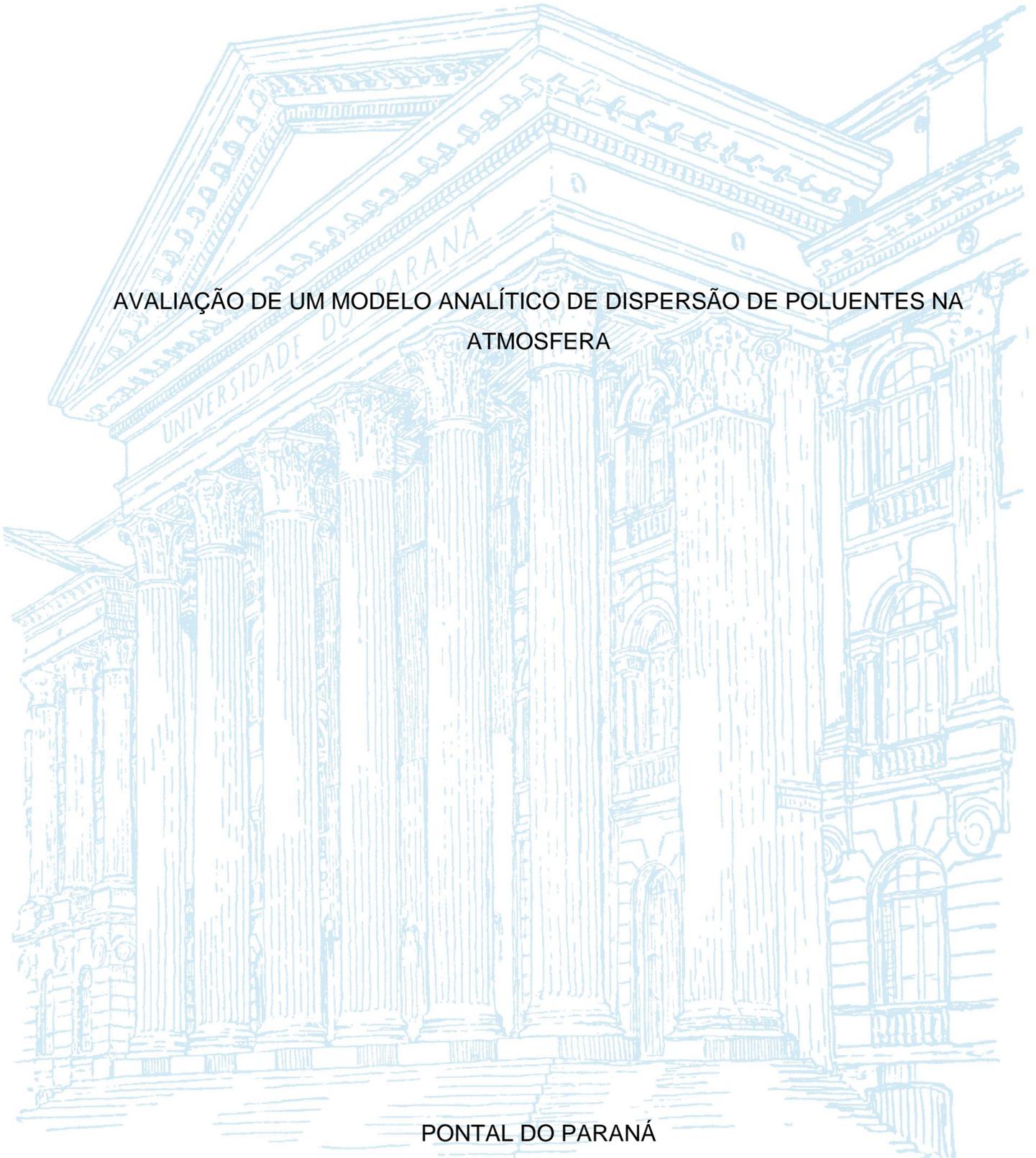


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THIAGO MENDES DIAS

AVALIAÇÃO DE UM MODELO ANALÍTICO DE DISPERSÃO DE POLUENTES NA  
ATMOSFERA



PONTAL DO PARANÁ

2022

THIAGO MENDES DIAS

**AVALIAÇÃO DE UM MODELO ANALÍTICO DE DISPERSÃO DE POLUENTES NA  
ATMOSFERA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada para a disciplina TCC II, curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silveira Armani.

PONTAL DO PARANÁ

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Avenida Deputado Anibal Khury, 2033, - Bairro Balneário Pontal do Sul, Pontal do Paraná/PR, CEP 83255-976  
Telefone: 4135118600 - <http://www.ufpr.br/>

## TERMO

### TERMO DE APROVAÇÃO

Thiago Mendes Dias

#### “AVALIAÇÃO DE UM MODELO ANALÍTICO DE DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA.”

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal do Paraná, pela Banca formada pelos membros:

João Carlos de Oliveira

Prof. Dr. Virnei Silva Moreira - CPP-CEM/UFPR

Prof<sup>o</sup> Dr. Fernando Augusto Silveira Armani - CPP-CEM/UFPR  
Presidente

Pontal do Paraná, 13 de Maio de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **FERNANDO AUGUSTO SILVEIRA ARMANI, COORDENADOR(A) DE CURSO DE GRADUACAO (CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITARIA) - PP**, em 22/07/2022, às 13:55, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **VIRNEI SILVA MOREIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/07/2022, às 14:15, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JOÃO CARLOS DE OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 03/08/2022, às 10:46, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **4724600** e o código CRC **22D9CF20**.

---

Rua XV de Novembro, 1299 - Centro - CEP: 80.060-000 - Curitiba-PR  
Fone (41) 3360-5187 - E-mail: [contratos@ufpr.br](mailto:contratos@ufpr.br)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me guiar, abençoar e fortalecer nesta etapa tão importante em minha vida, me concedendo saúde, paciência e perseverança.

Aos meus pais Rosana das Neves Mendes e Gabriel Dias Neto, pelo apoio e incentivo recebido em todas as minhas decisões e principalmente pelo carinho, amor e inspiração. Também pela compreensão nos momentos em que estive ausente.

À minha irmã Andressa Boscheroli e minha sobrinha Bianca Boscheroli Torrão, que transformaram dias difíceis mais leves e alegres.

À minha companheira Roberta de Oliveira Duszeiko, por todo apoio, amor, carinho, incentivo e paciência dedicados a mim ao longo desta trajetória e por estar sempre presente, dando todo suporte necessário. Também a sua família pelo acolhimento e conforto. Obrigado por tudo!

Ao meu amigo Luiz Ricardo A. Ferreira, pelas trocas mútuas de conhecimento, pela dedicação, convívio e paciência.

Ao professor orientador Dr. Fernando Augusto Silveira Armani pelo tempo dedicado, ensinamentos, conselhos e paciência ao longo da elaboração deste estudo. Muito obrigado!

À Universidade Federal do Paraná e o seu corpo docente pelo suporte, pelos conhecimentos transmitidos e toda dedicação que tanto contribuíram nesta etapa e para que este resultado fosse alcançado.

A todos os amigos que de alguma forma contribuíram para que este objetivo fosse alcançado, direta e indiretamente. Obrigado!

Thiago Mendes Dias

“As pessoas mais criativas são motivadas pelos maiores desafios que se apresentam diante deles”.  
(Niel deGrasse Tyson)

## RESUMO

O presente estudo apresenta uma avaliação da qualidade de previsão de um modelo analítico bidimensional de dispersão de poluentes atmosféricos. Para verificar a capacidade de previsão do modelo foi utilizado o banco de dados do experimento de campo Projeto *Prairie Grass* realizado na cidade de O'neill, Estado do Nebraska - EUA, em um sítio com topografia plana, onde os lançamentos foram atribuídos na altura de 0,5 metros e monitorados em 540 amostradores dispostos em arcos cujo centro era o ponto de lançamento do traçador SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre). Foram simulados doze lançamentos do experimento, seis em condições instáveis e seis em condições estáveis da atmosfera. O modelo em geral superestima as concentrações medidas, tanto em condições estáveis quanto em condições instáveis da atmosfera, mas previu melhor os lançamentos realizados em condições instáveis. Com base nos resultados das simulações, uma correção empírica foi proposta para as equações do modelo.

**Palavras chaves:** Pluma Gaussiana; poluição atmosférica; Modelos de dispersão.

## **ABSTRACT**

The present study presents an assessment of the predictive quality of a two-dimensional air pollutant dispersion analytical model. To verify the predictive capacity of the model, the database of the Prairie Grass Project field experiment was used, carried out in the city of O'Neill, State of Nebraska - the USA, in a site with flat topography, where the releases were assigned at the height of 0.5 meters and monitored in 540 samplers arranged in arcs whose center was the launch point of the SO<sub>2</sub> (sulfur dioxide) tracer. Twelve launches were simulated, six under unstable conditions and six under stable atmospheric conditions. The model generally overestimates the measured concentrations, both in stable and unstable conditions of the atmosphere, but it better predicts the launches carried out in unstable conditions.

Keywords: Gaussian plume; atmospheric pollution; dispersion models.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LANÇAMENTOS AVALIADOS DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	24
FIGURA 2 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 25 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	28
FIGURA 3 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE A-B COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDADA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA. ....	29
FIGURA 4 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 27 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	30
FIGURA 5 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 30 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	30
FIGURA 6 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 33 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	31
FIGURA 7 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE C COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDADA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA. ....	32
FIGURA 8 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 33 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	33
FIGURA 9 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 37 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	34
FIGURA 10 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 38 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	34
FIGURA 11 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE C COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDADA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA. ....	35
FIGURA 12 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 36 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	36
FIGURA 13 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DO LANÇAMENTO 36 COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDADA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA.....	37

FIGURA 14 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 32 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> . .....	39
FIGURA 15 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 40 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> . .....	39
FIGURA 16 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 41 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> . .....	40
FIGURA 17 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE E COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDADA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA. ....	41
FIGURA 18 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 43 DO PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> . .....	43
FIGURA 19 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE B-C COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDADA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA. ....	44

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA DE PASQUILL (1961)/ GIFFORD (1976).....	22
TABELA 2 - PARÂMETROS DE DISPERSÃO EM CONDIÇÕES RURAIS.....	23
TABELA 3 - PARÂMETROS DE DISPERSÃO EM CONDIÇÕES URBANAS.....	23
TABELA 4 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE COMPARAÇÃO DOS LANÇAMENTOS ANALISADOS DO EXPERIMENTO DE CAMPO <i>PRAIRIE GRASS</i> . ....	27
TABELA 5 - COMPARAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA O LANÇAMENTO DE CLASSE A-B.....	29
TABELA 6 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA OS LANÇAMENTOS DE CLASSE C. ....	33
TABELA 7 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA OS LANÇAMENTOS DE CLASSE D. ....	36
TABELA 8 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA O LANÇAMENTO 36. ....	38
TABELA 9 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA OS LANÇAMENTOS DE CLASSE E. ....	42
TABELA 10 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA O LANÇAMENTO DE CLASSE B-C. ....	44
TABELA 11 - COEFICIENTES DE CORREÇÃO DO MODELO GAUSSIANO DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE ACORDO COM A CLASSE DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA.....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

- CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
- EPA - *Environmental Protection Agency*
- FEEMA - Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
- ISC - *Industrial Source Complex Model*
- MODELAR - Modelo Regulatório de Qualidade do Ar do Estado do Paraná
- OMS - Organização Mundial da Saúde
- PRONAR - Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $c$  - Concentração estimadas
- $C_o$  - Valores observados
- $C_p$  - Valores preditos
- $EA$  - Erro absoluto
- $ER$  - Erro relativo
- $FA2$  - Fator de dois
- $FS$  - Desvio Fracional
- $h$  - Altura do lançamento
- $q$  - Taxa de emissão do poluente na fonte emissora
- $\bar{u}$  - Velocidade média do vento
- $T$  - Fator de correção determinado através do coeficiente angular da reta de acordo com a classe de estabilidade atmosférica
- $x$  - Direção do sistema cartesiano de coordenadas
- $X_e$  - Valor estimado
- $X_i$  - Valor exato
- $y$  - Direção do sistema cartesiano de coordenadas
- $z$  - Direção do sistema cartesiano de coordenadas
- $\sigma_y$  - Coeficiente de dispersão horizontal do modelo Gaussiano
- $\sigma_z$  - Coeficiente de dispersão vertical do modelo Gaussiano

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.2.1 Objetivo geral .....	16
1.2.2 Objetivo específico .....	16
<b>2 REVISÃO TEÓRICA-EMPÍRICA .....</b>	<b>17</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
3.1 PROJETO <i>PRAIRIE GRASS</i> .....	24
3.2 CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO .....	24
<b>4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>46</b>
<b>LISTA DE REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A concentração de poluentes na atmosfera variou significativamente desde a revolução industrial: entre o final do século XVIII e início do século XIX, a revolução industrial, que se iniciou na Europa, substituiu os processos manufaturados por máquinas a vapor que exigiam combustíveis (VIEIRA, 2009). Naquela época o carvão mineral era muito utilizado, principalmente em processos da indústria siderúrgica (MARRIOTT, 2016). O carvão é composto principalmente por moléculas de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, e, quando queimado, emite para a atmosfera gases e partículas de fuligem (BRAGA *et al.*, 2001).

