre os pontos. Foram testadas as mesmas grades do exemplo anterior, com espaçamento e quantidade de pontos como mostrado na Tabela 20.

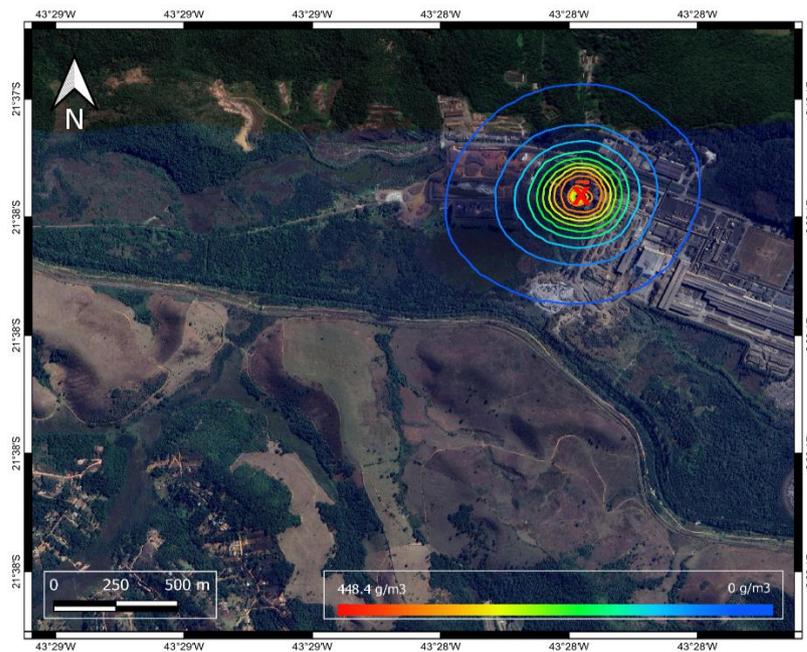
Desta forma foram analisados os resultados obtidos com cada teste e concluímos que a quantidade máxima de pontos a usar na grade, que obtém resultados que podem ser considerados como certos, é a grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m, igual ao resultado obtido para o exemplo simulado anteriormente. Ao aumentar a quantidade de pontos mais do que este valor, podem ser obtidos padrões de dispersão concêntricos, comportamento que difere do resultado esperado ao serem consideradas as condições físico-geográficas e meteorológicas da região.

Assim, foi executado o modelo AERMOD com uma grade de 10000 pontos e espaçamento de 39m. Na Figura 13 se mostra a modelagem usando os seus próprios pre-processadores e na Figura 14 se mostram os resultados considerando as ferramentas desenvolvidas.

Nas Figuras 19 e 20 pode se observar a padrão de dispersão do gás SO<sub>2</sub> durante 24 horas, com as concentrações máximas representadas pelas linhas da cor vermelha, e na medida que diminui a concentração, esta é representada pelas cores laranja, amarelo, verde e a cor azul representando as concentrações próximas de 0. Com um “X” vermelho encontra-se representada a localização da fonte usada para esta simulação.

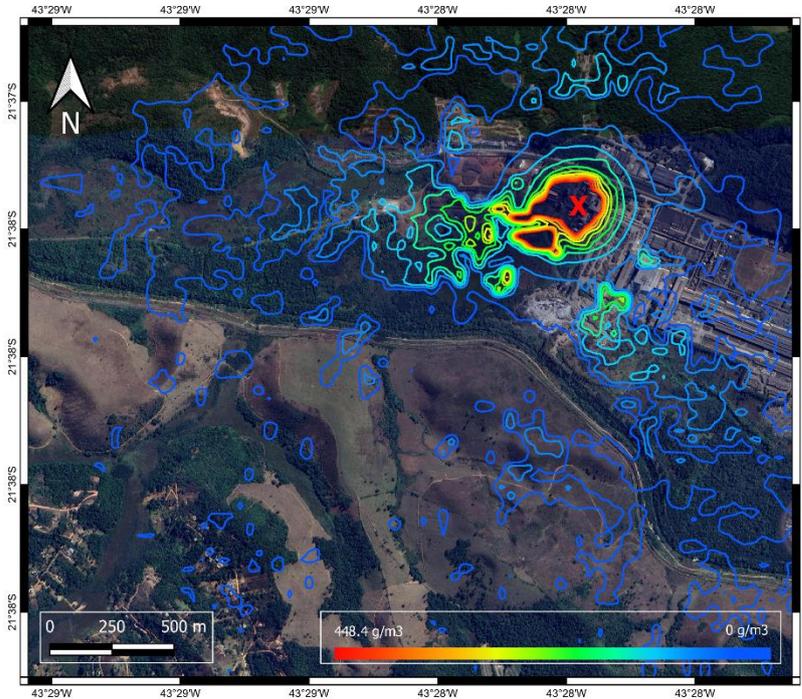
Na Figura 19, foram usados os dados de altitude disponibilizados internacionalmente, e na Figura 20, foram usados os dados de altitude disponibilizados no Brasil. Em ambas as simulações, foram obtidos resultados similares aos obtidos com a grade de 1600 pontos e espaçamento de 100m, diferenciando-se entre elas pelo suavizado nas linhas dado que foi aumentada a quantidade de pontos no mesmo espaço.

Figura 19 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 20 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m.



Fonte: O autor, 2022.

Com o objetivo de comparar os resultados das ferramentas desenvolvidas em uma área maior, foram feitas simulações similares, mas usando uma grade com 1600 pontos com espaçamento de 1km entre cada ponto.

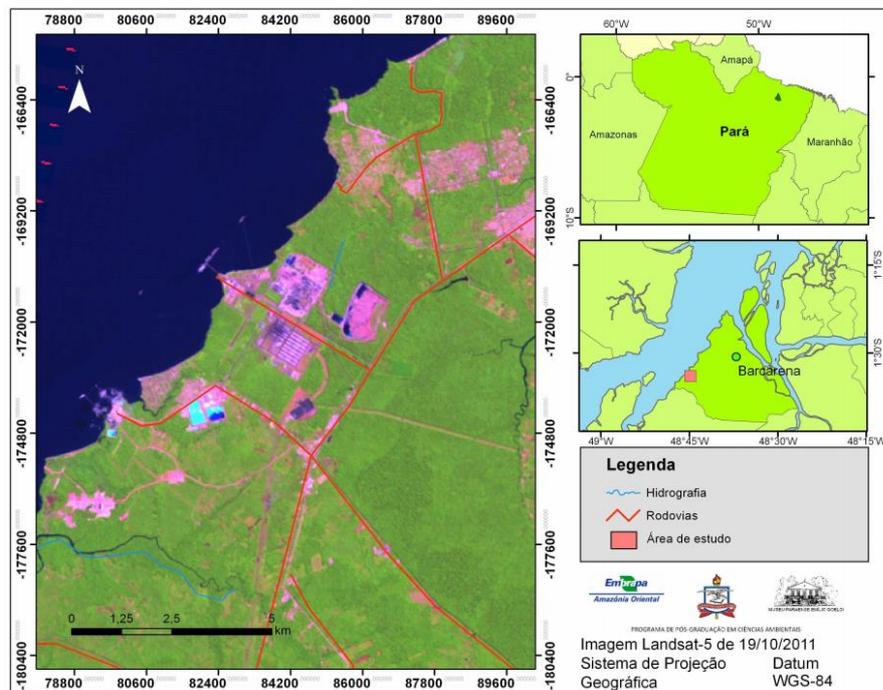
Neste caso podem se observar maiores valores de concentrações do gás nas simulações feitas com os dados públicos brasileiros, mas os pontos de máximo se encontram ao norte da fonte em ambas as imagens. No padrão de dispersão de SO<sub>2</sub>, considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, as máximas concentrações são observadas no quadrante do norte ao leste. Este comportamento pode estar acontecendo porque os ventos mais fortes, que transportam a contaminação a regiões mais longes da fonte, são de componentes do quadrante do Oeste ao Sul. Nos resultados da simulação quando usados os dados públicos brasileiros pode se observar uma linha de concentrações ao sudoeste da fonte, isto aconteceu devido a uma diminuição da altitude nesta região o que faz com que se acumulem os contaminantes nesta região com o decorrer do tempo. No Apêndice C podem ser observados os resultados destas simulações.

