

AVALIAÇÃO DOS COMPOSTOS DE ENXOFRE REDUZIDO  
TOTAL NA ATMOSFERA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO –  
MARGINAL TIETÊ – PONTE DOS REMÉDIOS – SP



GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO



Governo do Estado de São Paulo  
Tarcísio de Freitas - Governador do Estado de São Paulo

Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística  
Natália Resende - Secretária de Estado

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
Thomaz Miazaki de Toledo - Diretor-Presidente

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
Diretoria de Gestão Corporativa e Sustentabilidade  
Liv Nakashima Costa - Diretora  
Diretoria de Controle e Licenciamento Ambiental  
Adriano Rafael Arrepia de Queiroz - Diretor  
Diretoria de Qualidade Ambiental  
Carolina Fiorillo Mariani - Diretora  
Diretoria de Avaliação de Impacto Ambiental  
Mayla Matsuzaki Fukushima – Diretora

---

AVALIAÇÃO DOS COMPOSTOS DE ENXOFRE REDUZIDO  
TOTAL NA ATMOSFERA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO –  
MARGINAL TIETÊ – PONTE DOS REMÉDIOS – SP

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

---

São Paulo - 2024

# Dados Internacionais de Catalogação

(CETESB – Biblioteca, SP, Brasil)

C418a      CETESB (São Paulo)  
Avaliação dos compostos de enxofre reduzido total na atmosfera do município de São Paulo [recurso eletrônico] ; marginal Tietê – Ponde dos Remédios - SP/ CETESB ; Equipe técnica Thiago De Russi Colella (Coordenação técnica), Clarice Aico Muramoto, Jesuíno Romano, Yoshio Yanagi. - - São Paulo : CETESB, 2024.  
1 arquivo de texto (33 p.) : il. color., PDF ; 6 MB

Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>>.  
ISBN 978-65-5577-093-3

1. Ar – qualidade – controle 2. Ar – poluição 3. Enxofre 4. São Paulo (SP) I. Título.

CDD (21.ed. Esp.) 363.739 263 816 1

546.723.028 681 61

CDU (2.ed. Port.) 502.175:614.71/.72 (815.6)

614.71:543.632.46 (815.6)

Catalogação na fonte: Margot Terada - CRB 8.4422

Direitos reservados de distribuição e comercialização.  
Permitida a reprodução desde que citada a fonte.

© CETESB 2024.

Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345  
Pinheiros – SP – Brasil – CEP 05459900

## **FICHA TÉCNICA**

Diretoria de Qualidade Ambiental  
Departamento de Qualidade Ambiental  
Divisão de Qualidade do Ar  
Setor de Amostragem e Análise do Ar  
Setor de Meteorologia  
Setor de Telemetria da Qualidade do Ar

### **Equipe Técnica**

Thiago De Russi Colella (**Coordenação Técnica**)  
Clarice Aico Muramoto  
Jesuíno Romano  
Yoshio Yanagi

### **Produção Editorial e Distribuição**

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 – Alto de Pinheiros  
CEP 05459-900 - São Paulo – SP – Brasil  
Telefone: +55 11 3133.3000  
Este relatório está também disponível na página da CETESB  
<<https://cetesb.sp.gov.br/>>



## RESUMO

A CETESB realiza o monitoramento de compostos de enxofre reduzido total (ERT), na atmosfera do Município de São Paulo por meio da estação automática Marginal Tietê-Ponte dos Remédios, próxima ao rio Tietê. A avaliação das medições de ERT desta estação foi realizada para o período de 01/01/2015 a 31/12/2023, analisando-se também parâmetros meteorológicos como chuva e vento. Os resultados obtidos apontaram que, na maioria dos anos, os valores horários de ERT acima de 30 ppb foram observados entre os meses de junho e setembro, período em que também foram registrados os maiores valores, acima de 100 ppb. As máximas concentrações de 1 hora de ERT ocorreram em dias com ausência de chuva, nos meses de inverno. A avaliação das concentrações máximas horárias de ERT indicou que os maiores valores ocorreram durante a noite e madrugada. Pelos gráficos polarplot, os maiores valores médios se deram em 2018 e 2015, com ventos fracos. Concluiu-se que, no período analisado, não houve variação significativa nas concentrações de ERT, apontando que a variação ocorrida pode ser mais atribuída às condições meteorológicas de dispersão atmosférica.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da estação Marginal Tietê – Ponte dos Remédios na RMSP .....	13
Figura 2 – Localização da estação Marginal Tietê–Ponte dos Remédios em relação aos rios Tietê e Pinheiros .....	14
Figura 3 – Localização da estação Marginal Tietê–Ponte dos Remédios em relação ao rio Tietê.....	14
Figura 4 – Vista aérea do entorno da estação Marginal Tietê–Ponte dos Remédios .....	15
Figura 5 – Vistas do entorno da estação Marginal Tietê–Ponte dos Remédios em relação ao rio Tietê.....	15
Figura 6 – Rosa dos ventos.....	28
Figura 7 – Rosa de poluição de ERT .....	28
Figura 8 – Polarplot de ERT e direção e velocidade dos ventos 2015-2023.....	29
Figura 9 – Polarplot de ERT e direção e velocidade de vento – por ano.....	30
Figura 10 – Polarplot de ERT e direção e velocidade de vento – por mês.....	30

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Concentrações horárias de ERT.....	16
Gráfico 2 – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva .....	17
Gráfico 2a – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2015 ....	17
Gráfico 2b – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2016 ....	18
Gráfico 2c – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2017 ....	18
Gráfico 2d – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2018 ....	18
Gráfico 2e – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2019 ....	19
Gráfico 2f – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2020 .....	19
Gráfico 2g – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2021 ....	19
Gráfico 2h – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2023 ....	20
Gráfico 3 – Concentrações médias diárias de ERT e dias de chuva .....	20
Gráfico 4 – Médias mensais das máximas diárias de ERT .....	21
Gráfico 5 – Evolução das médias anuais das máximas diárias de ERT.....	21
Gráfico 6 – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração – 2015 a 2023 .....	22
Gráfico 6a – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2015.....	22
Gráfico 6b – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2016.....	23
Gráfico 6c – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2017.....	23
Gráfico 6d – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2018.....	24
Gráfico 6e – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2019.....	24
Gráfico 6f – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2020.....	25
Gráfico 6g – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2021.....	25
Gráfico 6h – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2023.....	26
Gráfico 7 – Perfil semanal das concentrações horárias de ERT, por dia da semana.....	27
Gráfico 8 – Perfil médio das concentrações horárias de ERT e percentil 10/90	27
Gráfico 9 – Perfil das concentrações máximas horárias de ERT.....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativas do percentual de pessoas sensíveis a diferentes concentrações de H <sub>2</sub> S, conforme valores de referência da Califórnia .....	12
Tabela 2 – Média anual e máximos diários de 1h, por ano .....	16
Tabela 3 – Máxima média mensal de ERT no ano e acumulado de chuva no mês .....	21
Tabela 4 – Percentual da distribuição de frequência das concentrações de ERT, por ano, e chuva acumulada por período .....	26

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CETESB</b>	<b>Companhia Ambiental do Estado de São Paulo</b>
<b>ERT</b>	<b>Enxofre Reduzido Total</b>
<b>EUA</b>	<b>Estados Unidos da América</b>
<b>H<sub>2</sub>S</b>	<b>Sulfeto de Hidrogênio ou Gás Sulfídrico</b>
<b>INMET</b>	<b>Instituto Nacional de Meteorologia</b>
<b>OMS</b>	<b>Organização Mundial da Saúde</b>
<b>RMSP</b>	<b>Região Metropolitana de São Paulo</b>
<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>Dióxido de Enxofre</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Valores de Referência na Atmosfera .....</b>	<b>11</b>
<b>3 OBJETIVO .....</b>	<b>12</b>
<b>4 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR .....</b>	<b>13</b>
<b>4.1 Metodologia e Método.....</b>	<b>13</b>
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>16</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>33</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Condições de degradação de corpos hídricos, devido ao lançamento de efluentes sanitários, podem favorecer a decomposição da matéria orgânica e a redução biológica dos sulfatos carregados pelo rio, ocasionando a emissão de compostos de enxofre reduzido para a atmosfera.

A CETESB realiza o monitoramento dos compostos de enxofre reduzido total (ERT) por meio de sua rede automática de monitoramento da qualidade do ar. Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o monitoramento é realizado na estação automática Marginal Tietê-Ponte dos Remédios, próxima à margem do rio Tietê, na cidade de São Paulo.

Não existe na legislação nacional padrão de qualidade do ar para este poluente, porém sabe-se que os compostos de enxofre reduzido total, dependendo das concentrações, podem causar efeitos à saúde e incômodos à população.

Neste relatório será apresentada a avaliação das medições de ERT realizadas nesta estação no período de 01/01/2015 a 31/12/2023.

## 2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os compostos de enxofre reduzido mais frequentes e abundantes são: o sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico ( $H_2S$ ), metil-mercaptana, dimetil-sulfeto e dimetil-dissulfeto. Dentre estes, o  $H_2S$  é o mais abundante na atmosfera. Dependendo da temperatura e do pH da água, a relação mercaptanas: $H_2S$  em plantas de tratamento de esgoto fica, usualmente, entre 1:50 e 1:100 (EUA, 1997). O sulfeto de hidrogênio e demais compostos de enxofre reduzido, mesmo em baixas concentrações, possuem odor desagradável, semelhante ao ovo podre.

Os efeitos à saúde, assim como a percepção de odor, associados à exposição a compostos de enxofre reduzido, dependem do composto específico e de sua concentração, da condição de exposição e da sensibilidade do indivíduo exposto. Os sintomas relatados por indivíduos expostos a ERT e  $H_2S$  incluem dor de cabeça e irritação dos olhos, nariz e sistema respiratório (EUA, 1997).

### 2.1 Valores de Referência na Atmosfera

Não existe na legislação brasileira padrão de qualidade do ar para ERT e nem para  $H_2S$ , assim, para interpretação dos resultados de concentração, foram consideradas informações encontradas na literatura.

O limite de percepção de odor é definido como a menor concentração do poluente no ar passível de ser detectada pela média da população saudável.

Não existe limite de percepção de odor para compostos de enxofre reduzido como um todo, e sim para seus componentes individuais. O limite de percepção de odor para o gás sulfídrico é 5 ppb (SULLIVAN, 1969).

A concentração utilizada no Estado da Califórnia/EUA como padrão de qualidade do ar para o sulfeto de hidrogênio (30 ppb -  $42 \mu g/m^3$ , média de 1 hora) foi definida com o objetivo de minimizar o incômodo causado pelo odor à população (EUA, 1985).

O Estado de Nova Iorque/EUA estabeleceu o valor de 10 ppb ( $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), média de 1 hora, para  $\text{H}_2\text{S}$ , tendo como objetivo primário, prevenir odores desagradáveis (EUA, 2022).