No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA foi instituído pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente. Este conselho é responsável pela criação de normas e diretrizes para a emissão de poluentes atmosféricos. Por intermédio da Resolução CONAMA nº 005 de 15 de junho de 1989, que dispõe sobre o PRONAR - Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar, que é complementado pela Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, que dispõe sobre os padrões de qualidade ar, foram estabelecidos padrões de qualidade do ar a fim de reduzir eventos de poluição atmosférica.

Em âmbito estadual, no Estado do Paraná, o principal órgão fiscalizador, licenciador e que monitora a qualidade do ar é o Instituto de Água e Terra, vinculado à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo. Esse órgão foi instituído no ano de 2019, e é uma junção do Instituto Ambiental do Paraná com o Instituto de Terras, Cartografia e Geologia e o Instituto das Águas do Paraná.

Uma ferramenta utilizada no licenciamento ambiental de atividades emissoras de poluentes atmosféricos é a modelagem matemática. Os modelos matemáticos são usados em estudos de dispersão de poluentes atmosféricos, principalmente para fins regulatórios, tal como no licenciamento ambiental, monitoramento e gestão da qualidade do ar (BARBON; GOMES, 2010). Os modelos de qualidade do ar simulam a dispersão de poluentes emitidos por fontes antrópicas, para se prever a qualidade do ar de uma região (TADANO *et al.*, 2010). Existem modelos de dispersão de poluentes atmosféricos desenvolvidos para estimar as concentrações de poluentes atmosféricos emitidos por fontes móveis (veículos

automotores) e por fontes pontuais (chaminés ou dutos) (GADELHA, 2016). Os modelos permitem a avaliação prévia de um possível impacto ambiental, permitindo antecipar a tomada de decisões, a fim de reduzir e evitar esses impactos (MOREIRA; TIRABASSI, 2004).

Os modelos podem ser classificados em numéricos e analíticos. Os modelos analíticos têm sua capacidade de previsão reduzida, pois a solução matemática é baseada em hipóteses que simplificam os processos físicos e químicos na atmosfera (MOREIRA; TIRABASSI, 2004). Já os modelos numéricos são geralmente mais complexos, visto que podem ser mais abrangentes, incorporando mais detalhes na descrição dos processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera, conseqüentemente, geralmente acertam mais as previsões (BRAGA *et al.*, 2004). No entanto, o tempo de processamento dos modelos numéricos é maior do que dos modelos analíticos, e isso deve ser levado em consideração, uma vez que na modelagem deve-se simular diversos cenários da atmosfera para que de fato a dispersão em questão represente uma determinada região.

Este estudo apresenta a avaliação da capacidade de previsão de um modelo analítico de dispersão de poluentes atmosféricos, comparando concentrações simuladas por esse modelo com concentrações medidas em um experimento realizado em campo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

No âmbito nacional e internacional existem normas de controle que estabelecem parâmetros de qualidade do ar com o propósito de assegurar o bem-estar da população e do meio ambiente. A Organização Mundial da Saúde (OMS) propõe a países desenvolvidos e a países em desenvolvimento, medidas para a redução das emissões de compostos químicos prejudiciais à saúde humana na atmosfera (DANNI-OLIVEIRA, 2008).

Um modelo muito empregado em estudos de dispersão de poluentes atmosféricos emitidos por fontes pontuais, simples de implementar e com baixo custo computacional é o modelo de pluma Gaussiana; através da função de distribuição gaussiana, esse modelo simula a concentração de poluentes na atmosfera (CEZANA, 2007, MARTINS *et al.*, 2015).

A capacidade de previsão dos modelos varia com as condições da atmosfera, com os tipos de poluentes emitidos, etc.; logo, é fundamental que as limitações dos modelos sejam bem definidas para se conhecer em quais cenários as previsões são confiáveis.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O estudo tem o intuito de avaliar um modelo matemático de dispersão de poluentes atmosféricos, solução analítica da equação de advecção difusão no plano.

### 1.2.2 Objetivo específico

Para alcançar o objetivo geral foram definidos quatro objetivos específicos, sendo eles: A análise dos dados do experimento de campo Projeto *Prairie Grass*; a seleção de lançamentos realizados em condições instáveis e estáveis da atmosfera; implementação de um modelo analítico de dispersão de poluentes atmosféricos bidimensional; e a avaliação da qualidade de previsão do modelo comparando com os dados medidos no experimento de campo de *Prairie Grass*.

## 2 REVISÃO TEÓRICA-EMPÍRICA

Após o grande impulso tecnológico causado pela revolução industrial, os principais centros urbanos do início do século XX estavam situados na Europa e ao norte da América. Em cidades localizadas nessas regiões surgiram os primeiros episódios de poluição excessiva, onde a elevada concentração de partículas em suspensão e de gases, somados a condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão atmosférica, produziram impactos ambientais e doenças respiratórias nos seres humanos, chegando até mesmo a casos de morte (BRAGA *et al.*, 2001).

Em 1955 o governo norte americano iniciou as primeiras pesquisas envolvendo a poluição do ar. Na década de 1960 surgiu o primeiro programa federal de poluição atmosférica dos Estados Unidos, em que o governo americano estabeleceu os primeiros padrões de qualidade do ar (BRAGA *et al.*, 2001). Com o intuito de assegurar a qualidade do meio ambiente, criou-se a *Environmental Protection Agency* (EPA), que desenvolve, entre outras coisas, metodologias para o controle e monitoramento da qualidade do ar, referência em nível mundial (DANNI-OLIVEIRA, 2008).

No Brasil, a primeira legislação relacionada à poluição do ar, das águas e do solo foi o Decreto-Lei nº 1.413 de 14 de agosto de 1975, que dispõe de normas de gestão e controle da poluição ambiental provenientes das atividades industriais. Posteriormente, no ano de 1981 foi criado o Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, órgão federal responsável pela adoção de normas e parâmetros ambientais. O CONAMA estabelece diretrizes para o monitoramento e controle da poluição atmosférica, tal como a definição dos padrões de qualidade do ar.

Atualmente, no Brasil, a resolução que dispõe sobre os padrões de qualidade do ar é a CONAMA nº 491 de 2018, que atualiza as concentrações padrão estabelecidas na Resolução CONAMA nº 003/1990 e as classificações de qualidade do ar estabelecidas na Resolução do CONAMA nº 005/1989.

A dispersão de um poluente atmosférico pode variar com diversos fatores, como por exemplo da topografia e das condições meteorológicas da região onde o poluente foi emitido.

Na atmosfera, a dispersão de uma pluma de poluentes é dada por fatores de turbulência causada pelo vento e por convecção devido ao aquecimento da

superfície terrestre pela radiação solar. Desta forma, as substâncias da pluma são transportadas por um processo advectivo-difusivo que são comumente representados pela função de distribuição de probabilidades Gaussiana (HOLMES; MORAWSKA, 2006).

A mensuração dos impactos dos poluentes atmosféricos na qualidade do ar está diretamente ligada às concentrações de substâncias descartadas por unidade de tempo, variável denominada taxa de emissão, e é geralmente realizada por modelos físicos e modelos matemáticos (GADELHA, 2016). Os modelos físicos são baseados em ensaios laboratoriais que utilizam túnel de vento para simular uma região em escala reduzida a fim de estimar a concentração de poluentes atmosféricos ou desenvolver modelos empíricos de qualidade do ar (BOÇON, 1998). Já os modelos matemáticos buscam representar matematicamente os processos físicos da atmosfera a fim de simular o ambiente real (ALMEIDA *et al.*, 2011, BARBOSA, 2009).

A modelagem matemática atualmente é umas das principais ferramentas nos estudos que envolvem o deslocamento de um poluente na atmosfera. As pesquisas desenvolvidas utilizando os modelos de pluma gaussiana têm sido amplamente aplicadas para fins regulatórios e em estudos ambientais como por exemplo na gestão no monitoramento da qualidade do ar e na identificação de áreas adequadas para abrigar complexos industriais (TADANO *et al.*, 2010). O modelo de pluma gaussiana é um dos modelos mais utilizados na previsão da concentração de poluentes na camada atmosférica, além de servir como base para muitos outros modelos (GUPTA; BARIAR, 2006).

A simulação da dispersão de poluentes emitidos na atmosfera por uma fonte fixa pode ser relacionada com a curva de distribuição gaussiana no eixo horizontal e no eixo vertical (MOREIRA; TIRABASSI, 2004, HOLMES; MORAWSKA, 2006). Buscando obter uma previsão mais precisa para o modelo Gaussiano, deve-se considerar sua aplicação em ambientes mais próximos das hipóteses adotadas no modelo, como terreno com topografia plana ou com baixa variação de altitude, velocidade do vento constante, direção do vento constante e a turbulência atmosférica estacionária (ERMAK, 1977, SHARAN *et al.*, 1996, MELO *et al.*, 2016, CAPUTO *et al.*, 2004).

Na literatura há muitos estudos que buscam validar modelos de qualidade do ar com experimentos de campo. Armani *et al.* (2014) compararam as concentrações simuladas pelo modelo analítico AERMOD com um modelo numérico denominado MODELAR, utilizando o conjunto de dados do experimento de *Prairie Grass*. O banco de dados gerado com o experimento de *Prairie Grass* é muito utilizado para a avaliação de modelos de dispersão de poluentes atmosféricos (KORSAKISSOK; MALLET, 2009).

O experimento de campo Projeto *Prairie Grass* (BARAD, 1958) é amplamente utilizado para validação de modelos de dispersão atmosférica. O programa experimental de micrometeorologia *Prairie Grass* ocorreu na cidade de O'Neill, no estado do Nebraska - Estados Unidos da América, no verão de 1956, sobre um local plano e sem obstáculos. Dióxido de enxofre foi utilizado como gás traçador, emitido de uma fonte pontual de forma contínua durante o tempo médio de 10 minutos. No total foram realizados 78 lançamentos em diferentes condições da atmosfera. A fonte emissora encontrava-se alocada a uma altura de 0,5 metros do solo e as medições do gás foram efetuadas por analisadores instalados a uma altura de 1,5 metros da superfície, distribuídos em 540 pontos ao longo de cinco arcos, que correspondem a 50 metros, 100 metros, 200 metros, 400 metros e 800 metros de distância da fonte de emissão.

Monteiro (2014) elaborou uma metodologia para ser aplicada no MODELAR, com o objetivo de descrever o levantamento da pluma, para fins de validação foi empregado o conjunto de dados obtidos no experimento de campo Indianápolis (HANNA *et al.*, 2005), e aplicando os índices estatísticos especificados por HANNA (1988; 1989). Velloso *et al.* (2007) avaliaram os modelos de dispersão atmosférica de pluma gaussiana AERMOD e ISC, utilizando um conjunto de dados obtidos em um monitoramento realizado pela FEEMA/RJ. Diversas pesquisas enfatizam que o *DataSet Prairie Grass* por ser um experimento de terreno plano oferece vantagem aos modelos gaussianos, uma vez que seu agrupamento de dados está harmonizado com as hipóteses consideradas pelo modelo de pluma gaussianas, principalmente quando comparado aos modelos Eulerianos (DEMAEL; CARISSIMO, 2008). O sistema de coordenadas utilizado para os modelos Eulerianos são fixos em relação a superfície terrestre (BULIGON *et al.*, 2006).

Os modelos de pluma gaussiana para a dispersão de poluentes atmosféricos vantajosos e amplamente aplicados, pois preservam a simplicidade por meio de fórmulas simples, sendo a sua utilização de grande importância para os profissionais inseridos na área ambiental (ERMAK, 1977, RAMOS *et al.*, 2015). A aplicação da modelagem é um utensílio extremamente importante para o controle da poluição do ar, visto que é amplamente empregada para melhorar a compreensão dos inúmeros eventos físicos e constantemente dinâmicos existentes na atmosfera.

### 3 METODOLOGIA

Neste trabalho, o modelo de pluma Gaussiana de dispersão de poluentes foi implementado na linguagem de programação *Python*. O modelo foi utilizado para simulação do traçador SO<sub>2</sub> utilizado no experimento de campo de *Prairie Grass*. A distribuição das concentrações em cada simulação se altera de acordo com as condições da atmosfera, representadas pela turbulência atmosférica num coeficiente denominado de difusão turbulenta. O modelo gaussiano de dispersão de poluentes atmosféricos é dado pela seguinte equação (SEINFELD, 1986):

$$c(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1.0)$$

Onde:

- $x$ ,  $y$  e  $z$  são coordenadas do ponto que deseja estimar a concentração (m);
- $c$  é a concentração estimada (g.m<sup>3</sup>);
- $q$  é a taxa de emissão do poluente (g.s.);
- $h$  é altura do lançamento (m);
- $\bar{u}$  é a velocidade média do vento (m.s.);
- $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são os desvios médios da distribuição da concentração nas direções do eixo  $y$  e  $z$ .