### 3.3 Exemplo de fonte na zona industrial de Barcarena.

O município brasileiro Barcarena está localizado no estado do Pará, na região Norte do Brasil, pertencente a região metropolitana de Belém. A vegetação predominante na região é composta por florestas secundárias, e o relevo é predominantemente plano, com pequenas elevações na porção continental, com altitudes de até 14m. O clima da região é classificado como Equatorial segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Anexo).

A região de estudo encontra-se localizada, no Distrito industrial, como mostrado na Figura 21, onde estão as maiores indústrias do município, hoje com a maior refinaria de alumínio do mundo fora da China. (REVISTA ALUMÍNIO, 2021)

Figura 21- Mapa de localização da região de estudo.



Fonte: ARAUJO, 2012.

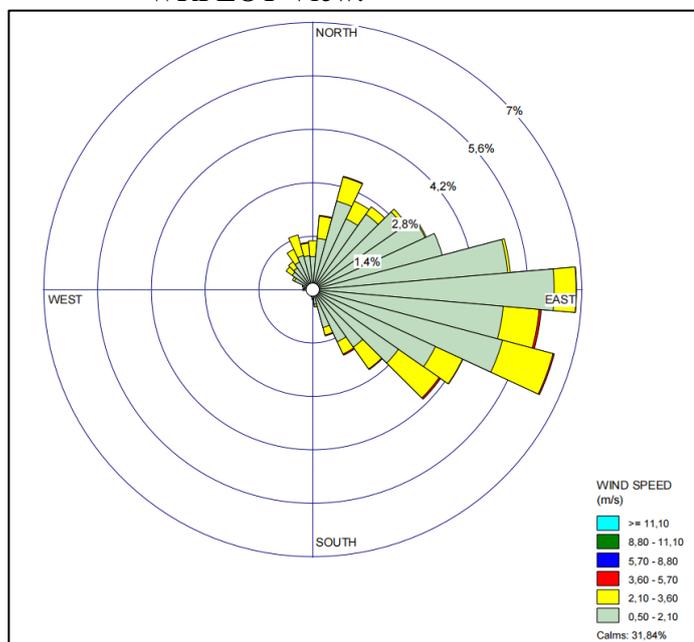
A principal estação meteorológica usada para os dados meteorológicos foi a A201 de Belém (estação meteorológica automática), e para completar os dados que estavam faltando e as informações de nebulosidade, foi usada a estação convencional 82191, ambas pertencentes ao INMET. Foram escolhidas estas estações já que a distância é de só 30 km até a região de estudo e, considerando a semelhança de características como relevo plano e presença de grandes massas d'água, é possível considerar que o regime de ventos em Belém é similar ao

de Barcarena. O período considerado foi do 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2010, por tratar-se de um ano com poucas falhas nos dados meteorológicos coletados.

Desde o ponto de vista meteorológico, as principais variáveis que interferem na dispersão dos contaminantes são a velocidade e direção do vento. Na Figura 20, pode se observar a rosa dos ventos elaborada com os dados de vento do ano 2010 da estação meteorológica automática localizada em Belém. A frequência dos dados de vento usadas para a execução foi horária.

O perfil de vento da estação convencional de Belém possui o mesmo padrão de ventos que a representada na Figura 22. Na região de estudo predominam os ventos de região Leste, com o 88,74% das ocorrências de vento nos quadrantes de Norte a Leste e de Leste a Sul. De acordo com a Escala de Beaufort (Tabela 18), que classifica os ventos segundo a sua intensidade, as ocorrências de ventos reportados pela estação meteorológica automática de Belém, podem ser catalogados entre calmos e fracos, tendo a totalidades das ocorrências dentro destas intensidades.

Figura 22 - Rosa dos ventos na estação meteorológica de Barcarena, do ano 2014, elaborada com WRPLOT View.



Fonte: O autor, 2022.

Com o objetivo de testar e comparar os resultados das ferramentas desenvolvidas em terreno predominantemente plano, foi feita a simulação da dispersão de SO<sub>2</sub>, usando os dados de emissão e características da fonte descritos por ARAUJO (2012). A localização da fonte

encontra-se localizada nos 1,566 graus de latitude Sul e 42,738 graus de longitude Oeste. Os valores de emissão do gás usados para este exemplo são mostrados na Tabela 22.

Tabela 22- Dados de emissão de SO<sub>2</sub>, para a simulação de Barcarena.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Taxa de emissão	350,0 g/s
Altura da emissão	35,0 m
Temperatura do gás na saída	350,08 K
Velocidade do gás na saída	14,63 m/s
Diâmetro da chaminé	1,8 m

Fonte: ARAUJO, 2012.

Foi dispensado o uso do pré-processador BPIPPRM porque se desconhecem as características dos prédios ao redor da fonte. Ao redor da fonte, de forma radial e no sentido do relógio, foram definidos dois tipos de uso do solo principais: do Norte ao Noroeste foi detectado o predomínio de Vegetação Florestal e do Noroeste ao Norte um Corpo de Água Continental.

Como informação meteorológica foram usados os dados coletados pela estação meteorológica automática operada pelo INMET [A201] e localizada em Belém, e como apoio a esses dados foram usados os coletados pela estação meteorológica convencional [82191] também localizada em Belém e operada pelo INMET (INMETb, 2022). O período usado foi o do ano 2010, como na pesquisa de ARAUJO (2012), por se tratar de um ano com poucas falhas na coleta dos dados.

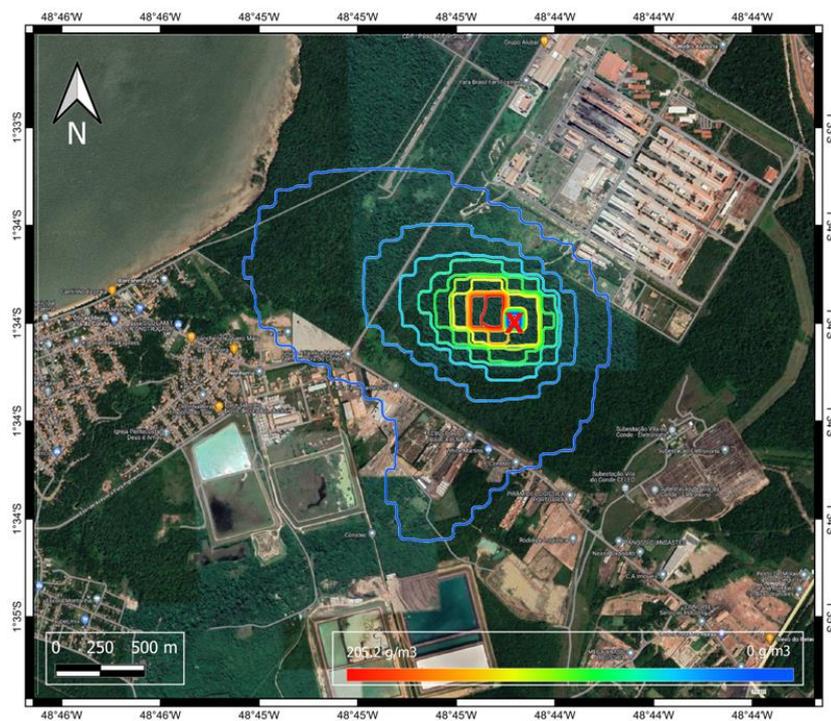
Com o objetivo de comparar os resultados obtidos pelas ferramentas desenvolvidas com os resultados obtidos usando os pré-processadores do AERMOD, foram usadas as imagens em formato GeoTiff fornecidas internacionalmente no site do USGS (USGS, 2021) para serem usadas pelo AERMAP, e as imagens disponíveis no site da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (WEBER, HASENACK e FERREIRA, 2022) para serem usadas pelo DATAMAP.