O valor de referência para o  $\text{H}_2\text{S}$  apresentado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para a Europa é de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (108 ppb), média de 24 horas, visando a proteção da saúde humana (WHO, 2000). Segundo a mesma referência, para se evitar reclamações substanciais sobre incômodo por odor na população exposta, a concentração de  $\text{H}_2\text{S}$  - média de 30 minutos, não deve exceder 5 ppb ( $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Para a conversão das concentrações de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para ppb, considerou-se pressão atmosférica de 760 mmHg e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

Existem vários fatores que afetam a sensibilidade ao odor, como idade, resfriados, alergias, fadiga e desatenção, entre outros. Portanto, mesmo para concentrações próximas de 30 ppb, como é o caso do padrão de qualidade do ar para  $\text{H}_2\text{S}$  adotado na Califórnia, ainda assim, 17% da população não detectaria o odor, conforme expresso na **Tabela 1**.

**Tabela 1 – Estimativas do percentual de pessoas sensíveis a diferentes concentrações de  $\text{H}_2\text{S}$ , conforme valores de referência da Califórnia**

Concentração de $\text{H}_2\text{S}$ (ppb)	Pessoas capazes de detectar odor (%)
40	88
<b>30</b>	<b>83</b>
25	80
20	74
8	50

Fonte: EUA. California Air Resources Board (1985)

Além do  $\text{H}_2\text{S}$ , outros compostos de enxofre reduzido, como metil-mercaptana, dimetil-mercaptana e dimetil-dissulfeto, cujos limites de percepção de odor são ainda mais baixos, podem estar presentes na atmosfera, sendo todos quantificados como ERT. Entretanto, deve-se considerar que no caso da fonte em questão, ou seja, corpo hídrico com lançamento de efluentes sanitários, o  $\text{H}_2\text{S}$  é apontado como o composto predominante.

Desta forma, com base na literatura citada, a análise dos dados neste relatório será efetuada considerando dois patamares de concentração: 5 ppb e 30 ppb.

### 3 OBJETIVO

O objetivo deste relatório é apresentar a avaliação das medições de ERT na atmosfera, no período de 01/01/2015 a 31/12/2023, na estação Marginal Tietê-Ponte dos Remédios, bem como o comportamento das concentrações de ERT em relação a alguns parâmetros meteorológicos, considerando também a variação sazonal.

## 4 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

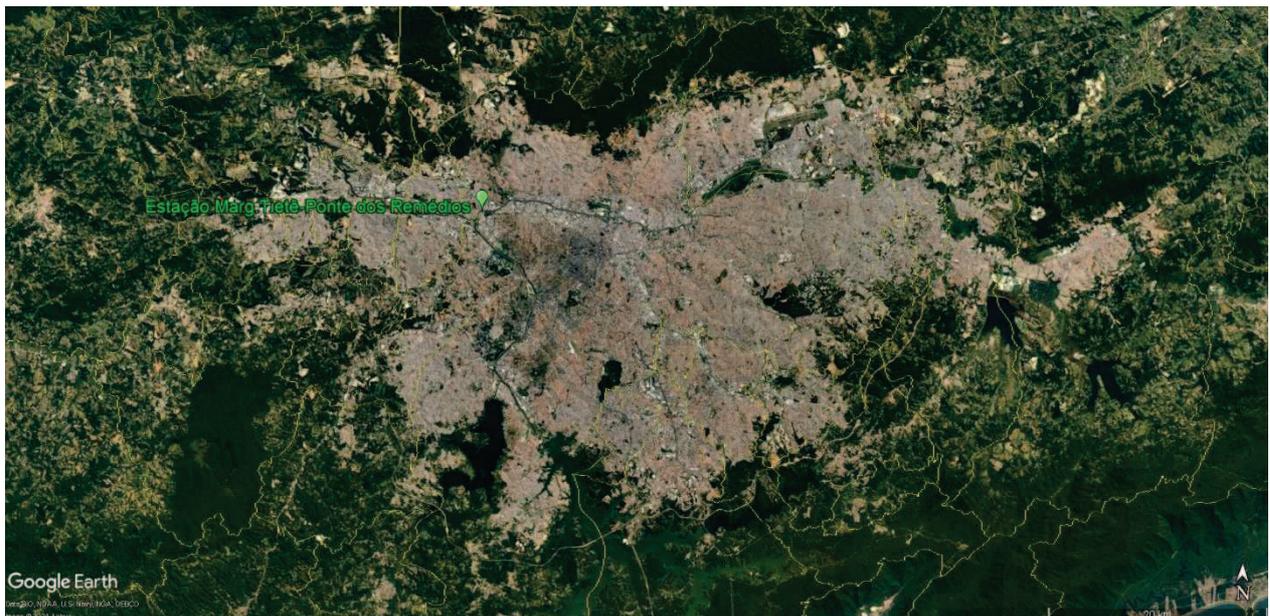
A especificação de misturas contendo diferentes compostos causadores de odor é muito complexa. No âmbito deste estudo, serão avaliados na atmosfera os compostos de enxofre reduzido, medidos como Enxofre Reduzido Total (ERT).

### 4.1 Metodologia e Método

O monitoramento automático de ERT na atmosfera se realiza de forma contínua, pela CETESB, com a utilização de um analisador por fluorescência. Neste analisador, o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) presente na atmosfera é inicialmente retirado por meio de um depurador (*scrubber*). Na sequência, a amostra passa por um tubo de quartzo aquecido a  $970\text{ }^\circ\text{C}$ , para conversão do ERT a  $\text{SO}_2$ . A corrente de gás é então enviada a um analisador por fluorescência, onde os teores de enxofre são quantificados. Os resultados obtidos no monitoramento correspondem às médias horárias.

A estação automática Marginal Tietê-Ponte dos Remédios está localizada na Av. Embaixador Macedo Soares, nº 12.889, nas dependências do Centro de Treinamento do Comando de Policiamento Rodoviário da Polícia Militar, no extremo oeste da RMSP. As coordenadas UTM (SIRGAS 2000) são: 23k 322013 E – 7397977 S.

**Figura 1 – Localização da estação Marginal Tietê – Ponte dos Remédios na RMSP**



Essa estação está distante cerca de 80 metros da margem esquerda do rio Tietê, conforme pode ser visualizado nas **Figuras 2 a 4** e distante cerca de 1 km do entroncamento com o rio Pinheiros, mais ao sul. Quanto à escala de abrangência espacial esta estação é classificada como “microescala”, ou seja, representa áreas de dimensão de poucos metros até 100 metros.

**Figura 2 – Localização da estação Marginal Tietê–Ponte dos Remédios em relação aos rios Tietê e Pinheiros**



**Figura 3 – Localização da estação Marginal Tietê–Ponte dos Remédios em relação ao rio Tietê**



Nota: Base Ortofoto 2010

**Figura 4 – Vista aérea do entorno da estação Marginal Tietê–Ponte dos Remédios**



**Figura 5 – Vistas do entorno da estação Marginal Tietê–Ponte dos Remédios em relação ao rio Tietê**



Nota: Fotos CETESB (02/07/2024)

O monitoramento de ERT, nessa estação, teve início em 31/10/2014, sendo interrompido, por motivos técnicos, entre 2021 e 2022, retomando operação em 2023.

## 5 RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados do monitoramento de ERT no período de 01/01/2015 a 31/12/2023, com análise conjunta de parâmetros meteorológicos, chuva e vento.

Na **Tabela 2** é apresentado um sumário dos dados de ERT medidos, que contém o número de medidas horárias válidas, as médias anuais e os quatro valores máximos diários de 1 hora, em cada ano.

**Tabela 2 – Média anual e máximos diários de 1h, por ano**

ANO	Repres.	N <sub>h</sub>	Média Aritm. ppb	Máximas 1h			
				1 <sup>a</sup> ppb	2 <sup>a</sup> ppb	3 <sup>a</sup> ppb	4 <sup>a</sup> ppb
2015	S	7071	7	139	109	109	101
2016	S	8091	5	136	105	104	100
2017	S	8009	3	167	101	90	86
2018	S	6144	4	132	126	124	109
2019	S	8249	3	97	80	70	70
2020	S	8103	4	123	118	112	109
2021	N	2290	2	45	27	25	19
2022	N	--	--	--	--	--	--
2023	S	7423	3	97	62	59	55

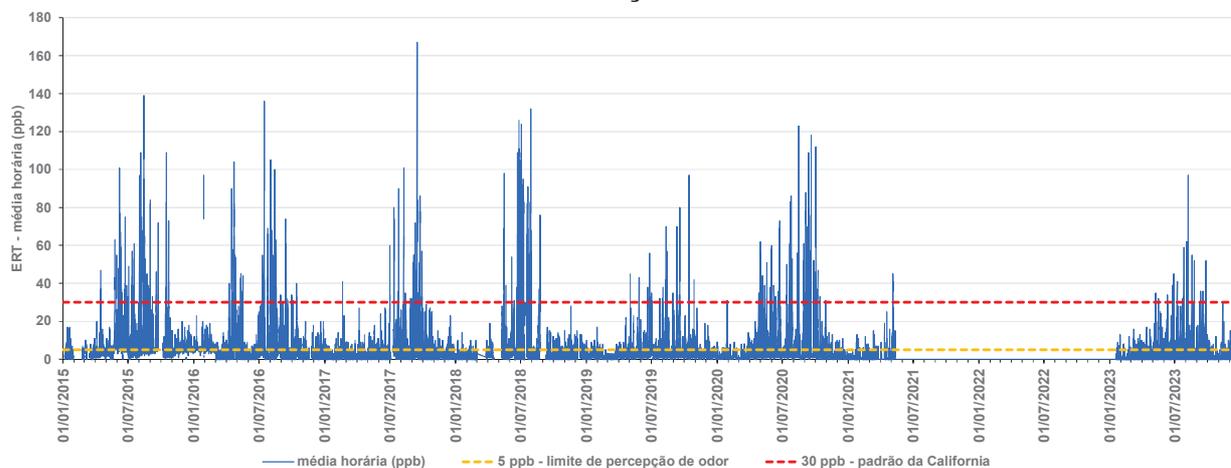
Nota: Por motivos técnicos, o monitoramento de ERT foi interrompido entre 2021 e 2022.

Repres. = Atende ao critério de representatividade anual - S (sim) e N (não)

N<sub>h</sub> = N<sup>o</sup> de medidas horárias válidas

Na sequência, os dados são mostrados em mais detalhes, começando com a apresentação, no **Gráfico 1**, das concentrações horárias de ERT na atmosfera de 2015 a 2023. Nota-se que teores de ERT acima de 30 ppb ocorreram principalmente nos meses de inverno, dentre os quais se observam alguns dias com valores acima de 100 ppb.