Pasquill (1961), percebendo a demanda por um método de se identificar a estabilidade atmosférica, propôs classes de estabilidade, que favoreceu a modelagem de poluentes atmosféricos. Posteriormente, Gifford (1976) ampliou e adaptou as classes de estabilidade de Pasquill conforme a TABELA 1.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA DE PASQUILL (1961)/ GIFFORD (1976).

Vento na Superfície	Dia			Noite	
	Radiação Solar			Nebulosidade	
				≥ 4/8	≤ 3/8
Velocidade do vento a 10 metros do solo (m/s)	Forte	Moderada	Fraca	Nublado	Pouco nublado
< 2	A	A - B	B	-	-
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
≥ 6	C	D	D	D	D

FONTE: Adaptado de Pasquill (1961).

- A: Condições extremamente instáveis;
- B: Condições moderadamente instáveis;
- C: Condições fracamente instáveis;
- D: Condições neutras;
- E: Condições fracamente estáveis;
- F: Condições moderadamente estáveis.

Observa-se que a radiação solar influencia na estabilidade atmosférica, pois quanto maior a incidência de radiação, maior será a energia térmica incorporada a superfície, ocasionando maiores turbulências nas massas de ar próximas, na qual este efeito gerará um maior empuxo. Para a dispersão no período noturno, a quantidade de nuvens causa grande influência, isto é, com muitas nuvens o calor será aprisionado sobre o solo, inibindo a troca de calor com massas de ar em maiores altitudes e limitando a dissipação de energia, mantendo assim a turbulência atmosférica (PASQUILL, 1961).

Briggs (1973) através de experimentos de difusão realizados em Saint Louis, conceituou formulações matemáticas que relacionam as classes de Pasquill-Gifford e as características do ambiente para determinar os valores de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Neste trabalho serão usados os parâmetros de dispersão vertical e horizontal para

condições rurais e condições urbanas recomendados por Briggs (1973) expressos nas tabelas 2 e 3 respectivamente:

TABELA 2 - PARÂMETROS DE DISPERSÃO EM CONDIÇÕES RURAIS

Parâmetros de dispersão recomendados por Briggs (1973)		
Classificação de Pasquill	Condições Rurais	
	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
A	$0,22.x.(1+0,0001.x)^{-0,5}$	$0,20.x$
B	$0,16.x.(1+0,0001.x)^{-0,5}$	$0,12.x$
C	$0,11.x.(1+0,0001.x)^{-0,5}$	$0,08.x.(1+0,0002.x)^{-0,5}$
D	$0,08.x.(1+0,0001.x)^{-0,5}$	$0,06.x.(1+0,0015.x)^{-0,5}$
E	$0,06.x.(1+0,0001.x)^{-0,5}$	$0,03.x.(1+0,0003.x)^{-1}$
F	$0,04.x.(1+0,0001.x)^{-0,5}$	$0,16.x.(1+0,0003.x)^{-1}$

FONTE: Adaptado de Briggs (1973).

TABELA 3 - PARÂMETROS DE DISPERSÃO EM CONDIÇÕES URBANAS

Parâmetros de dispersão recomendados por Briggs (1973)		
Classificação de Pasquill	Condições Urbanas	
	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
A - B	$0,32.x.(1+0,0004.x)^{-0,5}$	$0,24.x.(1+0,001.x)^{0,5}$
C	$0,22.x.(1+0,0004.x)^{-0,5}$	$0,20.x$
D	$0,16.x.(1+0,0004.x)^{-0,5}$	$0,14.x.(1+0,0003.x)^{-0,5}$
E - F	$0,11.x.(1+0,0004.x)^{-0,5}$	$0,08.x.(1+0,00015.x)^{-0,5}$

FONTE: Adaptado de Briggs (1973).

Na avaliação da capacidade de previsão do modelo de pluma Gaussiana para dispersão de poluentes atmosféricos será utilizado o experimento de campo de *Prairie Grass* (ambiente rural). A topografia plana da região onde foi realizado o experimento favorece a previsão do modelo de pluma gaussiana, cuja solução analítica foi obtida sob esta hipótese. As seguintes seções descrevem os materiais e

os métodos aplicados nos experimentos de campo, além dos critérios estatísticos que serão aplicados na avaliação dos dados utilizados neste trabalho.

### 3.1 PROJETO *PRAIRIE GRASS*

De 78 lançamentos registrados no *Projeto Prairie Grass*, foram utilizados os dados registrados em 12 lançamentos do gás marcador. A seleção dos lançamentos foi realizada com base na qualidade da informação reportada no relatório do projeto, pois muitas estão irreconhecíveis (o projeto foi realizado no ano 1956 e os dados foram obtidos de um relatório escaneado). Os lançamentos foram realizados em condições variadas da atmosfera. Os lançamentos adotados para serem avaliados estão presentes na FIGURA 1, com a data e hora em que foram realizados.

FIGURA 1 - LANÇAMENTOS AVALIADOS DO PROJETO *PRAIRIE GRASS*

<b>Lançamento</b>	<b>Data de Execução</b>	<b>Hora de início</b>
25	01/08/1956	13:00
27	02/08/1956	14:00
30	03/08/1956	13:00
32	06/08/1956	20:00
33	07/08/1956	13:00
34	08/08/1956	15:00
36	11/08/1956	23:30
37	12/08/1956	03:00
38	12/08/1956	05:00
40	13/08/1956	00:30
41	14/08/1956	03:00
43	15/08/1956	12:00

FONTE: O autor (2022).

### 3.2 CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO

As concentrações simuladas e medidas foram comparadas em gráficos de dispersão e com as estatísticas que se seguem: desvio fracional, fração de dois, erros médio absoluto, erro médio relativo e o coeficiente de correlação de Pearson.

Em cada gráfico gerado foi traçada uma reta 1:1 ( $f(x) = x$ ) e uma reta de regressão linear para avaliação da capacidade de previsão do modelo em cada lançamento simulado.

O desvio fracional padrão ( $FS$ ) refere-se à propensão do modelo em subestimar ( $FS > 0$ ) ou superestimar ( $FS < 0$ ) os valores calculados, sendo que o valor ideal é igual a zero. O desvio fracional é dado por:

$$FS = 2 \frac{(\overline{Co} - \overline{Cp})}{(\overline{Co} + \overline{Cp})} \quad (4.0)$$

Onde,  $Co$  são os valores observados e  $Cp$  são os valores preditos.

O fator de dois ( $FA2$ ) demonstra a quantidade de dados que estão no intervalo:

$$FA2 = 0,5 \leq \frac{\overline{Cp}}{\overline{Co}} \leq 2,0 \quad (5.0)$$

Quanto mais próximo de 1 está o fator de dois, mais próximos estão os valores previstos dos observados.

O erro absoluto ( $EA$ ) é dado pela diferença entre a concentração medida e estimada:

$$EA \text{ médio} = \sum \overline{Co} - \sum \overline{Cp} \quad (6.0)$$

Onde  $Co$  é valor medido  $Cp$  é o valor estimado.

O erro relativo ( $ER$ ) é o valor determinado no  $EA$  (Equação 6.0), dividido pelo valor estimado calculado. É dado pela seguinte expressão:

$$ER \text{ médio} = \frac{(EA \text{ médio})}{\sum \overline{Cp}} \quad (7.0)$$

O coeficiente de correlação de Pearson ( $R_{xy}$ ) foi calculado por meio da expressão a seguir:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (Cp - \overline{Cp}) * (Co - \overline{Co})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Cp - \overline{Cp})^2 * \sum_{i=1}^n (Co - \overline{Co})^2}} \quad (8.0)$$

Onde os conjuntos de dados com coeficiente de correlação mais próximos de 1 estão mais correlacionados.

#### 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das análises estatísticas que comparam as concentrações do gás SO<sub>2</sub> emitido nos lançamentos do Projeto *Prairie Grass* e as suas concentrações simuladas pelo modelo de pluma gaussiana estão na TABELA 4.

TABELA 4 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE COMPARAÇÃO DOS LANÇAMENTOS ANALISADOS DO EXPERIMENTO DE CAMPO *PRAIRIE GRASS*.

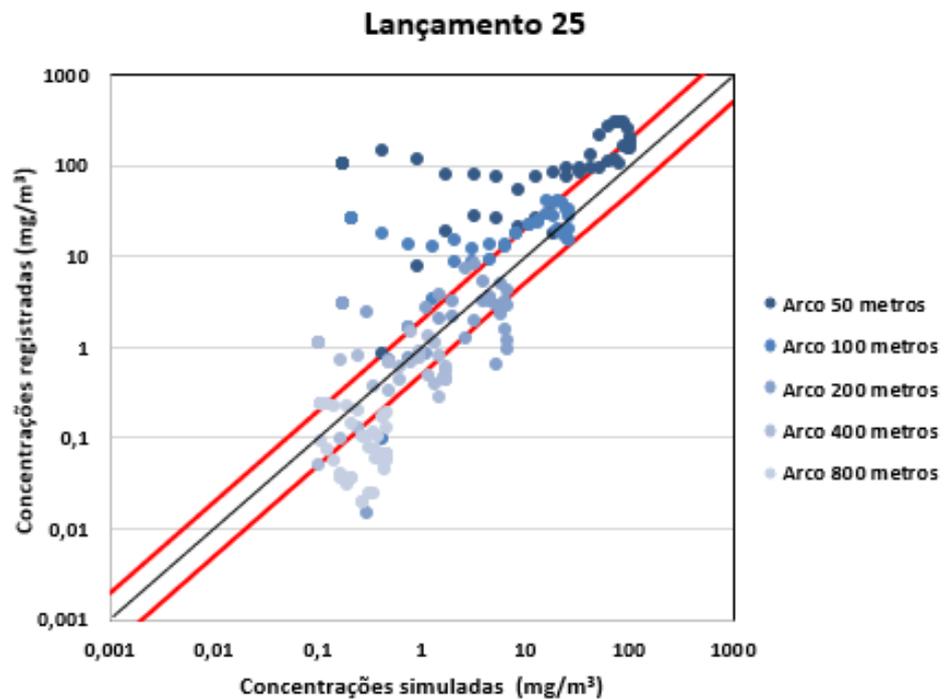
Critérios de comparação	Lançamentos - Projeto <i>Prairie Grass</i>											
	25	27	30	32	33	34	36	37	38	40	41	43
<i>FS</i>	0,88	1,22	1,19	0,87	0,92	0,91	0,53	0,92	0,53	0,68	0,61	1,09
<i>FA2</i>	0,38	0,24	0,25	0,39	0,37	0,37	0,58	0,36	0,57	0,49	0,53	0,29
<i>Erro Médio Absoluto</i>	6,42	5,21	4,72	8,03	3,05	2,39	5,81	2,38	2,23	3,74	2,38	5,39
<i>Erro Médio Relativo</i>	1,58	0,75	0,74	0,61	0,63	0,62	0,42	0,63	0,42	0,5	0,46	0,71
<i>Coefficiente de Correlação de Pearson</i>	0,87	0,97	0,97	0,82	0,93	0,98	0,92	0,88	0,94	0,93	0,87	0,98
<i>Classificação da Estabilidade Atmosférica</i>	A - B	C	C	E	D	C	-	D	D	E	E	B - C

Fonte: O autor (2022).

As concentrações simuladas e medidas foram plotadas em gráficos de dispersão de cada lançamento para comparação.

Na FIGURA 2 estão os dados medidos e simulados do lançamento 25 do Projeto *Prairie Grass*, realizado em 01 de agosto de 1956 no período da tarde. No gráfico do lançamento 25, a reta contínua na diagonal, que parte da origem, representa a reta 1:1, enquanto que as retas contínuas na cor vermelha delimitam a faixa de variação do fator de dois. Para cada um dos cinco arcos de distribuição dos amostradores do experimento do Projeto *Prairie Grass* foi atribuída uma cor para avaliar a qualidade de previsão com a distância da origem de emissão do gás marcador.

FIGURA 2 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 25 DO PROJETO PRAIRIE GRASS.