O modelo foi executado com uma grade cartesiana quadrada de 1600 receptores com espaçamento de 100 m entre eles. O AERMOD foi executado de duas formas, uma usando os pré-processadores próprios (Figura 23) e a segunda, substituindo os pré-processadores pelas ferramentas desenvolvidas: DATASURFACE e DATAMAP (Figura 24). Assim foram obtidos dois padrões de dispersão de contaminantes do gás SO<sub>2</sub>.

Nas Figuras 23 e 24, se observa um padrão de dispersão do gás SO<sub>2</sub> durante 24 horas, com as concentrações máximas representadas pelas linhas de cor vermelha, na medida que diminui a concentração, esta é representada pelas cores laranja, amarelo, verde, e a cor azul representando concentrações próximas de 0. Com um “X” vermelho encontra-se representada a localização da fonte usada para esta simulação.

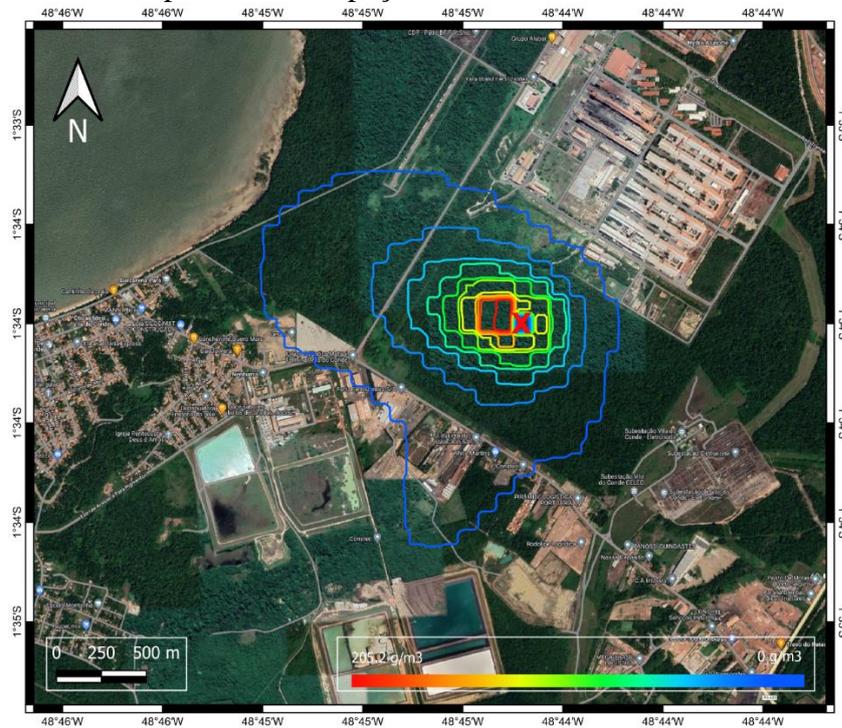
Na Figura 23, se representa a dispersão de SO<sub>2</sub> usando os dados de altitude encontrados internacionalmente e os pré-processadores do AERMOD, e na Figura 24, se observa a dispersão de SO<sub>2</sub> usando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens disponíveis no Brasil.

Figura 23 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte em Barcarena. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 24 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte em Barcarena. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 100m.



Fonte: O autor, 2022.

Nas duas figuras anteriores podem se observar comportamentos similares na dispersão do contaminante SO<sub>2</sub>, com a máxima dispersão em direção Oeste, concordando com o padrão de ventos da cidade. Segundo ARAUJO (2012), a dispersão do poluente SO<sub>2</sub>, seguiu as direções Noroeste, Oeste e Sudoeste, concordando com os resultados obtidos na nossa pesquisa.

Como a região de estudo tem um relevo predominantemente plano, com diferenças de altitude de um ponto a outro inferiores a 1m, os resultados obtidos com o uso das ferramentas desenvolvidas neste trabalho e com o uso dos pré-processadores próprios do AERMOD, são similares. Destacando assim a relevância do uso das nossas ferramentas para regiões com relevo irregular, porque para regiões com relevo predominantemente plano, os resultados obtidos nas duas simulações resultam similares.

Com o objetivo de saber a quantidade de pontos que poderiam ser definidos dentro da grade para modelagem, também nesta região, foram feitos testes com diferentes quantidades de pontos dentro da mesma região de estudo, mas diminuindo o espaçamento entre os pontos.

Foram testadas as mesmas grades do exemplo anterior, com espaçamento e quantidade de pontos como mostrado na Tabela 20.

Desta forma foram analisados os resultados obtidos com cada teste e concluímos que a quantidade máxima de pontos a usar na grade, que obtém resultados que podem ser considerados como certos, é a grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m, igual ao resultado obtido para os exemplos simulados anteriormente. Ao aumentar a quantidade de pontos mais do que este valor, podem ser obtidos padrões de dispersão concêntricos, comportamento que difere do resultado esperado ao serem consideradas as condições físico-geográficas e meteorológicas da região.

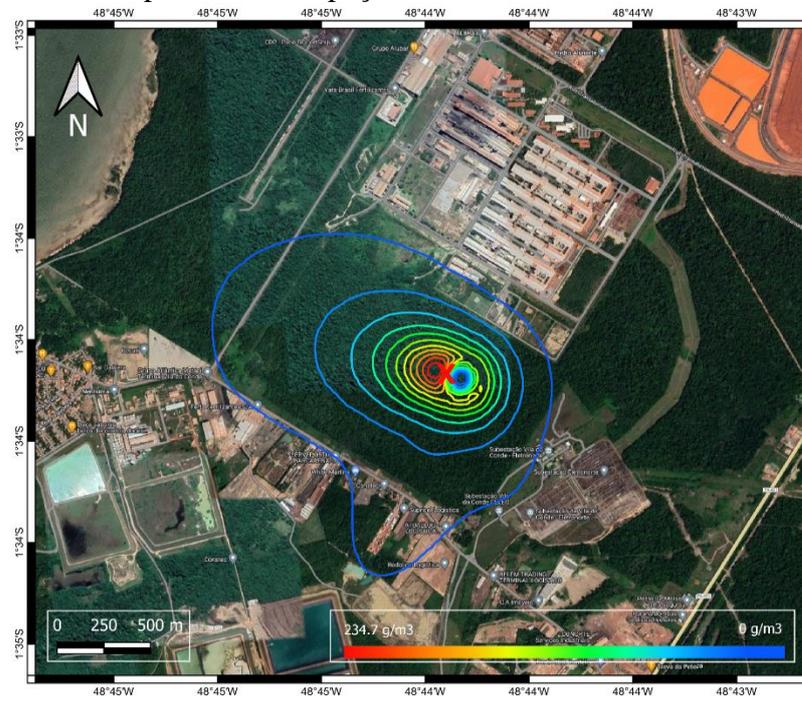
Assim, foi executado o modelo AERMOD com uma grade de 10000 pontos e espaçamento de 39m. Na Figura 25 se mostra a modelagem usando os seus próprios pre-processadores e na Figura 26 se mostram os resultados considerando as ferramentas desenvolvidas.

Nas Figuras 25 e 26 pode se observar a padrão de dispersão do gás SO<sub>2</sub> durante 24 horas, com as concentrações máximas representadas pelas linhas da cor vermelha, e na medida que diminui a concentração, esta é representada pelas cores laranja, amarelo, verde e a cor azul representando as concentrações próximas de 0. Com um “X” vermelho encontra-se representada a localização da fonte usada para esta simulação.