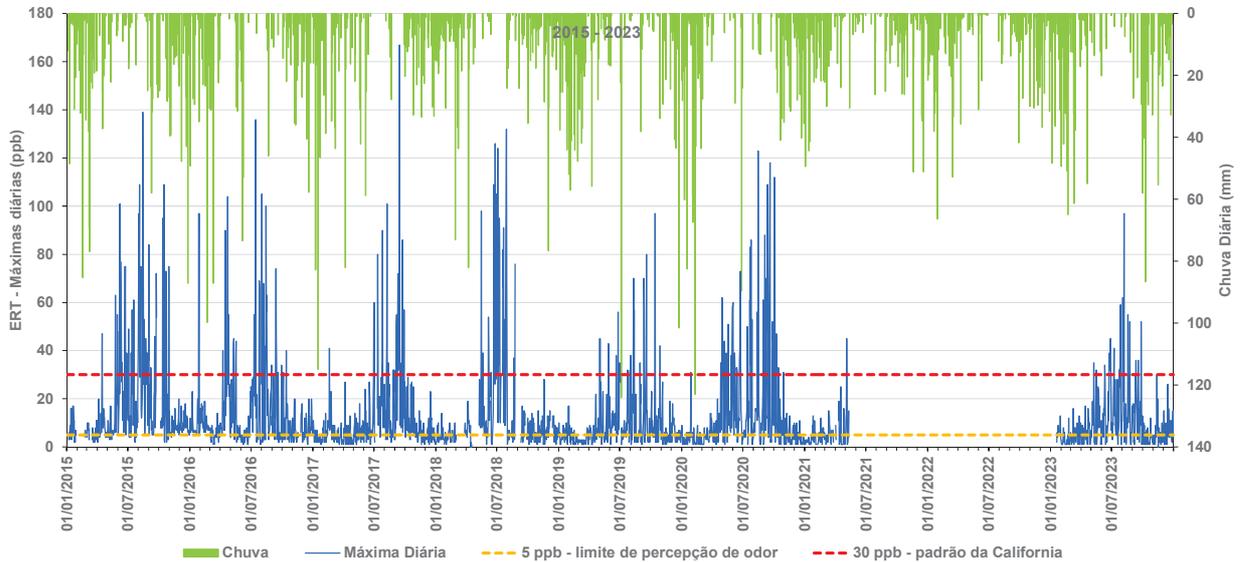
**Gráfico 1 – Concentrações horárias de ERT**



Nota: Por motivos técnicos, o monitoramento de ERT foi interrompido entre 2021 e 2022, nesta estação.

No **Gráfico 2** são apresentadas as máximas concentrações de 1 h de ERT obtidas no dia (máxima diária) e chuva diária (total acumulado em 24 horas na estação Mirante de Santana do INMET), de 2015 a 2023. Observa-se que a maioria das concentrações mais altas se deram em dias com ausência de chuva, especialmente nos meses de inverno.

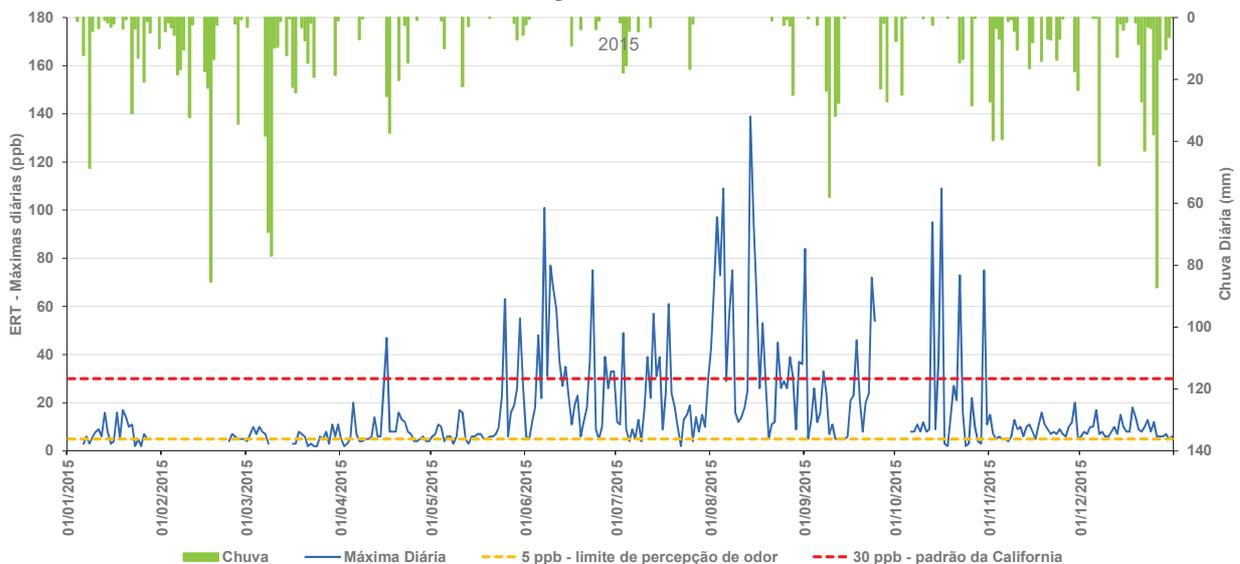
**Gráfico 2 – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva**



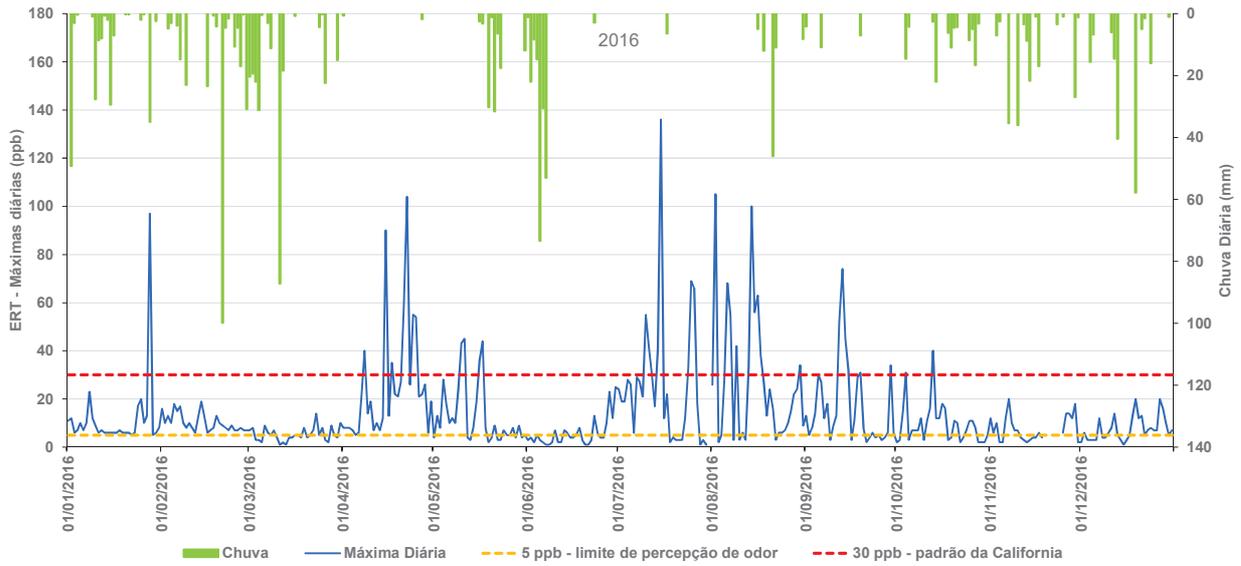
Nota: Por motivos técnicos, o monitoramento de ERT foi interrompido entre 2021 e 2022, nesta estação.

Para melhor visualização, os **Gráficos 2a a 2h** mostram os perfis das máximas diárias de ERT para cada ano (2015 a 2021 e 2023), individualmente, a fim de destacar as concentrações mais elevadas em dias sem ocorrência de chuva. Por motivos técnicos, o monitoramento foi interrompido entre 2021 e 2022.

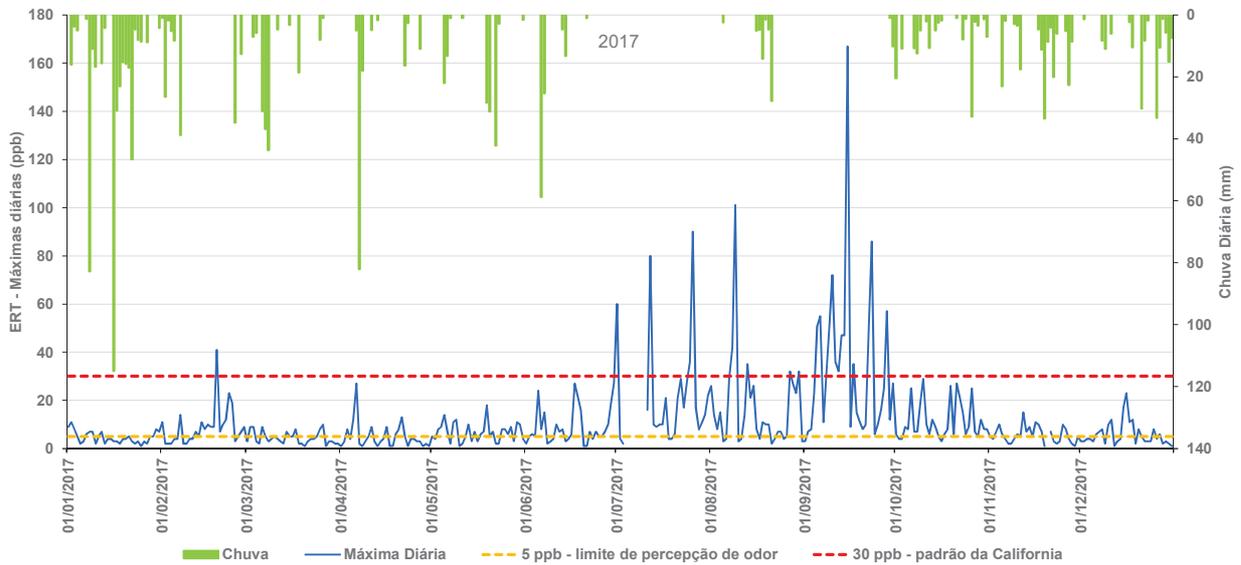
**Gráfico 2a – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2015**