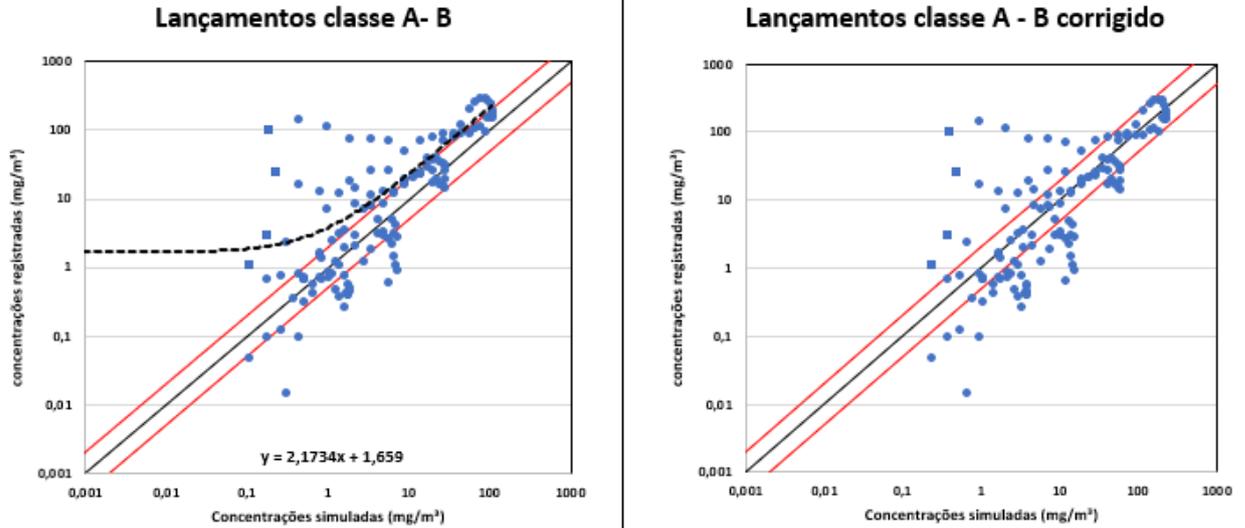


FONTE: O autor (2022).

Pode-se constatar na FIGURA 2, que no lançamento 25, em geral, as concentrações simuladas subestimaram as concentrações medidas no projeto (indicada na figura como concentrações registradas). De fato, o desvio fracional do lançamento é positivo (vide Tabela 4). No entanto, nota-se uma tendência do modelo subestimar as concentrações medidas nos arcos mais próximos (arcos de 50 e 100 metros) e superestimar as concentrações medidas nos arcos mais distantes (arcos de 200 a 800 metros). Nota-se na Tabela 4, que o lançamento 25 apresentou 38% das simulações dentro do intervalo definido pelo fator de dois e um erro relativo médio de 158%. Na TABELA 4 percebe-se que a Classe de estabilidade atmosférica atribuída neste lançamento foi de A-B, ou seja, em condições variando de extrema a moderada variação atmosférica.

Os dados do lançamento 25 foram corrigidos utilizando uma regressão linear ajustada aos dados dispostos na FIGURA 2. O resultado da correção pode ser visto nos gráficos dispostos na FIGURA 3.

FIGURA 3 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE A-B COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA.



FONTE: O autor (2022).

Após a correção realizada nos valores de concentrações simuladas pelo modelo, percebe-se que alguns pontos que estavam afastados das linhas de comparação se aproximaram da reta 1:1. Observa-se na TABELA 5, que as estatísticas de erro melhoraram: o erro médio relativo apresentou uma considerável queda em sua estimativa, neste sentido cerca de 76% dos dados avaliados se deslocaram para a faixa do fator de dois.

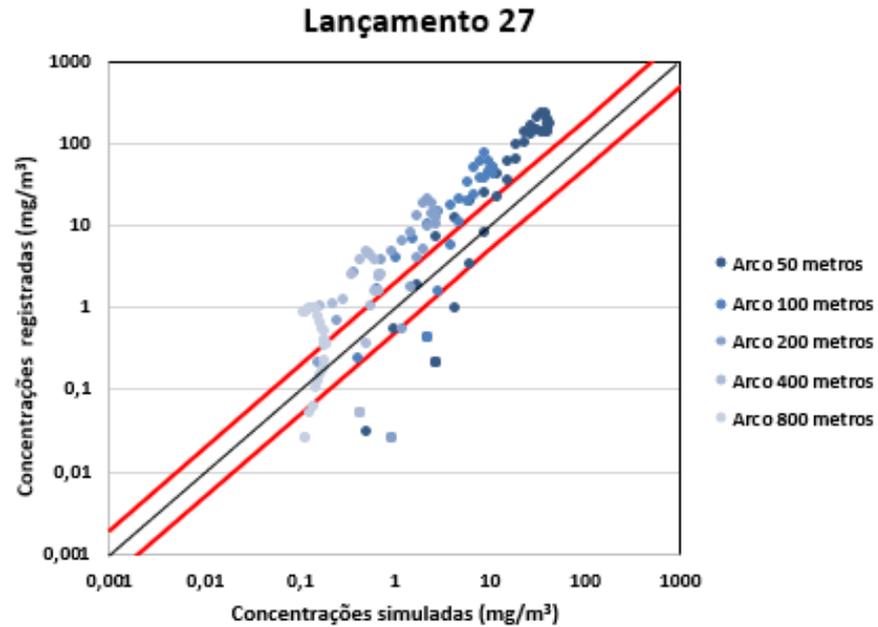
TABELA 5 - COMPARAÇÃO DAS ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA O LANÇAMENTO DE CLASSE A-B.

Critérios de comparação	Lançamentos	
	25	25 corrigido
<i>FS</i>	0,88	0,27
<i>FA2</i>	0,38	0,76
<i>Erro Médio Absoluto</i>	6,42	2,74
<i>Erro Médio Relativo</i>	1,58	0,24
<i>Coefficiente de Correlação de Pearson</i>	0,87	0,87

FONTE: O autor (2022).

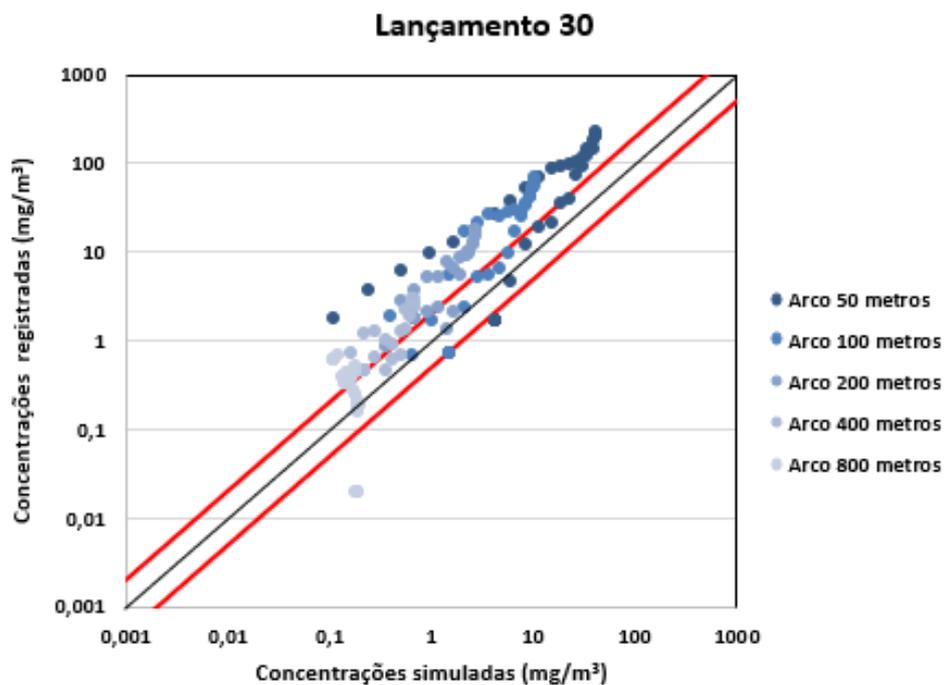
Nas FIGURAS 4, 5 e 6 foram dispostas as simulações realizadas na classe C de estabilidade atmosférica, ou seja, os lançamentos 27, 30 e 34, respectivamente.

FIGURA 4 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 27 DO PROJETO PRAIRIE GRASS



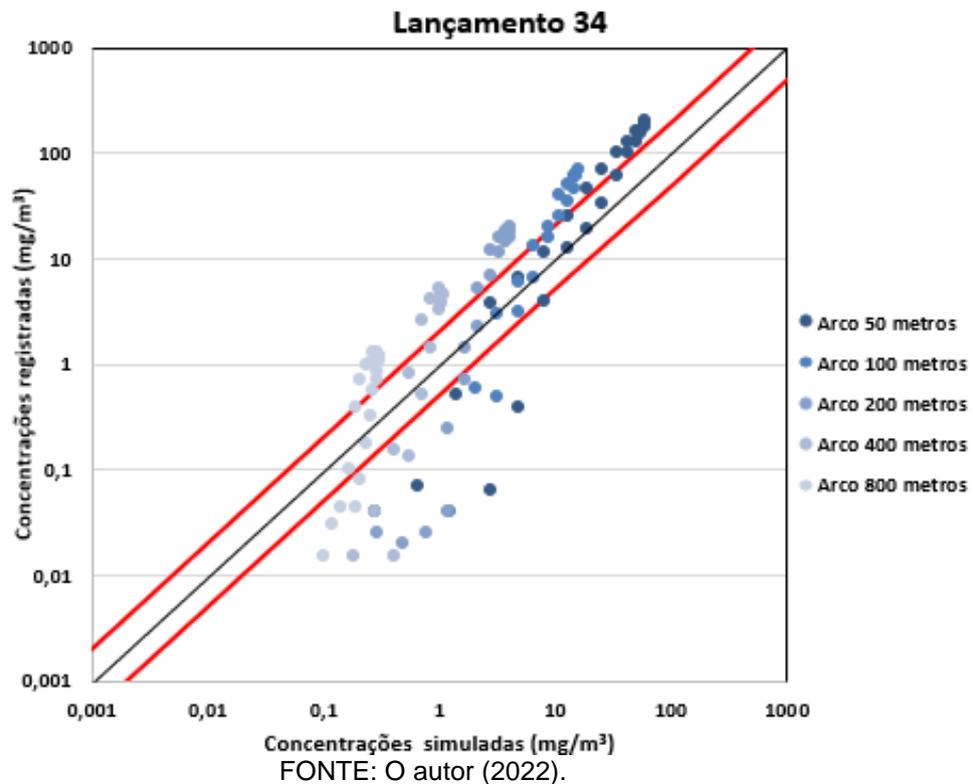
FONTE: O autor (2022).

FIGURA 5 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 30 DO PROJETO PRAIRIE GRASS.



FONTE: O autor (2022).

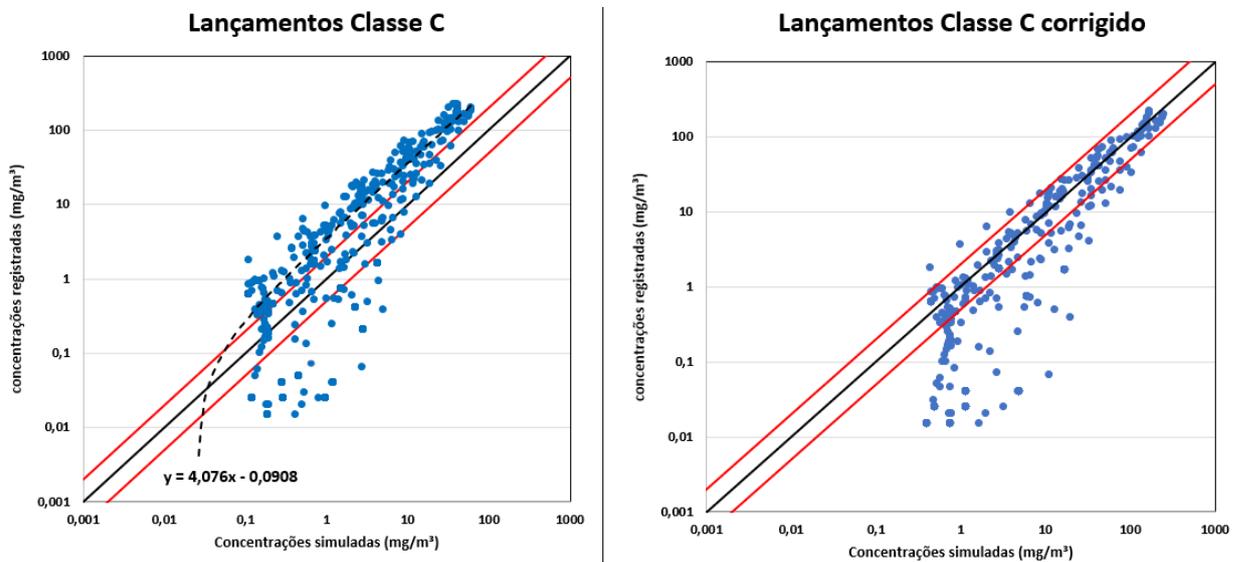
FIGURA 6 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 33 DO PROJETO PRAIRIE GRASS.



Na TABELA 4, nota-se que os lançamentos da classe C de estabilidade, em geral, estão fora da faixa de variação do fator de dois, porém a correlação de Pearson entre as concentrações simuladas e registradas estão próximas a 1 nos três lançamentos, o que também é notável nos três gráficos. Em geral, as concentrações simuladas subestimaram as concentrações medidas, como se pode constatar nos gráficos e na variável de desvio fracional (*FS*).

Apesar das medidas de erro estarem relativamente altas nos três lançamentos da Classe C de estabilidade atmosférica (62%  $ERM_{\text{médio}}$  75%), o coeficiente angular obtido de uma regressão linear ajustada nas três amostras é capaz de melhorar as medidas de erro dos três lançamentos. A FIGURA 7 que se segue exibe as concentrações simuladas dos três lançamentos em um único gráfico com a reta de regressão linear, à esquerda, e, à direita, estão essas mesmas concentrações corrigidas com o modelo de regressão.