Na Figura 25, foram usados os dados de altitude disponibilizados internacionalmente, e na Figura 26, foram usados os dados de altitude disponibilizados no Brasil. Em ambas as simulações, foram obtidos resultados similares aos obtidos com a grade de 1600 pontos e espaçamento de 100m, diferenciando-se entre elas pelo suavizado nas linhas dado que foi aumentada a quantidade de pontos no mesmo espaço.

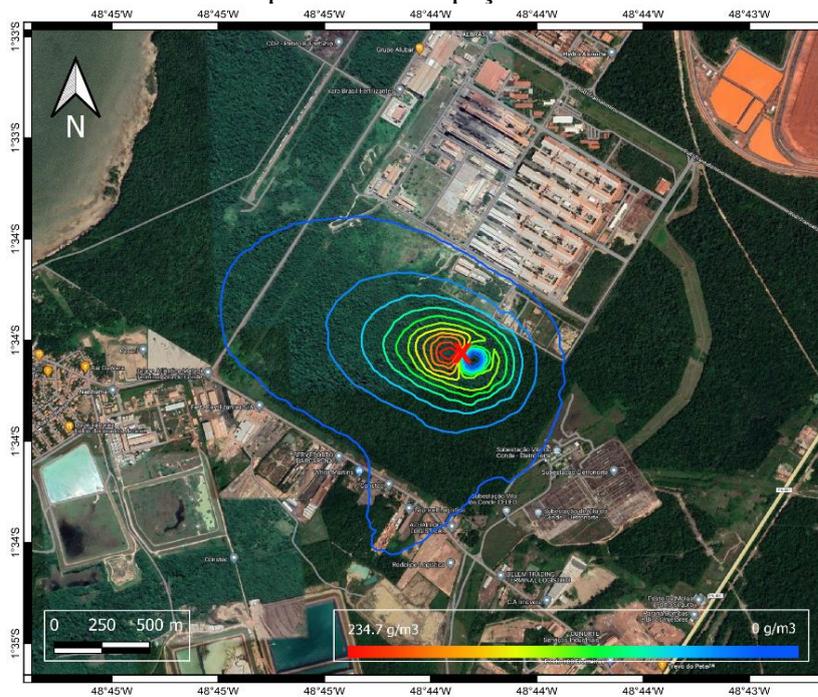
Com o objetivo de comparar os resultados das ferramentas desenvolvidas em uma área maior, foram feitas simulações similares, mas usando uma grade com 1600 pontos com espaçamento de 1km entre cada ponto. Desta forma foram obtidos padrões de dispersão dos contaminantes similares para ambas as simulações, isto pode acontecer porque a região é predominantemente plana. Pode-se concluir neste caso que, o uso das ferramentas desenvolvidas obtém resultados similares aos pré-processadores do AERMOD. No Apêndice D podem ser observados os resultados destas simulações.

Figura 25 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte em Barcarena. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 26 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte em Barcarena. Grade de 10000 pontos com espaçamento de 39m.



Fonte: O autor, 2022.

## CONCLUSÕES.

Com este trabalho foram criadas algumas ferramentas que possibilitaram e facilitaram o uso de imagens disponibilizadas no Brasil para a modelagem da dispersão de contaminantes usando o modelo AERMOD.

A principal contribuição do DATASURFACE é que ele oferece uma praticidade maior para o usuário que deseja usar o AERMOD, além de conseguir usar dados de comprimento de rugosidade, razão de Bowen e albedo, próprios da região de estudo, se disponíveis com melhor acurácia do que os tabelados para cada tipo de uso do solo. Modificando os valores das características de superfície, podem ser obtidos resultados aprimorados e específicos para a região em estudo com a execução do modelo.

A principal contribuição do DATAMAP é que são obtidos resultados com maior acurácia quando consideradas regiões com orografia complexa, usando imagens disponibilizadas no Brasil. Estas imagens têm melhor resolução do que as disponibilizadas internacionalmente, e em regiões pequenas (alguns quilômetros de diâmetro) são obtidos resultados mais acertados, considerando as diferentes altitudes do terreno.

A contribuição das outras ferramentas desenvolvidas é a facilidade que proporciona ao usuário na utilização dos pré-processadores do AERMOD, automatizando a conversão de coordenadas geográficas a UTM, a formatação dos dados meteorológicos e a estimativa da altura da camada limite atmosférica.

Foi descrita uma metodologia para executar o modelo AERMOD, usando as ferramentas desenvolvidas e os dados públicos brasileiros, facilitando assim o seu uso pelos pesquisadores.

Com os exemplos modelados, considerando grades que ocupam uma região quadrada de 16 m<sup>2</sup>, pode-se concluir que a utilização de imagens brasileiras, com melhor resolução, possibilita a obtenção de uma melhor aproximação do comportamento da dispersão de contaminantes em regiões com terreno de elevação irregular, como foram os casos dos exemplos simulados no IPRJ e na zona industrial de Juiz de Fora. Onde, ao serem usadas as ferramentas desenvolvidas nesta pesquisa, foram obtidos resultados mais acertados de acordo com as características físico-geográficas e meteorológicas da região, já que o modelo identifica o efeito de pequenas elevações presentes perto da fonte de contaminantes, comportamento que não é observado com o uso dos pré-processadores próprios do

AERMOD, podendo isto implicar em resultados errados na simulação da dispersão de contaminantes.

No caso do exemplo simulado na zona industrial de Barcarena, foram obtidos resultados similares entre as simulações onde foram usados os pré-processadores próprios do AERMOD e as ferramentas desenvolvidas, já que a região de estudo (dentro da grade da simulação) tem um relevo predominantemente plano com diferenças de altitude inferiores a 1 metro entre um ponto e outro. Descartando assim a necessidade do uso das ferramentas desenvolvidas para regiões predominantemente planas, mas podendo ser usado se for desejado, porque são obtidos resultados satisfatórios também nestes casos.

Foi definido também que a quantidade máxima de pontos que podem ser usados para a simulação da dispersão dos contaminantes com as ferramentas desenvolvidas é de 10 000 pontos, quando aumentada esta quantidade podem ser obtidos padrões de dispersão concêntricos, independentemente do tipo de relevo e condições meteorológicas presentes na região de estudo.

Considerando simulações em regiões de 1 600 km<sup>2</sup>, os resultados obtidos com o uso das ferramentas desenvolvidas e os pré-processadores do AERMOD, são similares e de acordo com o padrão de dispersão de contaminantes esperado, demonstrando assim que as ferramentas desenvolvidas podem ser usadas para simulações em regiões maiores e não limitando o seu uso só para regiões de alguns metros quadrados.

### **Recomendações e Trabalhos futuros.**

Recomendamos fazer testes em outras regiões para verificar a acurácia das ferramentas desenvolvidas para todos os tipos de relevo no Brasil e comparar os efeitos das mudanças nas características de superfície na dispersão dos contaminantes.

Fazer simulações em regiões que o pesquisador tenha os valores reais de medições feitas ao redor da fonte para conseguir fazer uma análise quantitativa dos resultados pontuais das simulações de concentração dos contaminantes. E analisar os pontos de mínima e máxima concentração disponibilizados pelo AERMOD.

Automatizar: a configuração do BPIPPRM aplicando as ferramentas de Google 3D e a detecção do tipo de uso do solo usando as imagens de satélite e ferramentas de inteligência artificial.