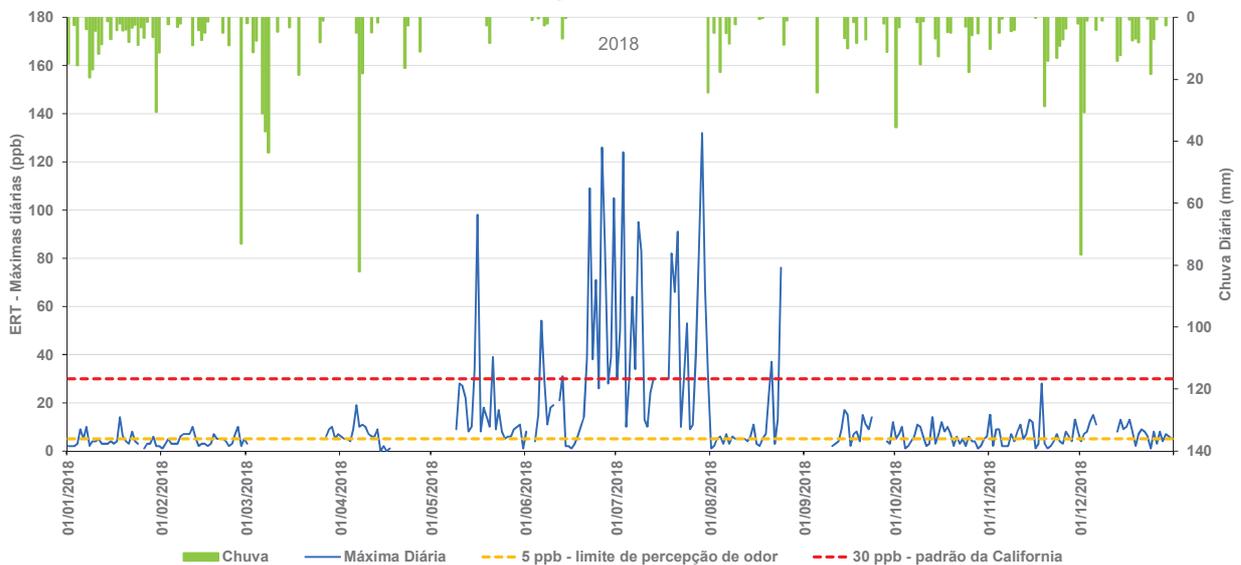
**Gráfico 2b – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2016**



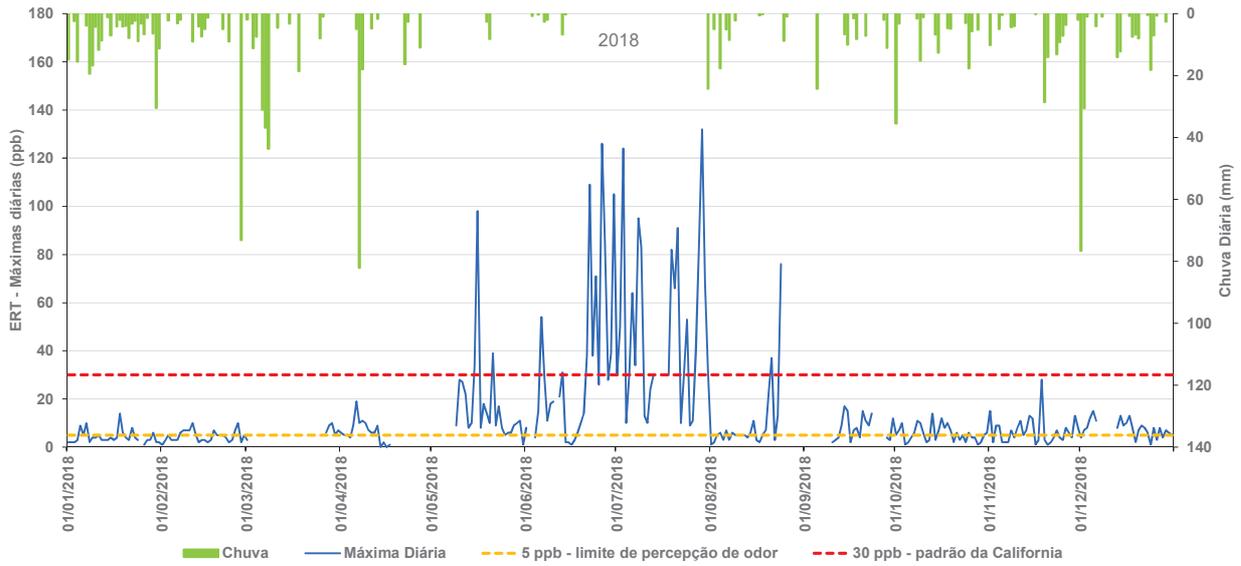
**Gráfico 2c – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2017**



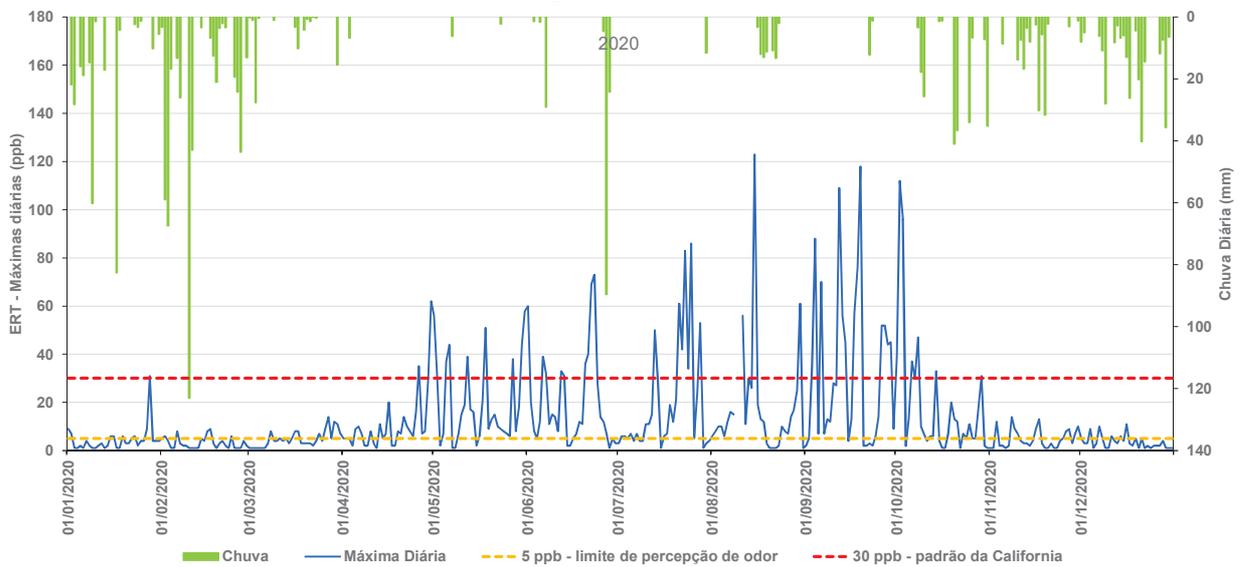
**Gráfico 2d – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2018**



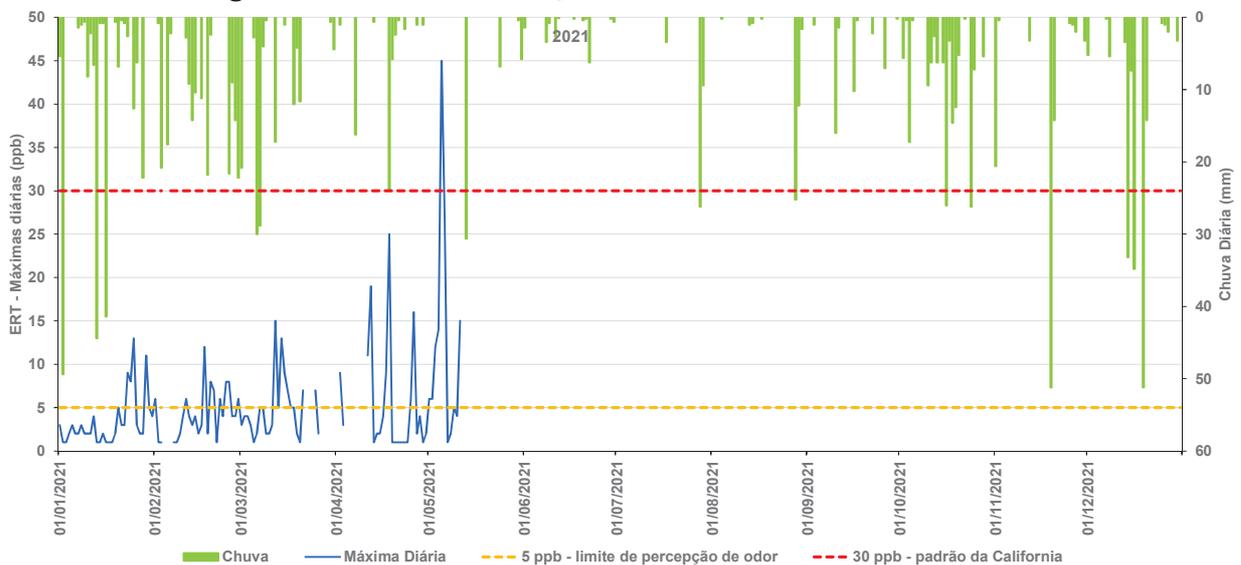
**Gráfico 2e – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2019**



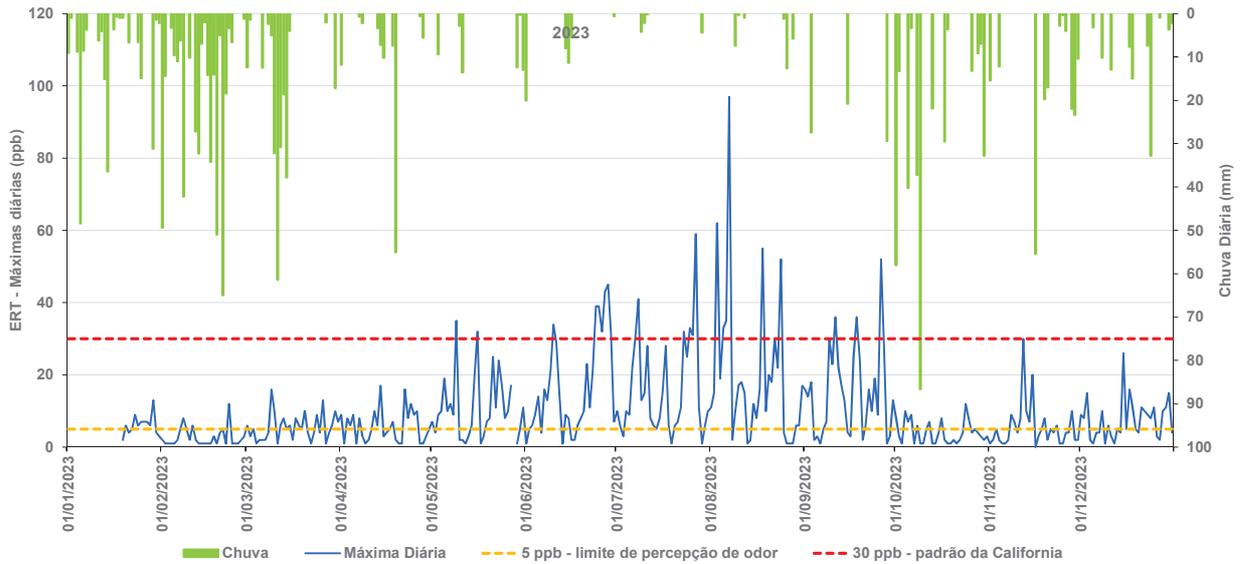
**Gráfico 2f – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2020**