FIGURA 7 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE C COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDADA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA.



FONTE: O autor (2022).

Na TABELA 6 a seguir estão as estatísticas desses três lançamentos. Após as correções, o erro médio relativo e absoluto foram significativamente reduzidos. Observando o gráfico dos lançamentos corrigidos da figura, verifica-se que em algumas das simulações que o modelo superestimou as concentrações, mas na maioria das vezes as concentrações estiveram próximas a reta de comparação 1:1 e dentro do intervalo definido para o fator de dois.

Após as correções empíricas, é possível perceber através do gráfico que o modelo tendeu a superestimar os dados de campo. Mas em grande parte, os valores estavam acima da reta 1:1, com  $FS < 0$  nos lançamentos 30 e 34 corrigidos. Já o  $FS$  do lançamento 27 próximo a zero.

TABELA 6 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA OS LANÇAMENTOS DE CLASSE C.

Critérios de comparação	Lançamentos					
	27	27 corrigido	30	30 corrigido	34	34 corrigido
<i>FS</i>	1,22	0,01	1,19	-0,03	0,91	-0,41
<i>FA2</i>	0,24	0,98	0,25	1,03	0,37	1,51
<i>Erro Médio Absoluto</i>	5,21	0,11	4,72	0,19	2,39	2,37
<i>Erro Médio Relativo</i>	0,75	0,01	0,74	0,02	0,62	0,51
<i>Coefficiente de Correlação de Pearson</i>	0,97	0,96	0,97	0,96	0,98	0,97

FONTE: O autor (2022).

A seguir estão as FIGURAS 8, 9 e 10 referentes aos lançamentos 33, 37 e 38, respectivamente. Os três lançamentos ocorreram sob condições atmosféricas classificadas em D por Pasquill.

FIGURA 8 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 33 DO PROJETO PRAIRIE GRASS.

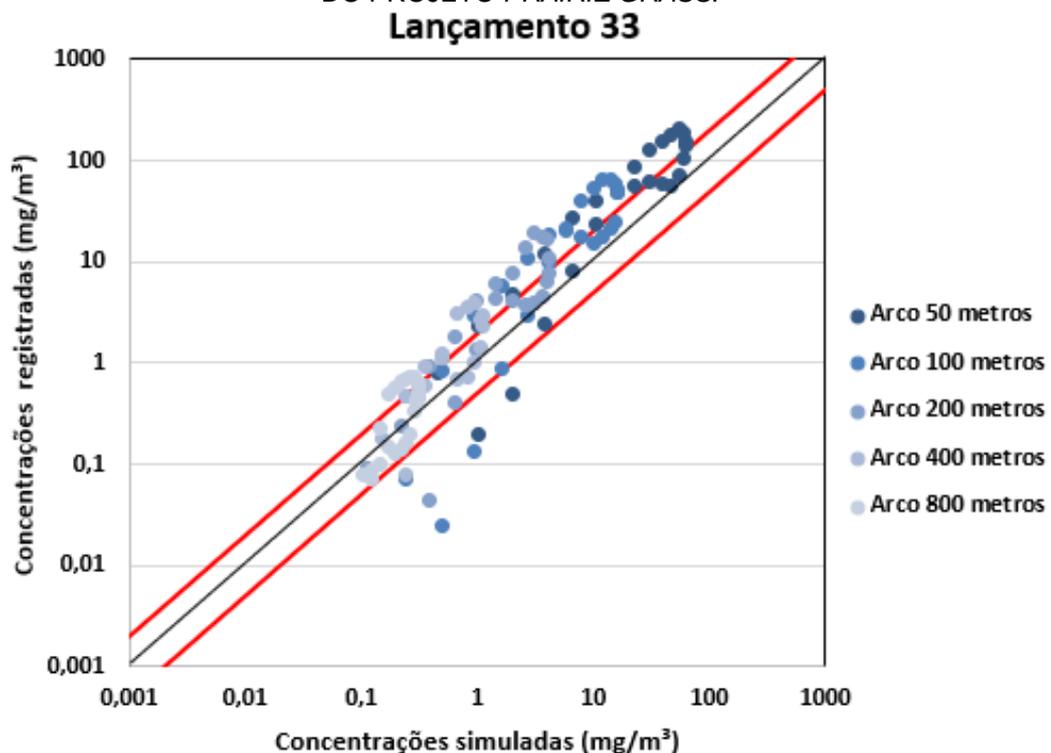


FIGURA 9 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 37 DO PROJETO *PRAIRIE GRASS*.

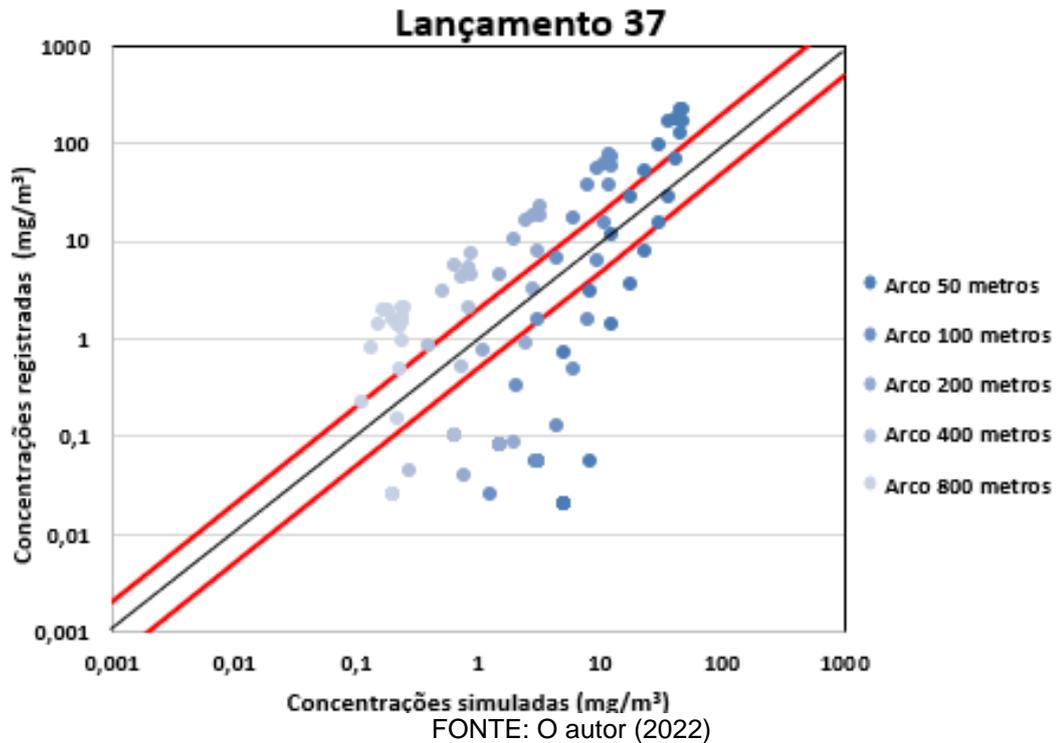
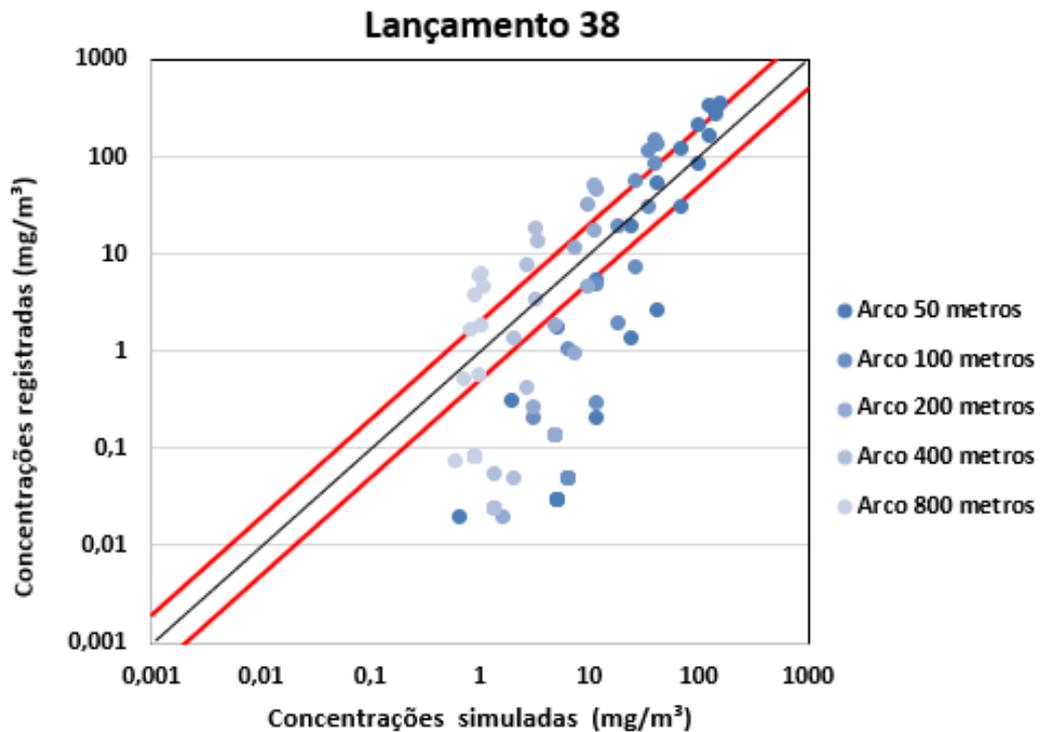


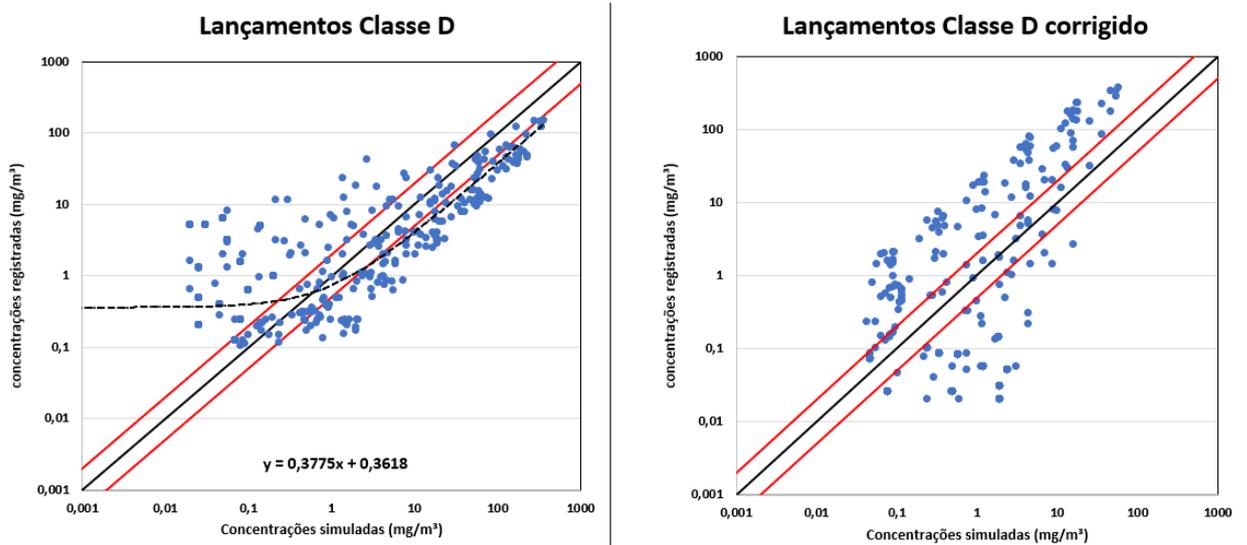
FIGURA 10 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 38 DO PROJETO *PRAIRIE GRASS*.



Em geral, os modelos continuam tendendo a subestimar as concentrações registradas ( $FS > 0$ ), como se pode constatar nos pontos situados acima da reta  $y=x$ . Dos três lançamentos, o lançamento 33 foi a melhor simulação realizada pelo modelo, enquanto que os piores resultados foram obtidos para o lançamento 38.

Nos gráficos apresentados a seguir na FIGURA 11, apresenta a linha de regressão linear ajustada aos dados das simulações de lançamentos realizados nas condições de estabilidade atmosférica de classe D. Além disso, está presente na figura o gráfico desenvolvido a partir das correções empíricas utilizando o coeficiente angular da regressão linear das simulações.

FIGURA 11 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE C COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECID A PARTIR DAS CORREÇÕES EMPÍRICAS UTILIZANDO O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA.



FONTE: O autor (2022).

Observa-se na FIGURA 11 que a correção inverteu. Na TABELA 7, é possível perceber que no geral as estáticas obtidas no lançamento de classe sofreram alterações. Nota-se que nesse caso após a correção empírica os erros apresentaram valores variando de (79%  $ER_{\text{médio}}$  87%). Portanto, o agrupamento dos lançamentos da classe D de Pasquill não produziu uma correção adequada.