Testar o funcionamento das ferramentas desenvolvidas para outras regiões do mundo com imagens similares das usadas no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- AERMAP. User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor. EPA-454/B-18-004. Abril, 2018.
- AERMET. User's Guide for AERMOD Meteorological Preprocessor. EPA-454/B-19-028. Agosto, 2019.
- AERMINUTE. AERMINUTE User's Guide. EPA-454/B-15-006. Outubro, 2015.
- AERMOD a. User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD). EPA-454/B-19-027. Agosto, 2019.
- AERMOD b. Model Formulation and Evaluation. EPA-454/R-19-014. Agosto, 2019
- AERSURFACE. User's Guide for AERSURFACE Tool. EPA-454/B-20-008. Fevereiro 2020.
- ALMEIDA, Hermes Alves de. Climatologia aplicada à geografia. Editora da Universidade Estadual da Paraíba. ISBN EBOOK 978-85-7879-316-6. 2016. Disponível em: <http://editora.ifpb.edu.br/index.php/uepb/catalog/book/128>. Acesso em: fevereiro 2021.
- ALVES, Lise. Surge of respiratory illnesses in children due to fires in Brazil's Amazon region. The Lancet Respiratory Medicine, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 21-22, 2019. Elsevier BV. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s2213-2600\(19\)30410-2](http://dx.doi.org/10.1016/s2213-2600(19)30410-2). Acesso em: abril 2021.
- ANAGUANO, Mireya Gladys. Estudio y diseño de un prototipo de sistema de GPS diferencial móvil en tiempo real, para la localización de equipos ubicados a la intemperie para un área de cobertura de 10 km. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e telecomunicações) – Escuela Politécnica Nacional, Quito, Equador, 2018.
- ANDRE, Paulo Afonso de et al. Lean diesel technology and human health: a case study in six Brazilian metropolitan regions. Clinics, São Paulo, vol.67, n.6, pp.639-646, 2012. Disponível em: [https://doi.org/10.6061/clinics/2012\(06\)15](https://doi.org/10.6061/clinics/2012(06)15). Acesso em: fevereiro 2022.
- ANGELO, Claudio; RITTIL, Carlos. Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e Suas Implicações para as Metas do Brasil: 1970-2018. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG, 2019. Disponível em: [http://www.observatoriodoclima.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC\\_SEEG\\_Relatorio\\_2019pdf.pdf](http://www.observatoriodoclima.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC_SEEG_Relatorio_2019pdf.pdf). Acesso em: abril 2021.
- ARAUJO, Ivan Roberto Santos. Simulação da dispersão de poluentes atmosféricos e avaliação da qualidade do ar na área de abrangência do Distrito Industrial de Barcarena-PA. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com AMBRAPA-Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém – PA, 2012.

ARBEX, Marcos Abdo et al. The effect of air pollution on pneumonia-related emergency department visits in a region of extensive sugar cane plantations: A 30-month time-series study. Journal of Epidemiology and Community Health, v. 68, n. 7, p. 669-674, 2014. Disponível em: <http://jech.bmj.com/content/68/7/669.full.pdf+html>. Acesso em: janeiro 2022.

ARTAXO, Paulo et al. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. Journal Faraday Discussions, Vol 165, pp. 203-235, 2013 DOI: 10.1039/C3FD00052D. Disponível em: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2013/fd/c3fd00052d>. Acesso em: janeiro de 2022.

AUGUSTO, Matheus Ribeiro. Modelagem matemática da emissão e dispersão do gás sulfídrico aplicada ao tratamento anaeróbico de água residuárias. 2015. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. Dezembro, 2015

BARBOSA, Illelson Rafael da Silva. Estudo da variabilidade e comparação dos métodos de estimativa da camada limite atmosférica na Amazônia Central. 2018. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande – PB, junho-2018.

BPIPPRM. User's Guide to the Building Profile Input Program. EPA-454/R-93-038. Fevereiro, 1995.

BRAGA, Alféio Luís Ferreira. et al. Associação Entre Poluição Atmosférica e Doenças Respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil. Cadernos de Saúde Pública, v. 23, Suppl. 4, S570-S578, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2007001600017>. Acesso em: junho 2020.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução n. 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 de jan. 2007. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=113047>. Acesso em: junho 2020.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução n. 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 de nov. 2018. Disponível em: [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895). Acesso em: junho 2020.

BUHR, Fabio Andre. Análise sazonal da dispersão de odores de uma estação de tratamento de efluentes de Portugal. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico, Santa Catarina, 2010.

CANÇADO, José E D et al. The Impact of Sugar Cane–Burning Emissions on the Respiratory System of Children and the Elderly. Environmental Health Perspectives, v. 114, n. 5, p. 725-729, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.8485>. Acesso em: junho 2021.

CARBONELL, Leonor Turtos. *et al.* Estimation of the mixing height in Casablanca from parametrisations of surface data. Eco Solar (17), 2016. Disponível em

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar17/HTML/articulo04.htm>. Acesso em: abril 2022.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. Emissões relativas de poluentes do transporte urbano. Boletim Regional, Urbano e Ambiental - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011. Disponível em <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/5574>. Acesso em: agosto 2020.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1990. Resolução nº 3, 28 de Junho de 1990. Ministério do Meio Ambiente.

CORRÊA, Carine. Setor de Transporte é o que causa mais impactos na qualidade do ar. Ministério do Meio Ambiente, 2010. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/6191-setor-de-transporte-e-o-que-causa-mais-impactosna-qualidade-do-ar>. Acesso em: setembro 2022.

CRIPPA et al. Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR). Release version 5.0, 2019. Disponível em: <https://data.jrc.ec.europa.eu/collection/EDGAR>. Acesso em: setembro 2022.

DAPPER, Steffani Nikoli; SPOHR, Caroline; ZANINI, Roselaine Ruviaro. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. Metrópole E Saúde, Estudos Avançados 30 (86), 2016. DOI: 10.1590/S0103-40142016.00100006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/3bgQL4DTXtpQFn7nYRQMJz/?lang=pt>. Acesso em: setembro 2021.

GOOGLE MAPS. Juiz de Fora. 2022. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/21%C2%B037'26.4%22S+43%C2%B028'10.2%22W/@-21.624,-43.4716887,801m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x0:0xa76503690af2635d!8m2!3d-21.624!4d-43.4695?hl=pt-BR&authuser=0>. Acesso em: junho, 2022.

GRANATO, Marcela. Avaliação da direção preferencial da dispersão de poluentes para diferentes estações do ano na área industrial de Juiz de Fora – MG. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

IBGE. Cobertura e uso da terra. IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: junho 2021.

INMETa. Dados meteorológicos. [Juiz de Fora]. INMET, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: julho 2022.

INMETb. Dados meteorológicos. [Belém]. INMET, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: julho 2022.

INSTITUTO ASTRONÔMICO E GEOFÍSICO – USP. Investigando a Terra 2000. A Meteorologia. Processos Atmosféricos da Poluição Ambiental. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/siae98/meteorologia/poluicao.htm>. Acesso em: 3 de agosto de 2021.

INSTITUTO DE SAÚDE E SUSTENTABILIDADE - ISS. Avaliação do impacto da implementação da fase P-8 do Proconve para a frota de veículos pesados na saúde pública com sua respectiva valoração econômica em seis regiões metropolitanas brasileiras. Disponível em: < [https://www.saudeesustentabilidade.org.br/wp-content/uploads/2019/06/PROCONVE\\_ISS\\_IC\\_S\\_2019.pdf](https://www.saudeesustentabilidade.org.br/wp-content/uploads/2019/06/PROCONVE_ISS_IC_S_2019.pdf) >. Acesso em: agosto de 2019.

LIU, Lixia et al. Impact of biomass burning aerosols on radiation, clouds, and precipitation over the Amazon during the dry season: dependence of aerosol-cloud and aerosol-radiation interactions on aerosol loading. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, v.20, pp. 13283-13301, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-2020-191>. Acesso em: outubro 2022.

MARINHA. Escala Beaufort. 2015. Disponível em: [https://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/refer/escala\\_beaufort.htm](https://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/refer/escala_beaufort.htm). Acesso em: 04 novembro 2022.

MOREIRA, Davidson; TIRABASSI, Tiziano. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera. Ambiente & Sociedade - Vol. VII n. 2 jul./dez. 2004.

NEPSTAD, Daniel, et al. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. Forest Ecology and Management, v. 154, pp. 395-407, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00511-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00511-4). Acesso em: dezembro 2021.