**Gráfico 2g – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2021**

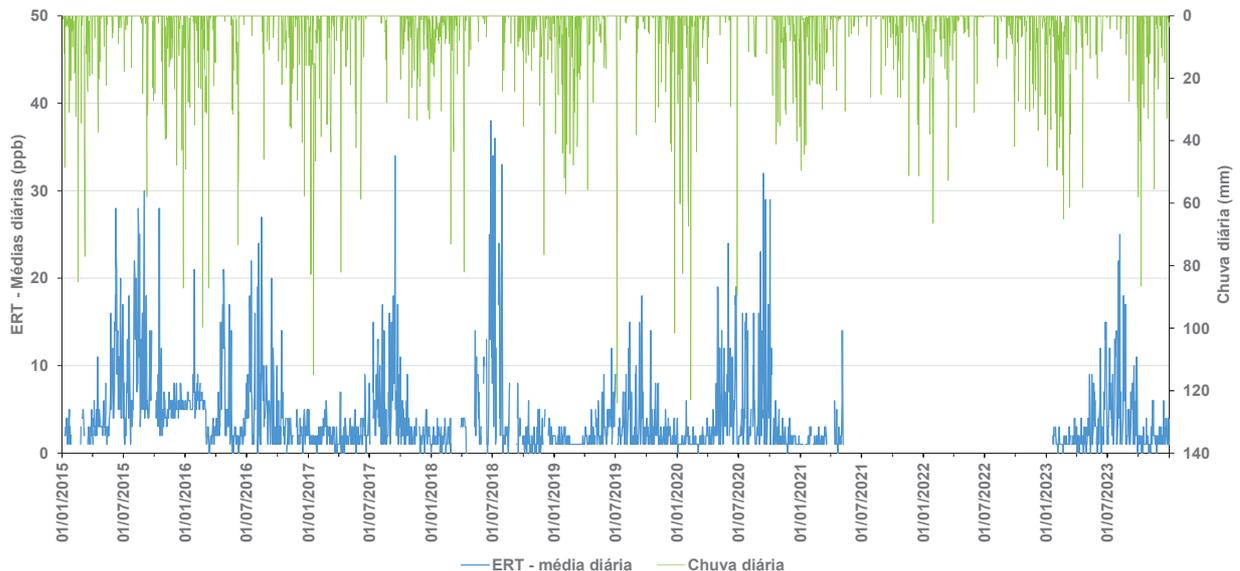


**Gráfico 2h – Máximas concentrações de 1h de ERT x dias de chuva – 2023**



No **Gráfico 3** é apresentada a evolução das concentrações médias diárias de ERT entre 2015 e 2023, sendo possível observar que os valores mais elevados ocorreram em dia com baixa pluviosidade e, principalmente, nos meses de inverno. Observa-se também que os valores diários mais elevados não chegam a 40 ppb, ficando bem abaixo do valor-guia de referência para a saúde da OMS (108 ppb-24h).

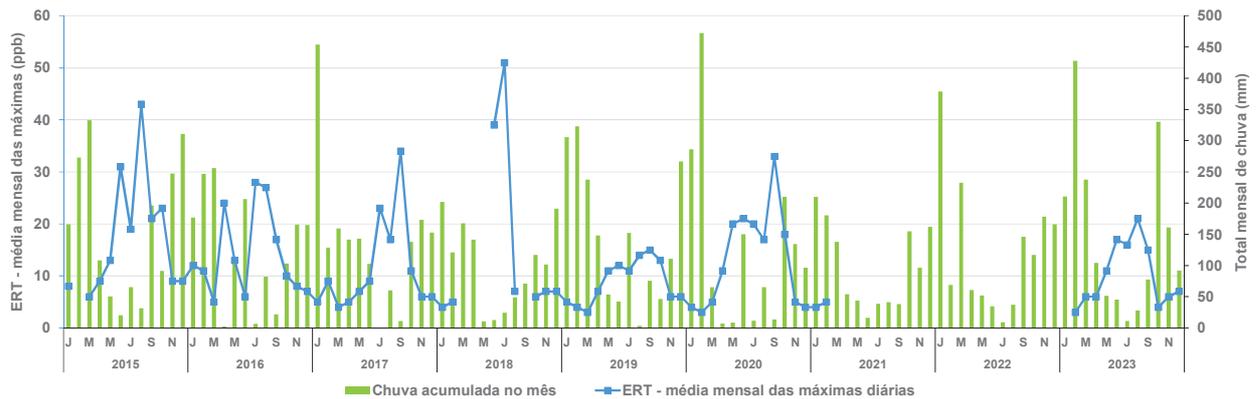
**Gráfico 3 – Concentrações médias diárias de ERT e dias de chuva**



Nota1: Valor guia da OMS = 108 ppb.

Nota2: Por motivos técnicos, o monitoramento de ERT foi interrompido entre 2021 e 2022, nesta estação.

O **Gráfico 4** apresenta as concentrações médias mensais das máximas diárias de ERT e o acumulado mensal de chuva. Pode-se observar os maiores valores das médias mensais de ERT ocorrem nos meses com menores acumulados de chuva, principalmente nos meses de inverno.

**Gráfico 4 – Médias mensais das máximas diárias de ERT**

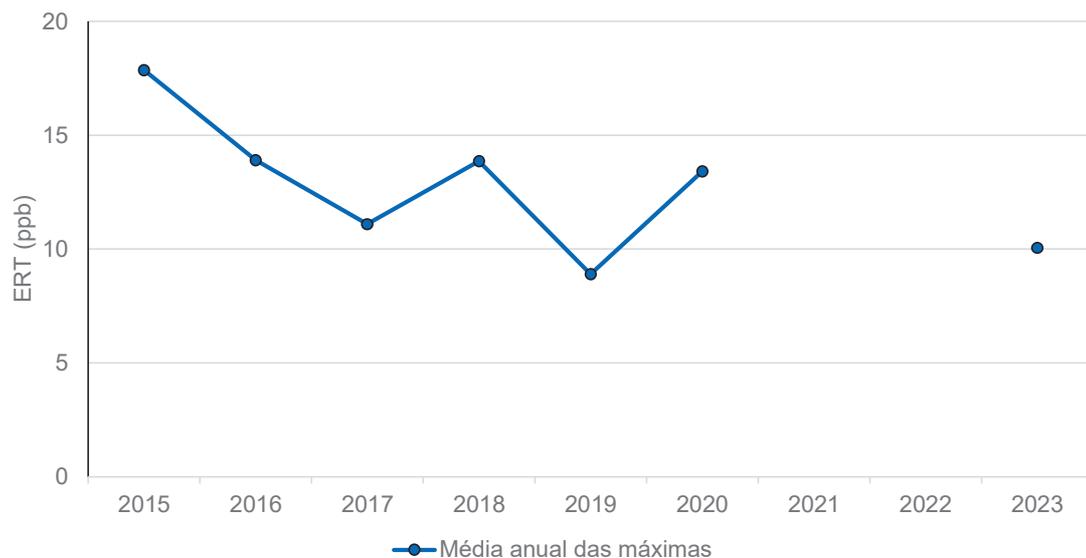
Nota: Por motivos técnicos, o monitoramento de ERT foi interrompido entre 2021 e 2022, nesta estação.

Na **Tabela 3** é apresentado um resumo da ocorrência da máxima média mensal de ERT no ano, total de chuva observado no mês, conforme observado no **Gráfico 4**.

**Tabela 3 – Máxima Média Mensal de ERT no ano e acumulado de chuva no mês**

Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2023
Máxima Média de ERT	43	28	34	51	15	33	21
Chuva mensal	32	6	11	24	76	13	28
mês de ocorrência	ago	jul	set	jul	set	set	ago

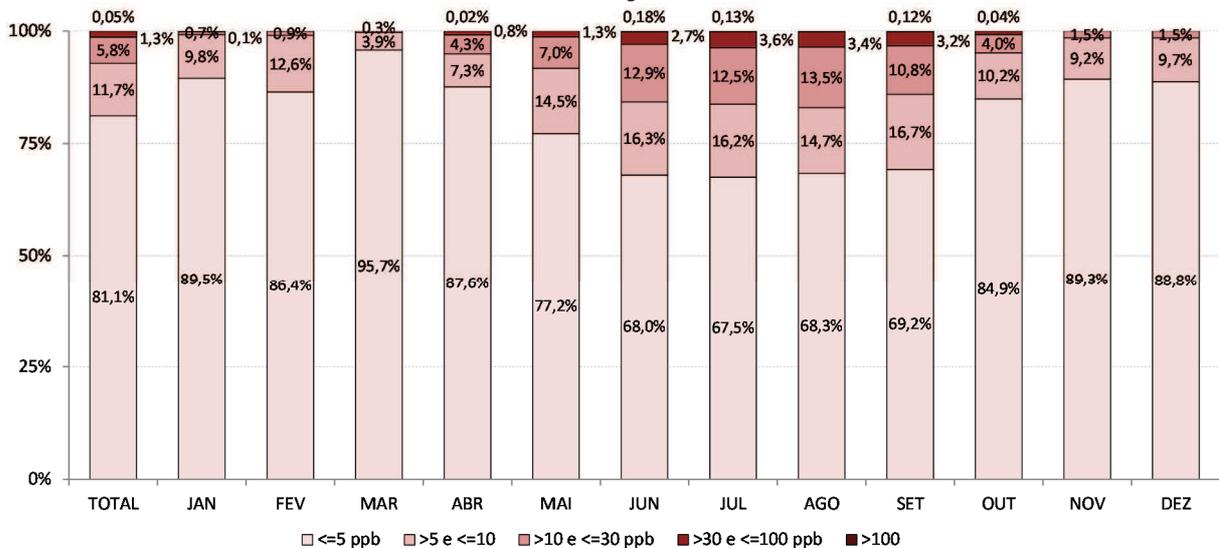
No **Gráfico 5** é apresentada a evolução das médias anuais das concentrações máximas diárias de ERT, onde pode se observar que não há uma tendência definida no comportamento desse poluente.

**Gráfico 5 – Evolução das médias anuais das máximas diárias de ERT**

Nota: Por motivos técnicos, o monitoramento de ERT foi interrompido entre 2021 e 2022, nesta estação.