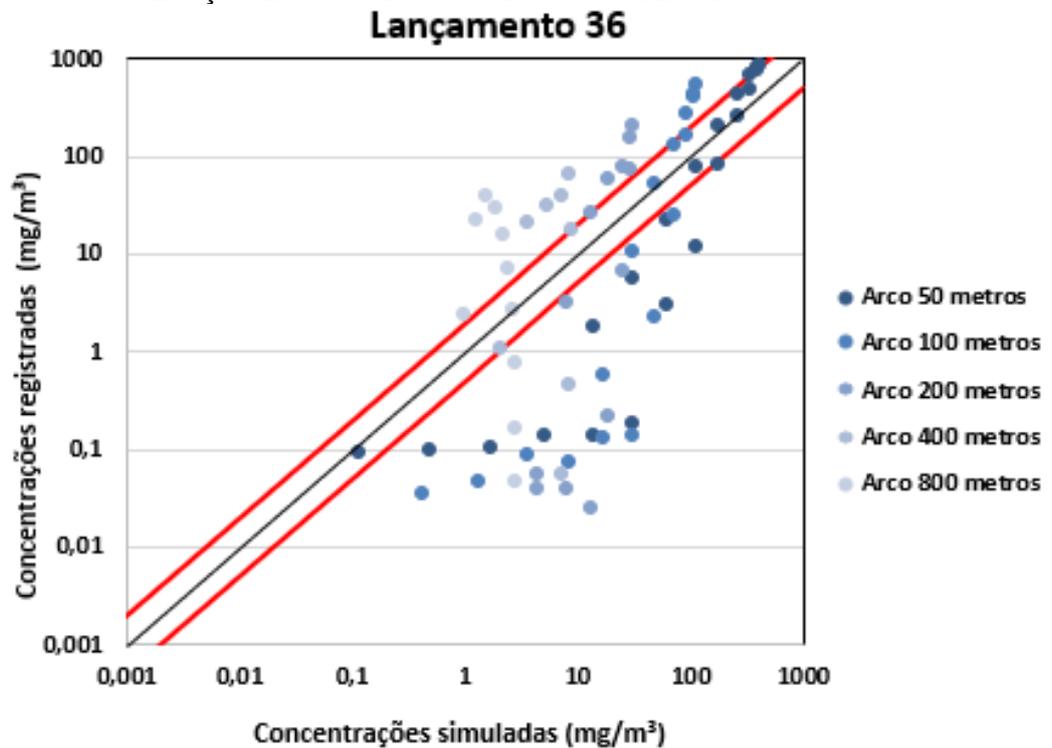
TABELA 7 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA OS LANÇAMENTOS DE CLASSE D.

Critérios de comparação	Lançamentos					
	33	33 corrigido	37	37 corrigido	38	38 corrigido
<i>FS</i>	0,92	1,53	0,92	1,42	0,53	1,31
<i>FA2</i>	0,37	0,13	0,36	0,17	0,57	0,21
<i>Erro Médio Absoluto</i>	3,05	4,17	2,38	3,83	2,23	4,17
<i>Erro Médio Relativo</i>	0,63	0,87	0,63	0,83	0,42	0,79
<i>Coefficiente de Correlação de Pearson</i>	0,93	0,93	0,88	0,91	0,94	0,94

FONTE: O autor (2022).

O lançamento 36 do Projeto *Prairie Grass* que foi executado durante a noite do dia 11 de agosto de 1956.

FIGURA 12 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 36 DO PROJETO *PRAIRIE GRASS*.



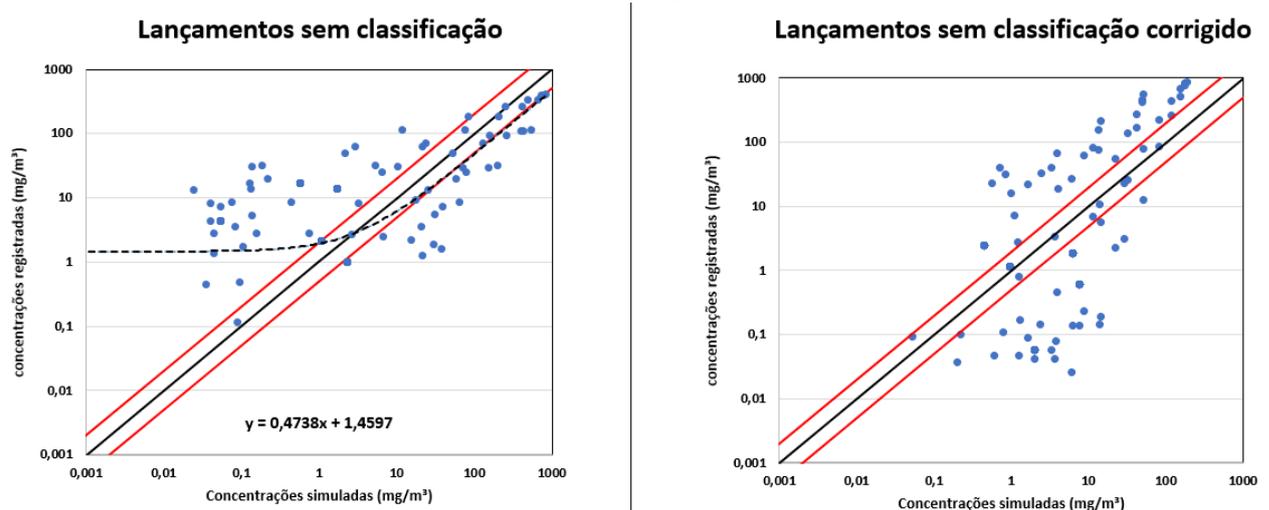
FONTE: O autor (2022).

Observa-se no gráfico da FIGURA 12, os valores de concentração obtidos pelo modelo de pluma gaussiana e os valores medidos pelos sensores de campo do lançamento 36.

Conforme o gráfico da FIGURA 12, constata-se que na simulação desenvolvida para o lançamento 36 o modelo de pluma gaussiana superestimou os valores de concentração, apresentando um desvio fracional maior que zero. Os arcos de 100, 200 e 400 metros apresentaram valores superiores às concentrações registradas no ensaio em campo. No arco de 50 metros o modelo gerou a previsão com uma alta correlação em cerca de 10 pontos. Observando a TABELA 4, o desvio fracional estimado para o lançamento 36 foi positivo ( $FS > 0$ ), já com relação a estabilidade atmosférica não foi possível determinar uma classificação de estabilidade, visto que o lançamento ocorreu em período noturno e com uma baixa velocidade do vento.

Na FIGURA 13, está disposto o gráfico com as simulações corrigidas geradas no lançamento 36. Mesmo sem ter uma classe de estabilidade definida foi atribuído uma regressão linear para obter um coeficiente de correção empírica nos dados simulados.

FIGURA 13 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DO LANÇAMENTO 36 COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELEÇIDA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA.



FONTE: O autor (2022).

Neste caso verifica-se nos gráficos que os pontos se deslocaram, porém a maior parte dos pontos mantiveram as posições distantes das linhas de comparação. Na TABELA 8, está a comparação entre valores dos critérios de

comparação antes e após a correção. Vê-se que houve uma diminuição na representatividade do fator de dois, e um aumento nos erros médios relativos e absolutos.

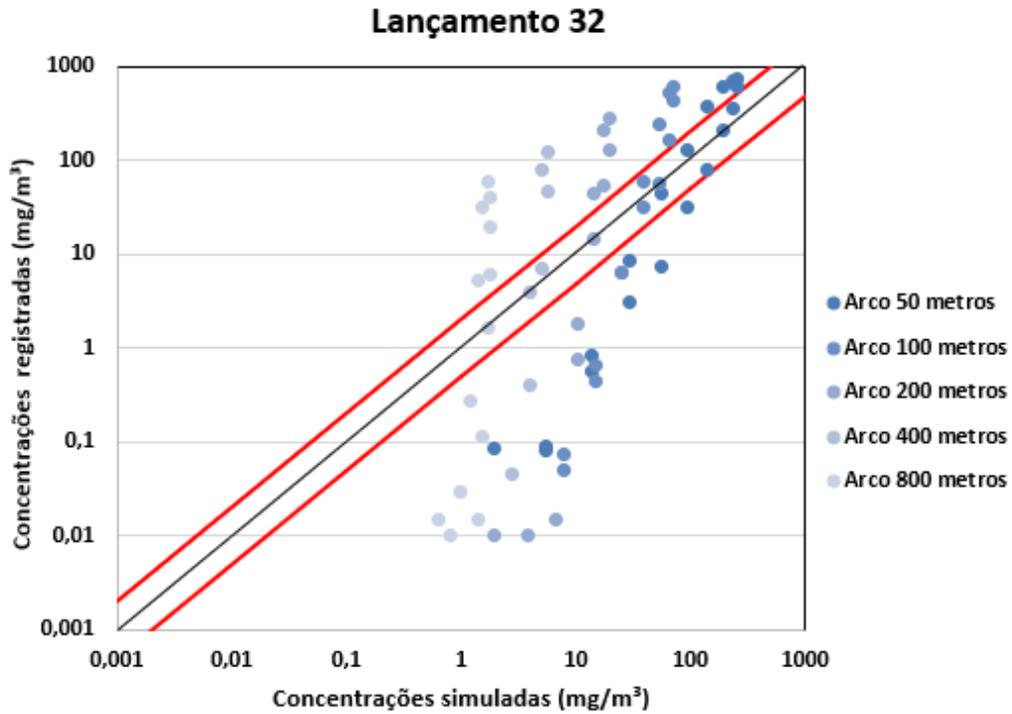
TABELA 8 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA O LANÇAMENTO 36.

Critérios de comparação	Lançamentos	
	36	36 corrigido
<i>FS</i>	0,53	1,14
<i>FA2</i>	0,58	0,27
<i>Erro Médio Absoluto</i>	5,81	10,02
<i>Erro Médio Relativo</i>	0,42	0,73
<i>Coefficiente de Correlação de Pearson</i>	0,92	0,92

FONTE: O autor (2022).

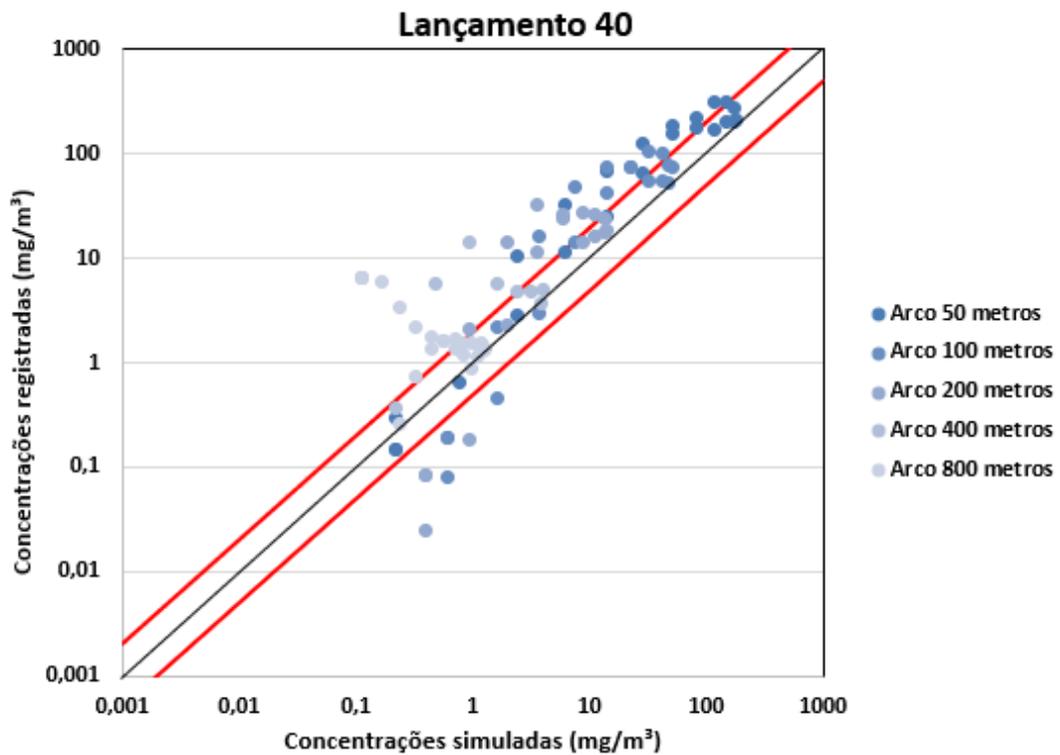
Os resultados gerados nas simulações do modelo de pluma gaussiana para os lançamentos 32, 40 e 41 do Projeto *Prairie Grass*, estão exibidos no gráfico da FIGURAS 14, 15 e 16, respectivamente. Nesses lançamentos a emissão do gás marcador foi realizada sob condições atmosféricas de classe E.

FIGURA 14 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 32 DO PROJETO *PRAIRIE GRASS*.