OLIVEIRA, Paulo H. F. et al. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO<sub>2</sub> flux in Amazonia. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, v. 59, pp. 338-349, 2007. Disponível em: <http://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00270.x>. Acesso em: setembro 2021.

OSGEO. LibGeoTiff: Repositório oficial da biblioteca. Disponível em: <https://github.com/OSGeo/libgeotiff>. Acesso em: junho 2021.

REDDINGTON, Carly Lauren et al. Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in Brazil. Nature Geoscience, v. 8, n. 10, p. 768-771, 2015. Disponível em: <http://doi.org/10.1038/ngeo2535>. Acesso em: agosto 2022.

REVISTA ALUMÍNIO. Barcarena: a cidade da Amazônia que virou polo industrial de alumínio. 28 de abril de 2021. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/barcarena-a-cidade-da-amazonia-que-viceu-polo-industrial-de-aluminio/>. Acesso em: abril , 2023.

ROSA, Alessandra Faedrich Martins. Modelagem da Concentração de Dióxido de Enxofre na Região de Candiota RS utilizando o modelo AERMOD. 2012. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia - CEPSSRM, Rio Grande do Sul, agosto 2012.

SCRAM - Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling. Modelo AERMOD. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>. Acesso em: janeiro 2021.

SEWELL, Granville H. Administração e o Controle da Qualidade Ambiental. São Paulo, EPU, EDUSP, CETESB, 295p. 1978.

SHEPPARD, P. A., 1956: Airflow over mountains. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 82, pp. 528-529, 1956. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.49708235418>. Acesso em: março 2021.

SILVA, Pâmela R. de Souza. et al. High risk of respiratory diseases in children in the fire period in Western Amazon. Revista de Saúde Pública, v. 50, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1518-8787.2016050005667>. Acesso em: setembro 2021.

SIMONI, Walter Figueiredo de. et al. O Estado da Qualidade do Ar no Brasil. Working Paper, WRI Brasil. São Paulo, Brasil. Disponível em <https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-o-estado-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf>. Acesso em: setembro 2021.

SNYDER, William H. et.al. The structure of the strongly stratified flow over hills: Dividing streamline concept. Journal of Fluid Mechanics, v. 152, pp. 249-288, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0022112085000684>. Acesso em: maio 2022.

SPEKTOR, Dalia M. et al. Effects of Heavy Industrial Pollution on Respiratory Function in the Children of Cubatão, Brazil: a preliminary report. Environmental Health Perspectives, v. 94, pp. 51-54, 1991. JSTOR. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/ehp.94-1567962>. 1991. Acesso em: maio 2022.

STINGELIN, Fernanda de Souza. et al. Modelagem de dispersão de poluentes em uma avenida de Aracaju – SE. In: XIII Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas. Anais [..]. Setembro de 2016. Disponível em: [www.meioambientepocos.com.br](http://www.meioambientepocos.com.br). Acesso em: junho 2020.

TOPODATA. Base de dados Geomorfológicos. 2021. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 17 de junho 2021.

USGS. United States Geological Survey. The National Map. 2021. Disponível em: <http://nationalmap.gov/>. Acesso em: junho 2021.

VERGNHANINI, Renato. Emissão de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) na combustão industrial. Revista IPT | Tecnologia e Inovação v.4, n.14, pp.65-76, 2020. DOI 10.34033/2526-5830-v4n14-5. Acesso em: abril 2023.

VORMITTAG, Evangelina. et al. Assessment and Valuation of Public Health Impacts from Gradual Biodiesel Implementation in the Transport Energy Matrix in Brazil. Aerosol and Air Quality Research, v. 18, n. 9, pp. 2375-2382, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0449>. Acesso em: fevereiro 2022.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação. Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia. 2004.ISBN 978-85-63843-02-9. Disponível em <http://www.ufrgs.br/labgeo>. Acesso em: janeiro de 2022.

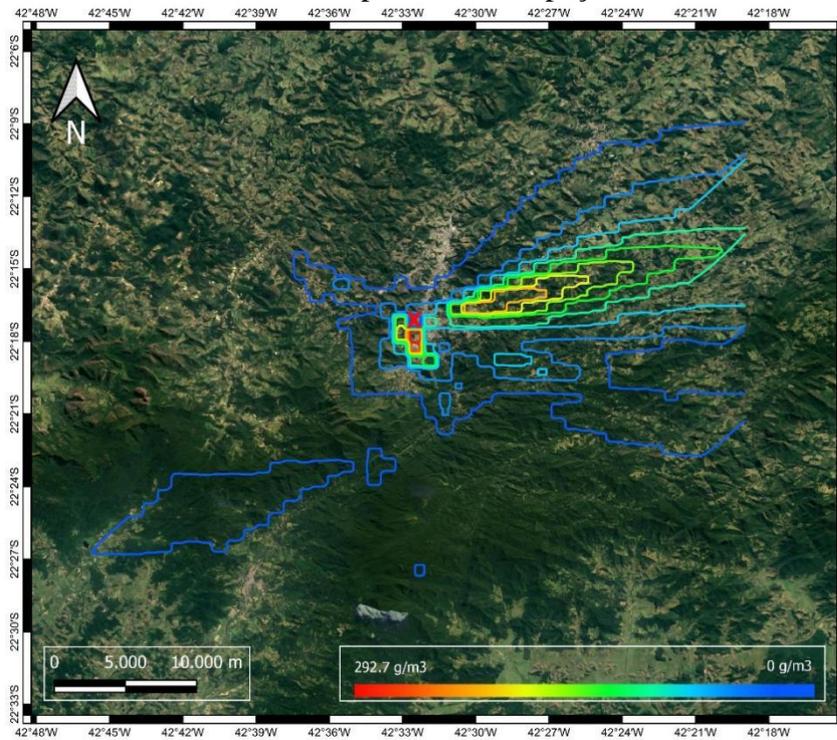
**APÊNDICE A** – Trabalhos apresentados em congressos e publicações.

<b>Nome</b>	<b>Publicação</b>	<b>Data</b>
Adaptações aos pré-processadores do modelo AERMOD para simular a dispersão de poluentes atmosféricos com dados públicos brasileiros.	Anais: XXIV Encontro Nacional de Modelagem Computacional	Outubro, 2021
Modelo AERMOD para dispersão de poluentes atmosféricos, adaptações para seu uso com dados públicos brasileiros	Anais: Simpósio em Clima, Água, Energia e Alimentos	Outubro, 2021
Desenvolvimento de ferramentas para usar os dados públicos brasileiros na simulação da dispersão de contaminantes com o modelo AERMOD	Anais: XXIV Encontro Nacional de Modelagem Computacional	Outubro, 2022
Desenvolvimento de ferramentas para modelar a dispersão de contaminantes atmosféricos com dados públicos brasileiros usando o modelo AERMOD	Revista Brasileira de Climatologia	Dezembro, 2022

**APÊNDICE B** – Dispersão do gás SO<sub>2</sub> considerando uma fonte pontual localizada no Instituto Politécnico - IPRJ e com grade quadrada de 1600 pontos e espaçamento de 1km.