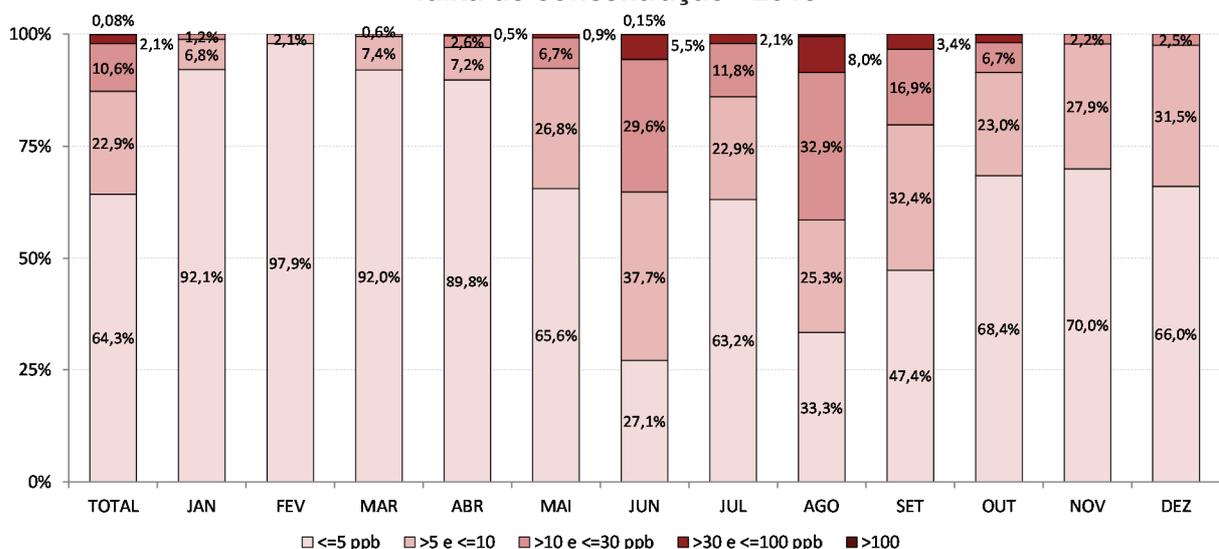
O **Gráfico 6** mostra a distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração, de 2015 a 2023. Observa-se os maiores percentuais acima de 30 ppb entre os meses de junho e setembro, meses em que também ocorrem os maiores valores acima de 100 ppb. Climatologicamente, os meses de maio a setembro possuem os menores índices pluviométricos no estado de São Paulo, inclusive na RMSP. Além de dias mais seco, há ocorrência de maior estabilidade atmosférica e abaixamento da camada de mistura durante a madrugada, influenciando nas condições de dispersão atmosférica. Devido à redução das chuvas, principalmente nos meses de inverno, conseqüentemente, há também redução da vazão no rio Tietê, no período.

**Gráfico 6 – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração – 2015 a 2023**

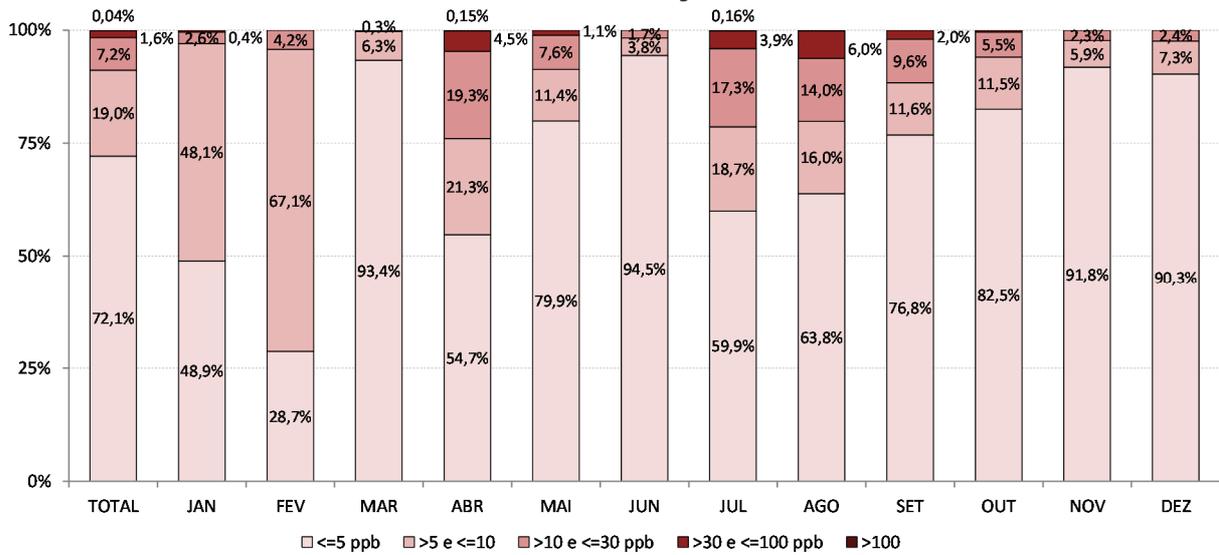


Os **Gráficos 6a a 6h** mostram a distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração e por ano, para melhor visualização das variações mensais, por ano, desse poluente.

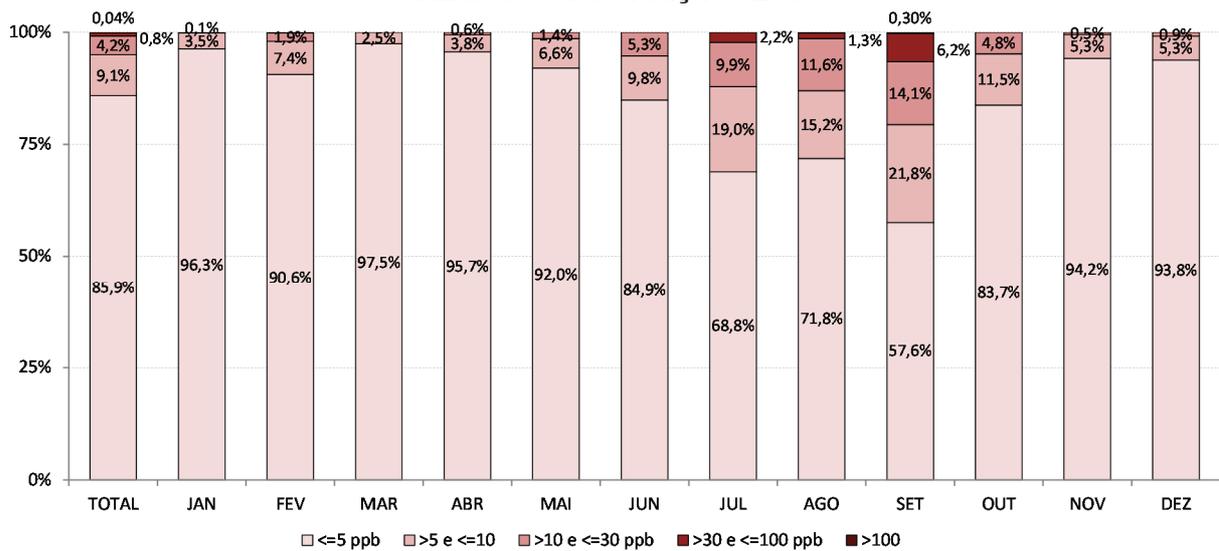
**Gráfico 6a – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2015**



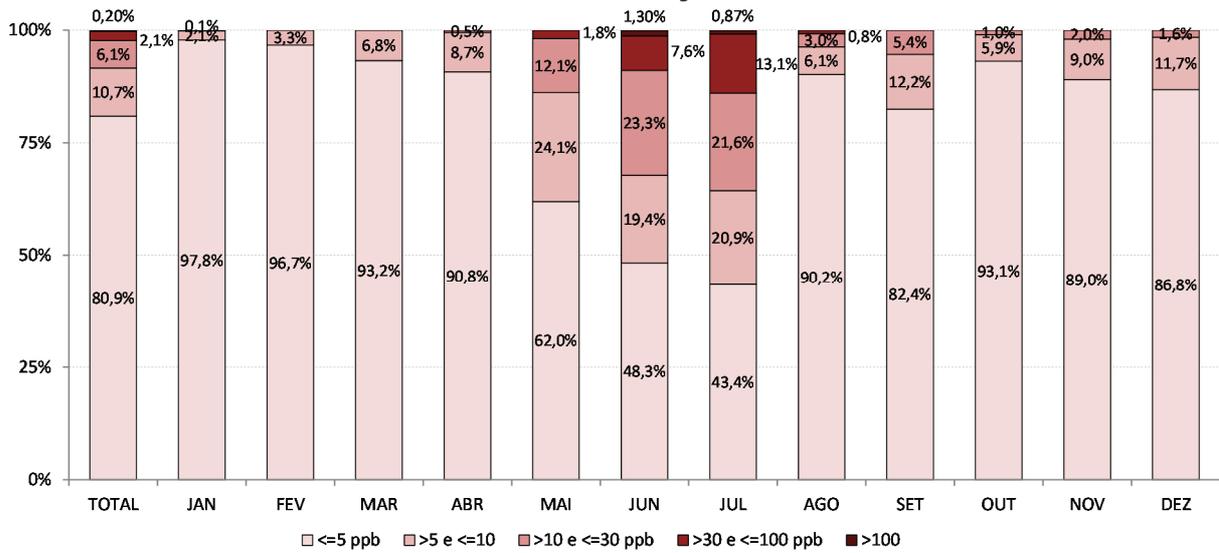
**Gráfico 6b – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2016**



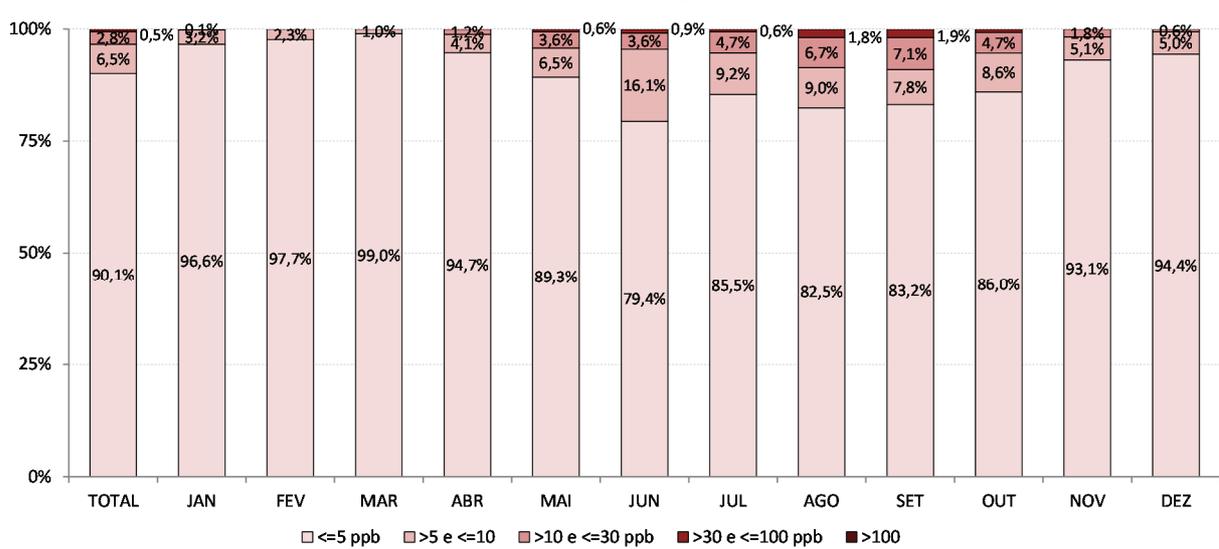
**Gráfico 6c – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2017**