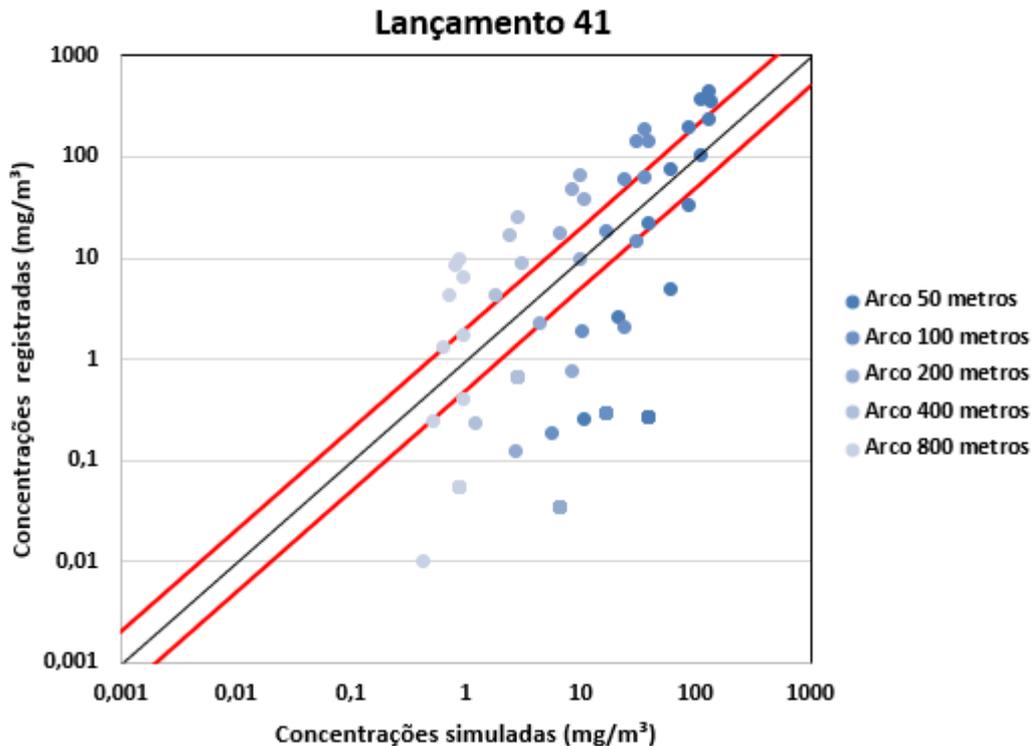
FONTE: O autor (2022).

FIGURA 15 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 40 DO PROJETO *PRAIRIE GRASS*.



FONTE: O autor (2022).

FIGURA 16 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 41 DO PROJETO PRAIRIE GRASS.



Percebe-se que a posição dos pontos do lançamento 32 demonstrado no gráfico da FIGURA 14 ficaram de forma dispersa, apresentando valores superestimados e subestimados. Conforme a TABELA 4, o desvio fracional padrão estimou valores positivos, indicando que no geral o modelo tendeu a superestimar os valores de concentração simulados para o lançamento 32.

No lançamento 40 as concentrações determinadas pelo modelo Gaussiano sugerem que em alguns pontos os registros foram moderadamente subestimados, mas em grande parte os dados foram superestimados. Na região de medição de 800 metros da fonte emissora o modelo previu concentrações correlatas com os dados coletados em campo, pois neste arco os pontos foram distribuídos próximos da reta 1:1 e entre a faixa de verificação do fator de dois. verificando a TABELA 4, a estatística de correlação de Pearson foi de 0,93 para o lançamento 40.

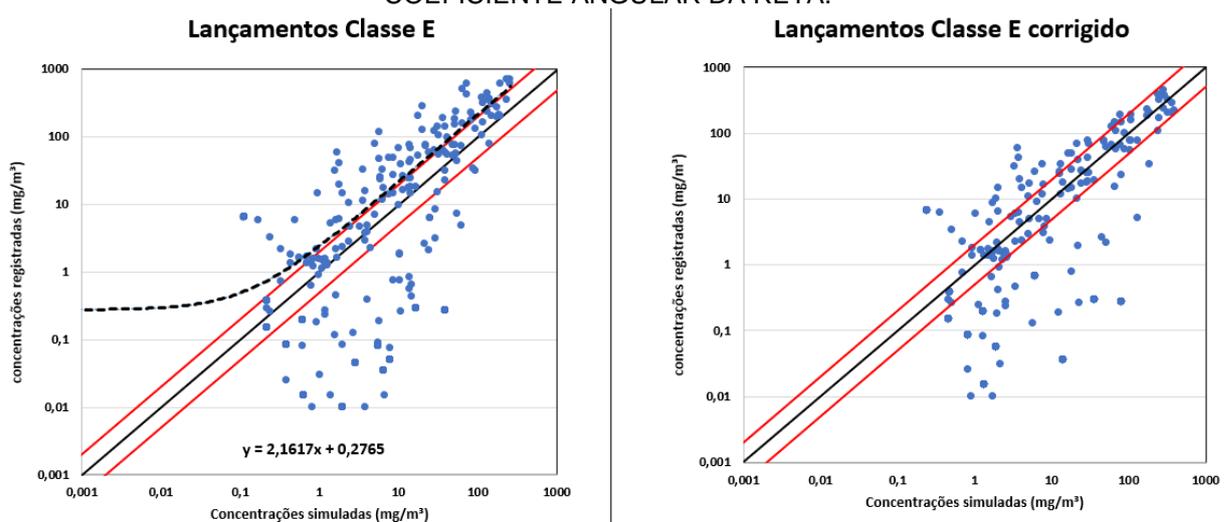
No arco de 50 metros que contém registros de concentrações superiores a 100 mg/m<sup>3</sup>, a modelagem gerou valores previstos superiores a 100 mg/m<sup>3</sup> no arco em questão. A posição dos pontos no gráfico da FIGURA 15, apesar do lançamento ter

ocorrido em período noturno, o gráfico sugere que as condições de turbulência atmosférica estão estáveis.

Identifica-se por meio da posição dos pontos no gráfico da FIGURA 16, que no lançamento 41 o modelo gaussiano gerou em grande parte, concentrações diferentes às obtidas no ensaio de campo. Percebe-se que para alguns pontos os valores estão subestimados e em outro os valores estão superestimados, porém o desvio fracional neste lançamento foi de 0,61. Nota-se no gráfico que em 4 estimativas do arco de 50 metros o modelo previu valores de concentração com uma alta correlação e dentro do limite do fator de dois. Analisando o gráfico do lançamento 41, os arcos de 100, 200, 400 e 800 metros sugerem que as concentrações mostraram uma baixa correlação, visto que o coeficiente de Pearson determinado foi relativamente alto.

A FIGURA 17 expõe os dois gráficos gerados por meio das correções empíricas dos lançamentos da classe E. Identifica-se nos gráficos que após a correção a maioria dos pontos simulados para classe E se ajustaram próximos as retas de comparação. Avaliando as estatísticas dos lançamentos corrigidos de classe E apresentados na TABELA 9, percebe-se que no geral ocorreu uma melhora nas estimativas obtidas.

FIGURA 17 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE E COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA.



FONTE: O autor (2022).

Após a correção dos dados simulados utilizando o coeficiente angular da reta de regressão, o erro médio nos lançamentos de classe E estimaram valores de 6% ( $ER_{médio}$  15%). Nos lançamentos 40 e 41 se ajustaram e obtiveram valores de  $FS < 0$ , enquanto o  $FS$  do lançamento 32 continuou positivo.

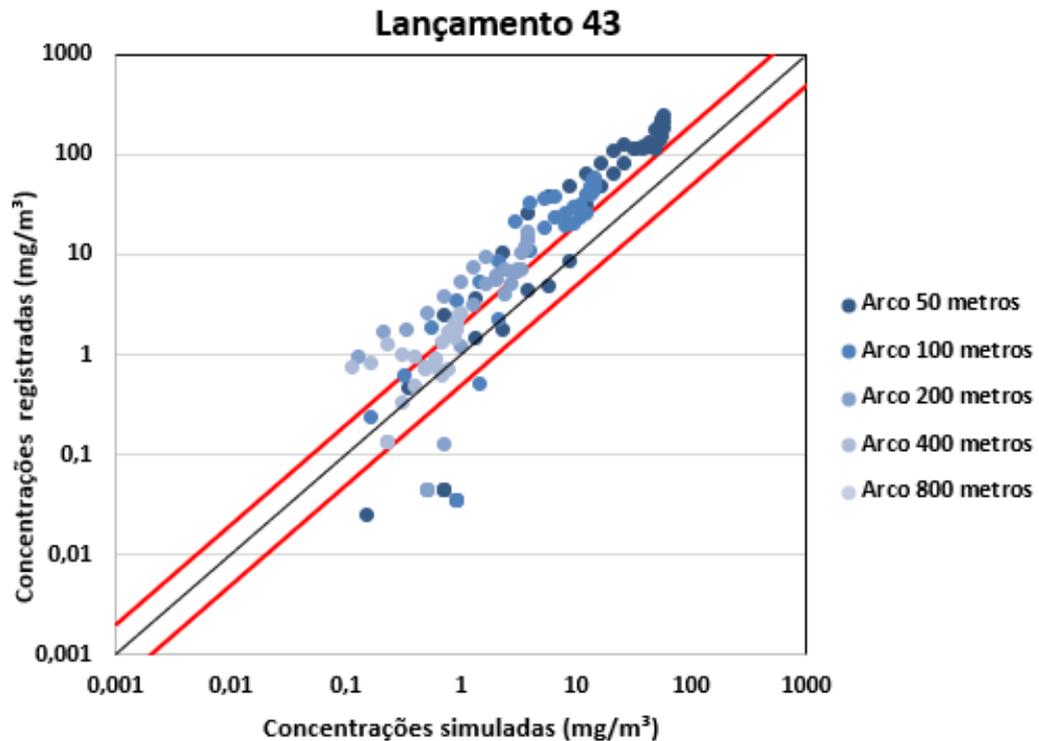
TABELA 9 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA OS LANÇAMENTOS DE CLASSE E.

Critérios de comparação	Lançamentos					
	32	32 corrigido	40	40 corrigido	41	41 corrigido
<i>FS</i>	0,87	0,17	0,68	-0,06	0,61	-0,14
<i>FA2</i>	0,39	0,85	0,49	1,06	0,53	1,15
<i>Erro Médio Absoluto</i>	8,03	2,02	3,74	0,48	2,38	0,79
<i>Erro Médio Relativo</i>	0,61	0,15	0,5	0,06	0,46	0,15
<i>Coefficiente de Correlação de Pearson</i>	0,82	0,85	0,93	0,93	0,87	0,87

FONTE: O autor (2022).

Na FIGURA 18, estão presentes as simulações geradas para o lançamento 43 que apresentou classificação B-C de estabilidade atmosférica.

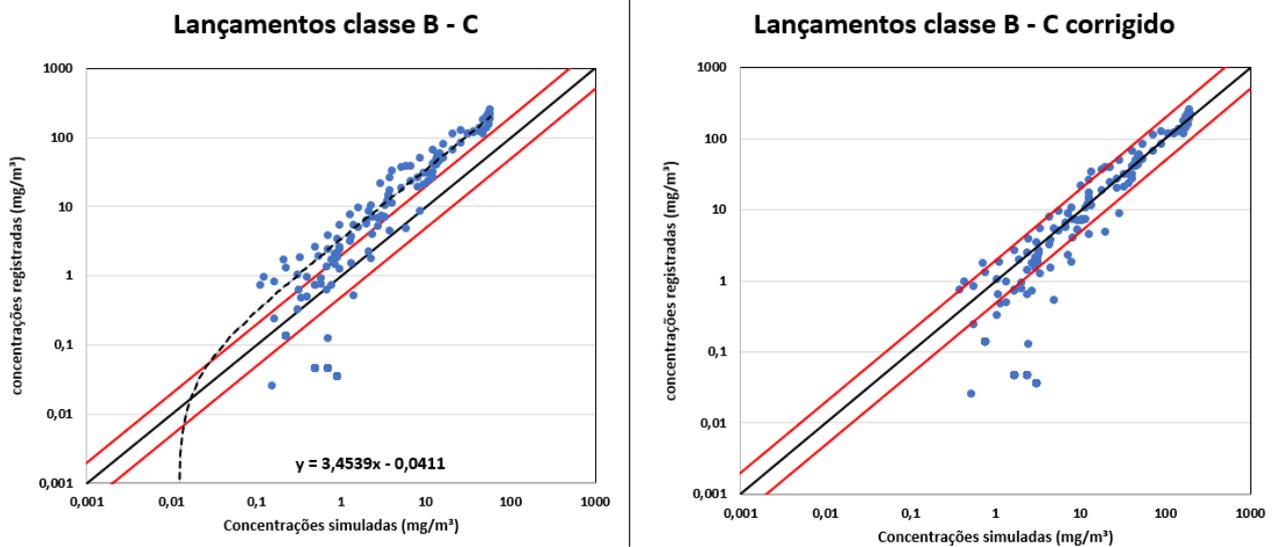
FIGURA 18 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES SIMULADAS PELO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA EM RELAÇÃO ÀS CONCENTRAÇÕES REGISTRADAS NO LANÇAMENTO 43 DO PROJETO PRAIRIE GRASS.