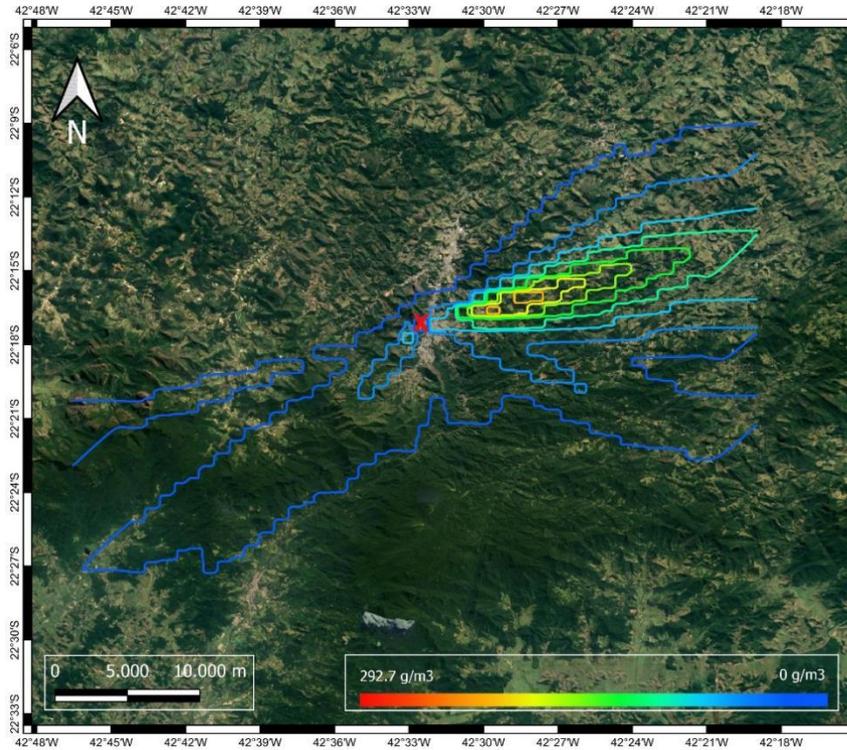
Pode se observar um padrão de dispersão do gás SO<sub>2</sub> durante 24 horas, com as concentrações máximas representadas pelas linhas de cor vermelha, na medida que diminui a concentração, esta é representada pelas cores laranja, amarelo, verde, e a cor azul representando concentrações próximas de 0. E com um “X” vermelho encontra-se representada a localização da fonte usada para esta simulação.

Figura 27 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 28 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte no Instituto Politécnico - IPRJ. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km.

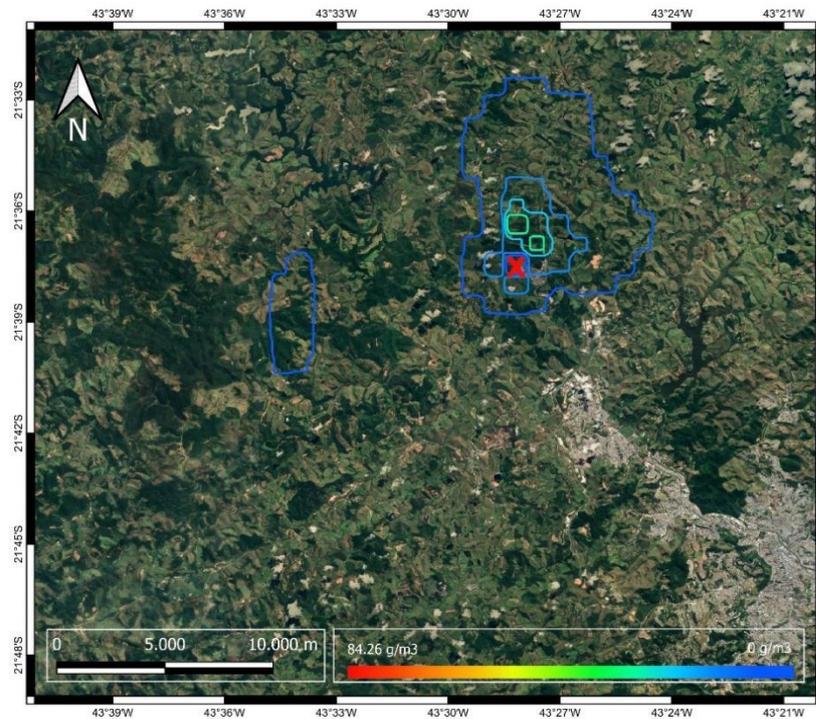


Fonte: O autor, 2022.

**APÊNDICE C** – Dispersão do gás SO<sub>2</sub> considerando uma fonte pontual localizada na zona industrial de Juiz de Fora e com grade quadrada de 1600 pontos e espaçamento de 1km.

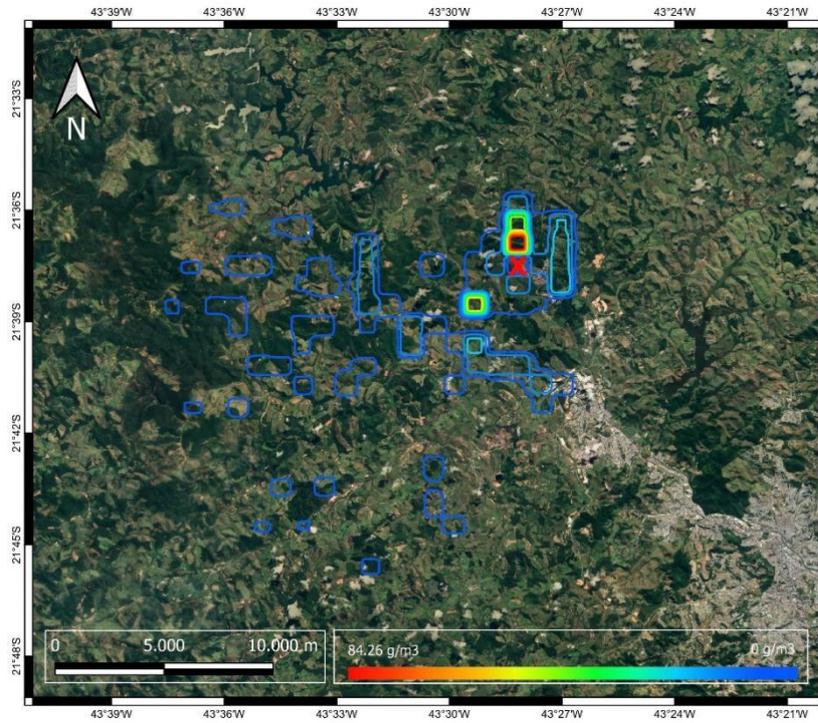
Pode se observar um padrão de dispersão do gás SO<sub>2</sub> durante 24 horas, com as concentrações máximas representadas pelas linhas de cor vermelha, na medida que diminui a concentração, esta é representada pelas cores laranja, amarelo, verde, e a cor azul representando concentrações próximas de 0. E com um “X” vermelho encontra-se representada a localização da fonte usada para esta simulação.

Figura 29 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 30 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte na zona industrial de Juiz de Fora. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km.

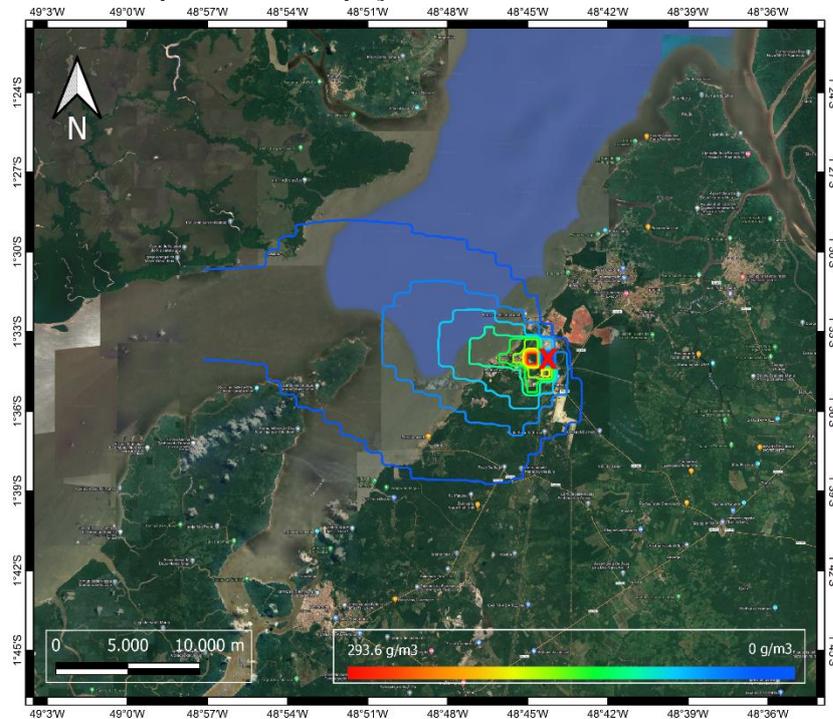


Fonte: O autor, 2022.