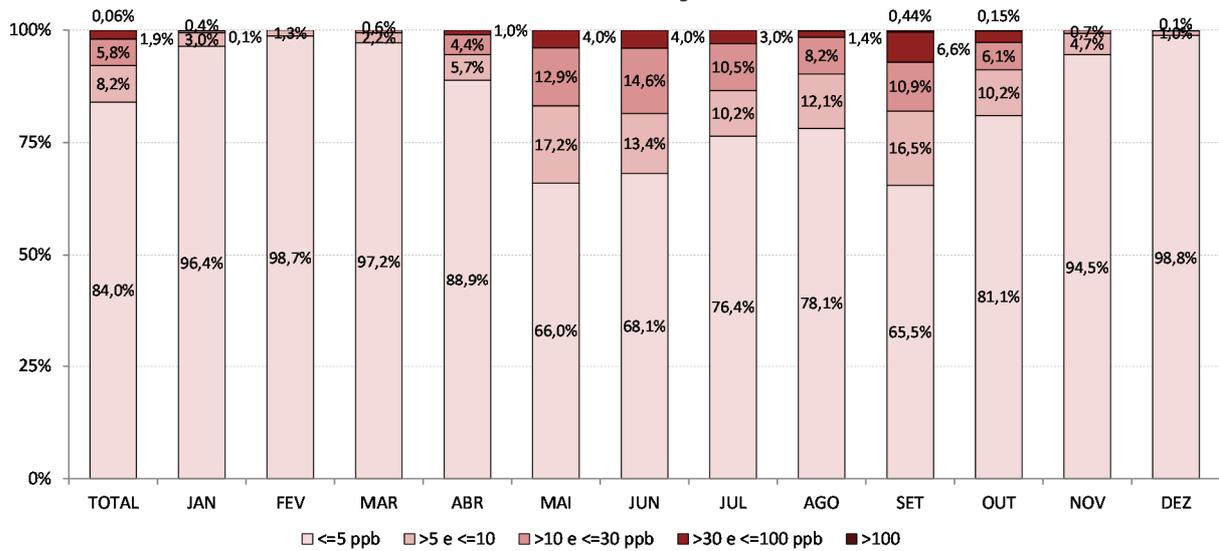
**Gráfico 6d – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2018**



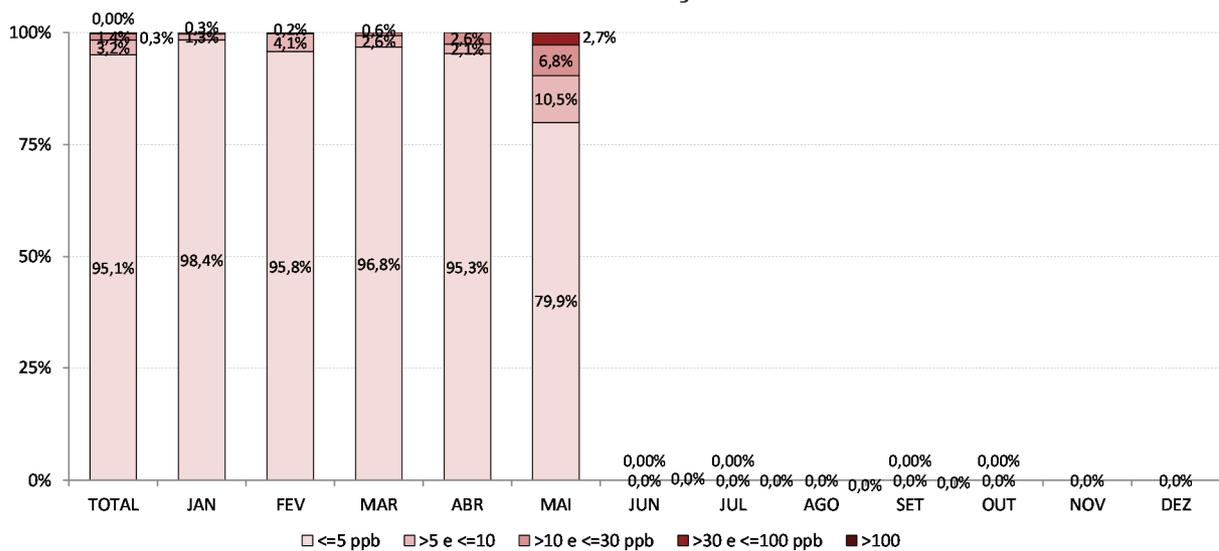
**Gráfico 6e – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2019**

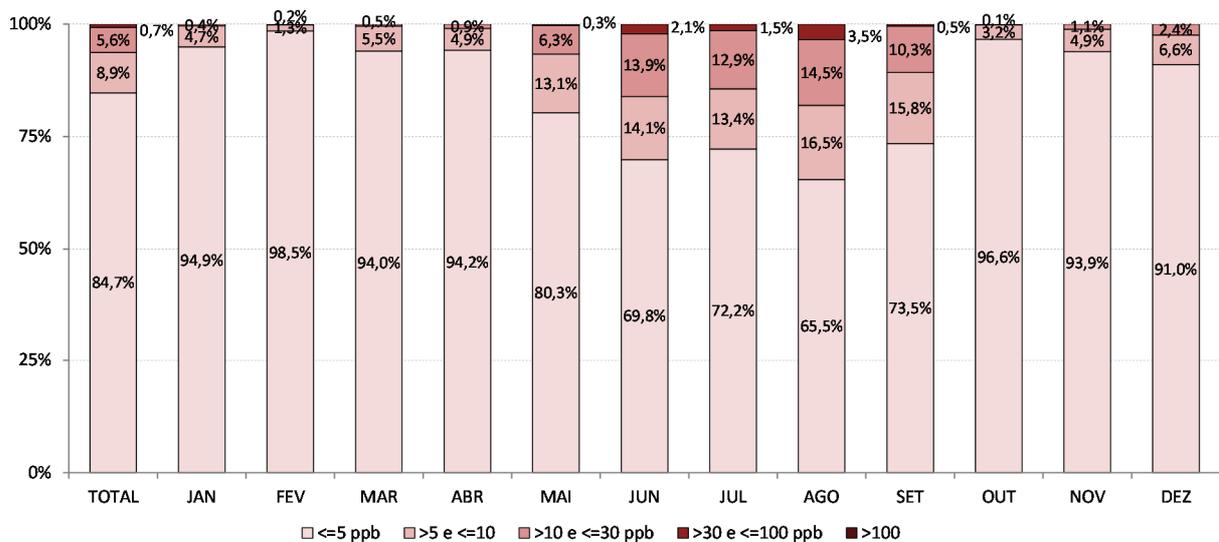


**Gráfico 6f – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2020**



**Gráfico 6g – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2021**



**Gráfico 6h – Distribuição mensal do percentual das concentrações horárias de ERT, por faixa de concentração - 2023**

Na **Tabela 4** é apresentado um resumo das distribuições anuais das concentrações horárias de ERT, detalhadas anteriormente, comparadas ao acumulado de chuva no período. Observa-se que as maiores frequências de valores altos de ERT ocorrem, geralmente, nos anos em que há pluviosidade abaixo da média nos meses de inverno, p.ex., 2015 e 2018 apresentaram os maiores percentuais de valores de ERT acima de 100 ppb e os menores acumulados de chuva nos meses de junho a agosto. Observa-se também um aumento de concentrações menores ou iguais a 5 ppb a partir de 2017.

**Tabela 4 – Percentual da distribuição de frequência das concentrações de ERT, por ano, e chuva acumulada por período**

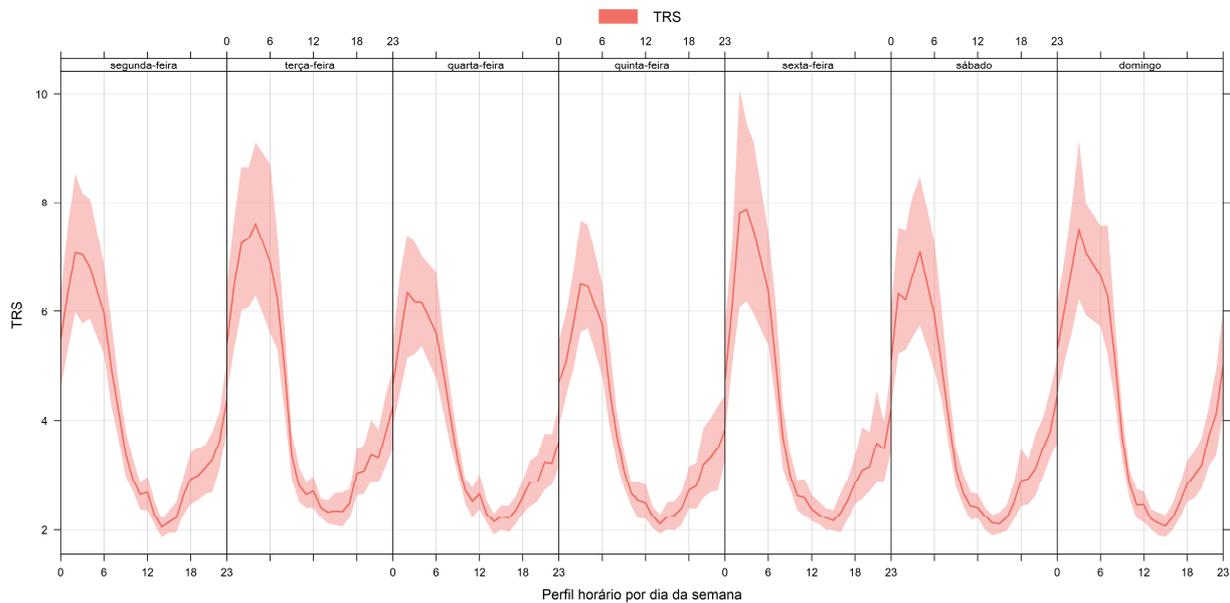
ano	Distribuição das concentrações horárias de ERT (%)					Acumulado de Chuva (mm)		
	<=5 ppb	>5 e <=10	>10 e <=30	>30 e <=100	>100 ppb	anual	mai-set	jun-ago
2015	64,30%	22,92%	10,62%	2,06%	0,08%	1893	364	117
2016	72,15%	19,02%	7,24%	1,56%	0,04%	1537	421	295
2017	85,87%	9,13%	4,17%	0,80%	0,04%	1665	317	163
2018	80,92%	10,66%	6,10%	2,12%	0,20%	1209	167	86
2019	90,10%	6,51%	2,85%	0,55%	0,00%	1769	327	198
2020	83,98%	8,19%	5,85%	1,91%	0,06%	2040	249	227
2021	--	--	--	--	--	--	--	--
2022	--	--	--	--	--	--	--	--
2023	84,73%	8,94%	5,63%	0,70%	0,00%	1829	214	87,9

Nota: Por motivos técnicos, o monitoramento de ERT foi interrompido entre 2021 e 2022, nesta estação.