No lançamento 43 presente no gráfico da FIGURA 18, verifica-se que as simulações desenvolvidas mostram que a maior parte dos valores de concentração foram superestimados, e apresentando com um desvio fracional de 1,09 segundo a TABELA 4. Em 6 pontos do gráfico do lançamento 43 as concentrações apresentaram uma baixa correlação, visto que estão distantes das linhas de comparação. Para o lançamento disposto na TABELA 10, o coeficiente de correlação de Pearson apresentou o valor de 0,98.

Na FIGURA 19 a seguir mostra os regressão linear traçada com base nas concentrações simuladas para o lançamento de classe B-C de instabilidade atmosférica.

FIGURA 19 - CONCENTRAÇÕES SIMULADAS DE CLASSE B-C COM RETA DE REGRESSÃO LINEAR ESTABELECIDA E CONCENTRAÇÕES SIMULADAS APÓS CORREÇÕES COM O COEFICIENTE ANGULAR DA RETA.



FONTE: O autor (2022).

Verificando o gráfico da direita, percebe-se que posteriormente a correção empírica, os valores de concentração de no lançamento 43 ficaram alocados próximos a reta de comparação. Nesta classe o fator de dois estimado variou de 29% para 89%. O *FS* permaneceu positivo, porém com valor mais próximo de um. Nota-se também uma melhora significativa nos valores de erro médio absoluto e relativo.

TABELA 10 - COMPARAÇÃO ESTATÍSTICAS CORRIGIDAS COM O MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA O LANÇAMENTO DE CLASSE B-C.

Critérios de comparação	Lançamentos	
	43	43 corrigido
<i>FS</i>	1,09	0,11
<i>FA2</i>	0,29	0,89
<i>Erro Médio Absoluto</i>	5,39	0,92
<i>Erro Médio Relativo</i>	0,71	0,11
<i>Coefficiente de Correlação de Pearson</i>	0,98	0,98

FONTE: O autor (2022).

Os coeficientes utilizados para a correção dos valores de concentrações obtidos pelo modelo de pluma gaussiana estão presentes na TABELA 11. Através desses coeficientes obtidos pela equação da reta, notou-se que os valores previstos se ajustaram de forma mais adequada nos gráficos comparativos das classes A-B, C, E e B-C. As correções para as outras classes pioraram as previsões do modelo.

TABELA 11 - COEFICIENTES DE CORREÇÃO DO MODELO GAUSSIANO DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE ACORDO COM A CLASSE DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA.

Classe de estabilidade atmosférica	Coeficiente de correção
A-B	$2,1734.x + 1,659$
C	$4,076.x - 0,0908$
E	$2,1617.x + 0,2765$
B-C	$3,4539.x - 0,0411$

FONTE: O autor (2022).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, um modelo de dispersão de poluentes atmosféricos de pluma gaussiana bidimensional foi avaliado utilizando o conjunto do banco de dados do Projeto *Prairie Grass*, e uma correção empírica foi proposta para melhorar a qualidade de previsão do modelo em algumas das classes de estabilidade de Pasquill.

No Projeto *Prairie Grass* ocorreram 78 experimentos de emissões do gás traçador SO<sub>2</sub> por uma fonte pontual, das quais doze foram utilizadas neste trabalho para avaliar a capacidade de previsão do modelo de pluma gaussiana para a dispersão de poluentes atmosféricos. Os lançamentos aconteceram no intervalo dos dias 01 a 15 de agosto de 1956 em horários variados, tanto de dia quanto à noite.

Avaliou-se as concentrações distribuídas lateralmente e longitudinalmente, onde se constatou que o modelo é capaz de simular tanto medições noturnas quanto diurnas.

A partir das análises dos parâmetros de erro médio relativo e erro médio absoluto, foi constatado que em todos os lançamentos os valores determinados se mostraram altos. Porém, nos 12 lançamentos a correlação de Pearson apresentou valores próximos a 1, manifestando que as simulações são passíveis de melhorias.

Desse modo, avaliando a qualidade das previsões das classes de estabilidades analisadas, foi atribuída uma correção empírica nos lançamentos. Em lançamentos de classes A-B, C, B-C e E, para condições rurais e terreno plano é sugerido atribuir uma correção nas concentrações preditas através do coeficiente angular definido na regressão linear. Sendo o assim, o modelo de pluma gaussiana pode ser reestruturado da seguinte forma:

$$c(x, y, z) = \left\{ \frac{q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \right\} * T \quad (9.0)$$

onde,  $T$  é o fator de correção determinado através do coeficiente angular da reta de acordo com a classe de estabilidade atmosférica (os valores do fator de correção estão dispostos na TABELA 11).

Nos lançamentos de classe D, a correção não se mostrou eficiente, visto que os dados simulados apresentaram elevada dispersão em relação às concentrações

medidas. O mesmo pode ser dito para o lançamento 36, que não apresentou classe definida para as condições de estabilidade atmosféricas.

## LISTA DE REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. M. W.; ARAÚJO, J. L.; BISOGNIN, E. **Práticas de Modelagem Matemática na Educação Matemática**. 01. ed. Lo: EdUEL, 2011.
- ARMANI, F. A. S.; ALMEIDA, R. C.; DIAS, N. L. C. Statistical evaluation of a new air dispersion model against AERMOD using the Prairie Grass data set. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 64, n. 2, p. 219-226, 2014.
- BARAD, M. L. Project *Prairie Grass*, A Field Program in Diffusion. **Geophysical Research**, No. 59, Vol. I. Report AFCRC-TR-58-235(I). Bedford, MA: Air Force Cambridge Research Center. 1958.
- BARBON, A; GOMES, J. Simulação das emissões atmosféricas sobre o município de Araucária com uso do modelo AERMOD. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 129-140, 2010.
- BARBOSA, J. C. Modelagem e modelos matemáticos na Educação Científica. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 2, n. 2, p. 69-85. 2009.
- BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; BÖHM, G. M.; SALDIVA, P. Poluição atmosférica e saúde humana. **Revista USP**, São Paulo, n. 51, p. 58-71, 2001.
- BRAGA, C. F.; TEIXEIRA, E. C.; ALVES, R. C. M. Estudo de aerossóis atmosféricos e aplicação de modelos numéricos. **Química Nova**, v. 2, n. 4, p. 567-573, 2004.
- BOÇON, F. T., Modelagem matemática do escoamento e da dispersão de poluentes na microescala atmosférica. 1998. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/78075>. Acesso em: 05 abr. 2020.
- BRASIL. **Decreto-Lei nº 1.413, de 14 de Agosto de 1975**. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 ago. 1975. Seção 1. p. 10289.
- BRIGGS, G. A. **Diffusion Estimation for Small Emissions**, ATDL Contribution File NO. 79, Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory. 1973.
- BULIGON, L., VILHENA, M. T. M. B. D., MOREIRA, D. M. Uma solução semi-analítica da dispersão de poluentes com a equação do telégrafo e fluxo contra-gradiente. **Revista brasileira de meteorologia**. Brasília. Vol. 21, no. 1, p. 77-85. 2006.
- CEZANA, F. C. Simulação numérica da dispersão de poluente ao redor de um obstáculo isolado sob diferentes condições de estabilidade, (Dissertação de

Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br>. Acesso em: 22 mai. 2020.

CONAMA. **Resolução nº 5, de 15 de junho de 1989**. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Publicada no Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 ago. 1989. Seção 1, p. 14713-14714.

CONAMA. **Resolução nº 3, de 28 de junho de 1990**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar previstos no PRONAR (Revogada pela Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018). Publicada no Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 ago. 1990. Seção 1, p. 15937-15939.

CONAMA. **Resolução nº 8, de 6 de dezembro de 1990**. Dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição. Publicada no Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 dez. 1990. Seção 1, p. 25539.

CONAMA. **Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Publicada no Diário Oficial da União, n. 223, Brasília, DF, 21 nov. 2018. Seção, p. 155.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. Poluição do ar como causa de morbidade e mortalidade da população urbana. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, Editora UFPR, n. 15, p. 113-126, 2008.

DEMAEL, E.; CARISSIMO, B. Comparative evaluation of an Eulerian CFD and Gaussian plume models based on prairie grass dispersion experiment. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, n. 3, p. 888-900, 2008.

ERMAK, D. L. An analytical model for air pollutant transport and deposition from a point source. **Atmospheric Environment**, v. 11, n. 3, p. 231-237, 1977.

GADELHA, A. J. F. Simulação Fluidodinâmica da Dispersão de Poluentes a partir da Chaminé de uma Termelétrica. 2016. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na Universidade Fedehannaral de Campina Grande, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br>. Acesso em: 15 mar. 2021.INDI

GIFFORD, F. A. **Turbulent Diffusion–Typing Scheme: A Review Nuclear Safety**. v. 17, n. 1, p. 71. 1976.

GUPTA, R. D.; BARIAR, A. N. U. J. Modelling of Gaseous Effluents by Implementing Gaussian Model under GIS Environment. **Journal of environmental science & engineering**, v. 48, n.1, p. 21-26. 2006.

HANNA, S. R. **Air quality model evaluation and uncertainty**. JAPCA, v. 38, p. 406-412, 1988.

HANNA, S. R. Confidence limits for air quality model evaluations, as estimated by bootstrap and jackknife resampling methods. **Atmospheric Environment**, v. 23, p. 1385-1398, 1989.

HANNA, S. R.; CHANG, J. C., OLESEN, H. R. **Indianapolis Tracer Data and Meteorological Data**. EPRI, USA, 2005. Relatório técnico.

HOLMES, N. S.; MORAWSKA, L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: an overview of different dispersion models available. **Atmospheric Environmental**, v. 4, n. 30, p. 5902-5928, 2006.

KORSAKISSOK, I.; MALLET, V. Comparative Study of Gaussian Dispersion Formulas within the Polyphemus Platform: Evaluation with Prairie Grass and Kincaid Experiments. **Journal of applied meteorology and climatology**. Paris, França. v. 48, p. 2469-2473. 2009.

MARRIOTT, Emma. **A história do mundo para quem tem pressa**; tradução Paulo Afonso.01. ed. Rio de Janeiro: Editora Valentina, 2016.

MARTINS, E. M.; FORTES, J. D. N.; LESSA, R. A. Modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos: avaliação de modelos de dispersão de poluentes emitidos por veículos. **Revista Internacional de Ciências, [S.I.]**, v. 5, n. 1, p. 1-18, 2015. DOI: <https://doi.org/10.12957/ric.2015.14498>.

MELO, J. R.; LIMA, E. P.; GIMENES, M. L. Estudo computacional do impacto ambiental de emissões do processo Kraft na qualidade do ar. **Rev. Engenharia Sanitária e Ambiental**. Universidade Estadual de Maringá. 2014. v. 21, n. 2, p. 233-240. 2016. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522016005001105&script=sci\\_abstract&lng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522016005001105&script=sci_abstract&lng=pt). Acesso em: 18 ago. 2021.

MONTEIRO, V. C. Implementação de Levantamento de Pluma de Chaminé no Modelo de Dispersão de Poluentes Atmosféricos Modelar, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2014. Disponível em: <http://www.prppg.ufpr.br/site/ppgea/wp-content/uploads/sites/32/2019/04/008-dissertao-vanessa-monteiro.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2021.

MOREIRA, D.; TIRABASSI, T. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n.2, p. 159- 171, 2004.

PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material. **Meteorological Magazine**, Vol. 90. p. 33-49, 1961.

SEINFELD, J. H. Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. **John Wiley & Sons**. New York, USA, 1986.

RAMOS, A. P.; FREIRE, D. C.; VILLAR, S. B. B. L.; CHAVES, C. V. L.; ALVES, J. J. N.; TAVARES NETO, J. I. H. O uso da modelagem para predizer a dispersão de nuvens poluentes na atmosfera. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**. v.1, n.2, p. 9006-9012, 2015.

SHARAN, M.; YADAV, A. K.; SINGH, M.P.; AGARWAL, P.; NIGAM, S. A mathematical model for the dispersion of air pollutants in low wind conditions. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 8, p. 1209-1220. 1996.

TADANO, Y. S.; MAZZA, R. A.; TOMAZ, E. Modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos no município de Paulínia (Brasil) empregando o ISCST3, **Mecânica Computacional** Vol XXIX. 8125-8148, Buenos Aires - Argentina, 2010.

VELLOSO, M. F.; D'AIUTO, B. C.; PIMENTEL, L. C.; GUERRERO, J. S. Avaliação dos modelos de qualidade do ar AERMOD e ISC para a região de Nova Iguaçu, RJ. **Ciência e Natura**, Volume especial, p. 371-374, 2007.

VIEIRA, Neise Ribeiro. **Poluição do ar: indicadores ambientais**. 01. ed. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2009.