**APÊNDICE D** – Dispersão do gás SO<sub>2</sub> considerando uma fonte pontual localizada em Barcarena e com grade quadrada de 1600 pontos e espaçamento de 1km.

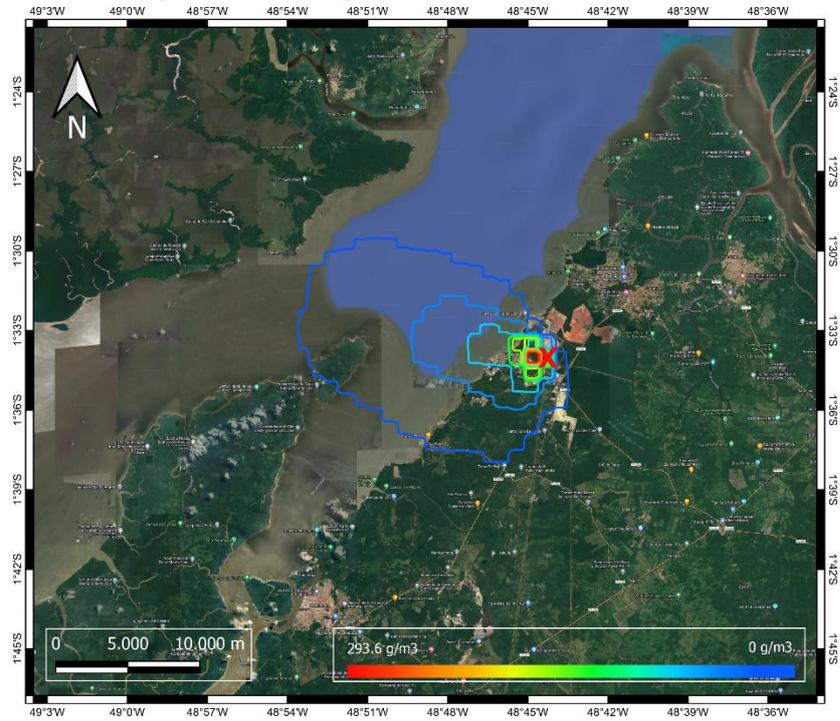
Pode se observar um padrão de dispersão do gás SO<sub>2</sub> durante 24 horas, com as concentrações máximas representadas pelas linhas de cor vermelha, na medida que diminui a concentração, esta é representada pelas cores laranja, amarelo, verde, e a cor azul representando concentrações próximas de 0. E com um “X” vermelho encontra-se representada a localização da fonte usada para esta simulação.

Figura 31 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados dos pré-processadores do AERMOD e as imagens do USGS, com fonte em Barcarena. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 32 - Dispersão de SO<sub>2</sub> considerando os resultados das ferramentas desenvolvidas e as imagens da UFRGS, com fonte em Barcarena. Grade de 1600 pontos com espaçamento de 1km.



Fonte: O autor, 2022.

## APÊNDICE E – Pseudocódigo para converter pontos de coordenadas geográficas a UTM.

### INÍCIO

Algoritmo “Cálculo da geometria do elipsoide”

Constantes:

a\_mai = 6378137.000000;

b\_men = 6356752.31414;

Variáveis:

excentr1, excentr2, excentr2\_2, c, alfa\_achat: Real

excentr1 = (sqrt(pow(a\_mai, 2) - pow(b\_men, 2))) / a\_mai;

excentr2 = (sqrt(pow(a\_mai, 2) - pow(b\_men, 2))) / b\_men;

excentr2\_2 = pow(excentr2, 2);

c = pow(a\_mai, 2) / b\_men;

alfa\_achat = (a\_mai - b\_men) / a\_mai;

Fimalgoritmo “Cálculo da geometria do elipsoide”

Algoritmo “Cálculo do fuso horário”

Variáveis:

fuso: Inteiro

fuso = (longitude / 6) + 31;

Fimalgoritmo “Cálculo do fuso horário”

Algoritmo “Transformar de graus para radianes”

Constante:

pi = 3.14159265358979323846;

Variáveis:

fi, lambda, lambda\_0, delta\_lambda: Real;

lambda\_0\_graus: Inteiro;

fi = latitude \* pi / 180;

lambda = longitude \* pi / 180;

lambda\_0\_graus = fuso \* 6 - 183;

lambda\_0 = lambda\_0\_graus \* pi / 180;

delta\_lambda = lambda - lambda\_0;

Fimalgoritmo “Transformar de graus para radianes”

Algoritmo “Equações de Coticchia-Surace para o problema direto”

Constantes:

fep\_utm = 0.9996;

Variáveis:

A, xi, eta, ni, zeta, A\_1, A\_2, J\_2, J\_4, J\_6, alfa, beta, gamma, B\_fi, X, Y: Real

A = cos(fi) \* sin(delta\_lambda);

xi = 0.5 \* log((1 + A) / (1 - A));

eta = atan(tan(fi) / cos(delta\_lambda)) - fi;

ni = (c \* fep\_utm) / (sqrt(1 + excentr2\_2 \* pow(cos(fi), 2)));

zeta = 0.5 \* excentr2\_2 \* pow(xi, 2) \* pow(cos(fi), 2);

```

A_1 = sin(2 * fi);
A_2 = A_1 * pow(cos(fi), 2);
J_2 = fi + 0.5 * A_1;
J_4 = (3 * J_2 + A_2) / 4;
J_6 = (5 * J_4 + A_2 * pow(cos(fi), 2)) / 3;
alfa = 3 * excentr2_2 / 4;
beta = (5 * pow(alfa, 2)) / 3;
gamma = (35 * pow(alfa, 3)) / 27;
B_fi = fep_utm * c * (fi - alfa * J_2 + beta * J_4 - gamma * J_6);

```

```

X = xi * ni * (1 + (zeta / 3)) + 500000;
Y = eta * ni * (1 + zeta) + B_fi;

```

SE (hemisferio sul)

```
Y = Y + 10000000;
```

FIMSE

Escrever (X “,” Y);

Fimalgoritmo “Equações de Coticchia-Surace para o problema direto”

FIM

**ANEXO** – Classificação de Köppen-Geiger.

A classificação climática de Köppen-Geiger, utiliza como critérios discriminantes à temperatura do ar e a precipitação pluvial. Nessa classificação, foram descritos cinco grupos básicos de clima, identificados pelas letras maiúsculas A, B, C, D, E. Estes grupos, juntamente com onze subtipos, constituem a fórmula climática. (ALMEIDA, 2016)

Grupo		Tipo		Subtipo	
A	Tropical	f	Equatorial	-	-
		m	de monção	-	-
		w	de savana	-	-
		s		-	-
B	Seco	w	Árido	h	quente
				k	frio
		s	Semiárido	h	quente
				k	frio
C	Temperado	f	Sem estação seca	a	Verão quente
				b	Verão fresco
				c	Verão frio
		w	Inverno seco	a	Verão quente
				b	Verão fresco
				c	Verão frio
		s	Verão seco	a	Verão quente
				b	Verão fresco
				c	Verão frio
D	Continental e Subártico	f	Sem estação seca	a	Verão quente
				b	Verão fresco
				c	Verão frio
				d	Inverno muito frio
		w	Inverno seco	a	Verão quente
				b	Verão fresco
		c	Verão frio		

				d	Inverno muito frio
		s	Verão seco	a	Verão quente
				b	Verão fresco
				c	Verão frio
				d	Inverno muito frio
E	Polar e Alpino	T	Tundra	-	-
		F	Glacial (calota de gelo)	-	-