No **Gráfico 7** é apresentado o perfil semanal das concentrações médias horárias de ERT, para cada dia da semana, de 2015 a 2023. Pode-se observar que as variações dos níveis de ERT entre os dias da semana são muito pequenas, uma vez a principal fonte de emissão é o rio. Os maiores valores médios ocorrem durante a madrugada, que podem estar associados ao abaixamento da camada de mistura na atmosfera, que geralmente

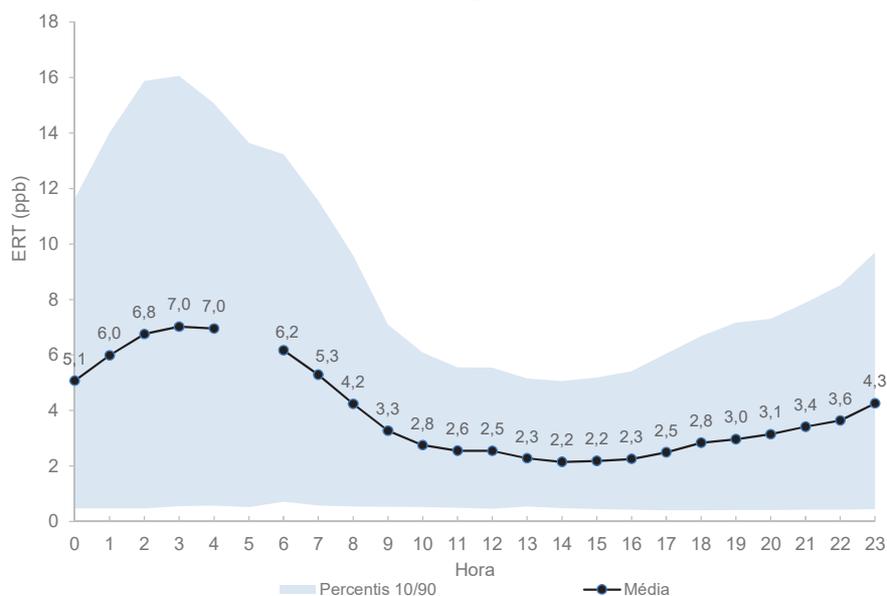
ocorre durante a madrugada até o amanhecer. Durante o dia, os valores são mais baixos em função da ventilação, que melhora a dispersão atmosférica.

**Gráfico 7 – Perfil semanal das concentrações horárias de ERT, por dia da semana**



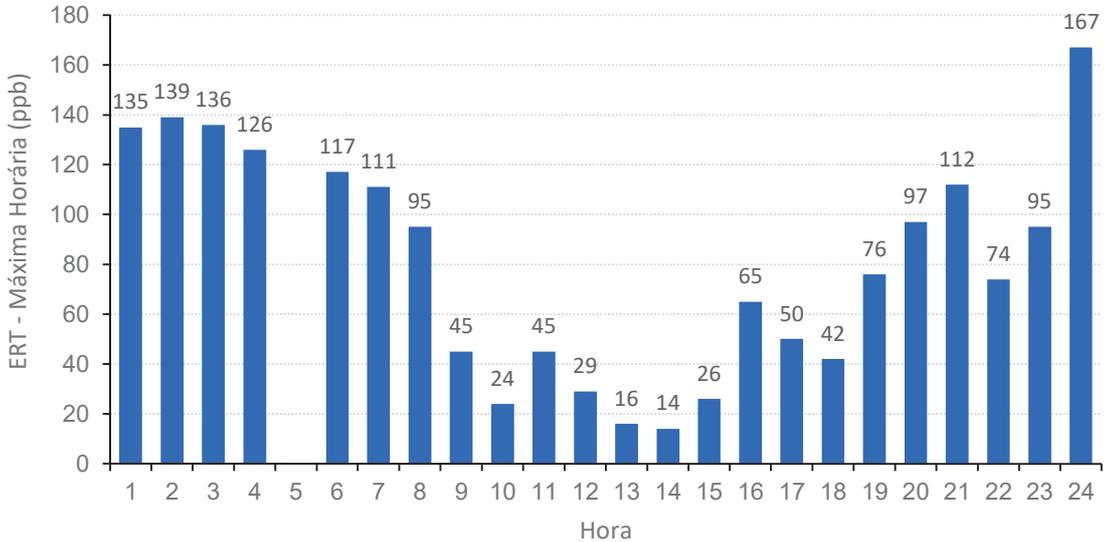
No **Gráfico 8** é mostrado o perfil das concentrações médias horárias e o percentil 10/90, ao longo do dia. Os valores médios foram obtidos pelas médias das concentrações horárias de cada hora do dia, no período 2015 a 2023. Observa-se os maiores valores médios durante a madrugada, período este em que geralmente ocorre o abaixamento da camada de mistura atmosférica.

**Gráfico 8 – Perfil médio das concentrações horárias de ERT e percentil 10/90**



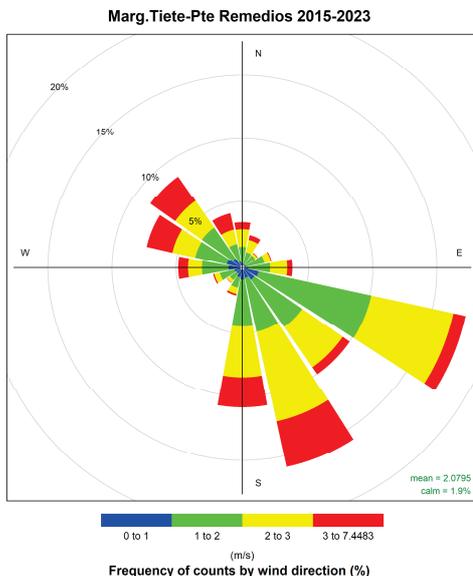
O **Gráfico 9** apresenta o maior valor horário obtido para cada hora específica do dia, considerando todo período em estudo. Observa-se que os maiores valores de cada hora também se deram durante a noite e madrugada.

**Gráfico 9 – Perfil das concentrações máximas horárias de ERT**

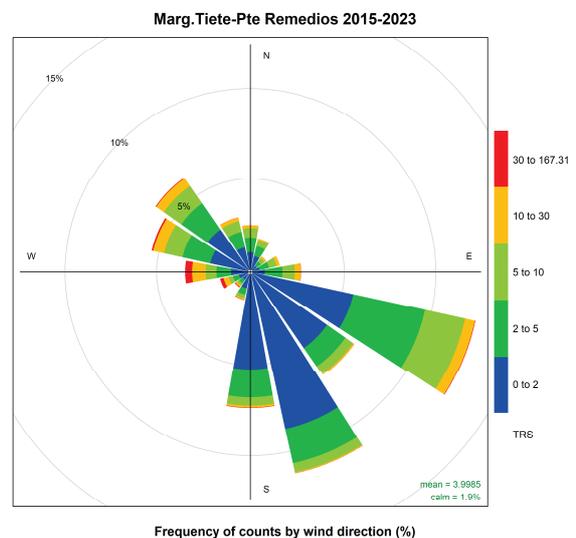


Na **Figura 6** é apresentada a rosa dos ventos para o período de 01/01/2015 a 31/12/2023, utilizando os dados horários de direções e velocidades dos ventos medidos na estação Marginal Tietê-Ponte dos Remédios. Nota-se que as direções dos ventos têm seus sentidos predominantes provenientes do quadrante E-S, seguido por direções do quadrante N-W. Nessa estação, observa-se apenas 1,9% de calmaria (velocidade do vento menor do que 0,5 m/s), para todo o período. A **Figura 7** mostra a distribuição das concentrações horárias de ERT, por setor do vento, para o mesmo período de dados. Observa-se que as maiores concentrações (maior do que 30 ppb) são provenientes da direção oeste (W), seguidas por algumas contribuições da faixa de direções SSW-W-NW. A maioria dos valores abaixo de 5 ppb são provenientes do quadrante E-S.

**Figura 6 – Rosa dos ventos**



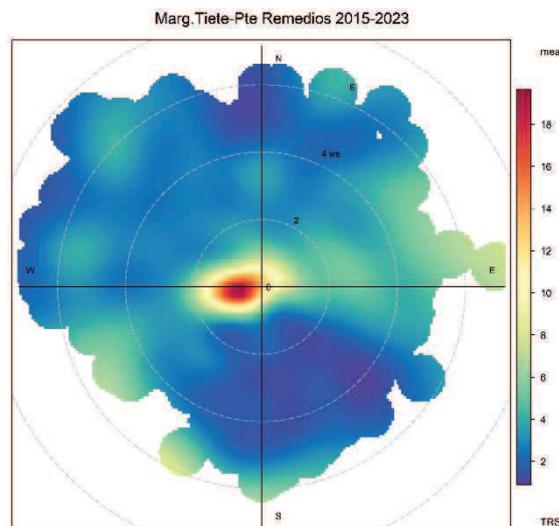
**Figura 7 – Rosa de poluição de ERT**



Na **Figura 8** é mostrada uma representação gráfica polarplot de ERT, considerando as concentrações horárias de ERT e direções e velocidades dos ventos, no período 2015 a 2023. O polarplot é um gráfico polar, onde a localização de um ponto no espaço é feita por um par  $(r, \theta)$  – um raio e um ângulo. Nessa representação do polarplot, o eixo radial representa a velocidade do vento (em m/s) – quanto mais afastado do centro está o ponto, maior a velocidade do vento; o ângulo  $\theta$  representa a direção do vento (variando em setores de 10 graus); e ainda uma terceira informação está associada à concentração média do poluente, cuja graduação é representada numa escala de cores (no **Apêndice**, encontra-se uma descrição mais detalhada do método de cálculo). Ressalte-se que, para cada setor do gráfico, compreendendo um pequeno intervalo de ângulo e de velocidade do vento, pode haver mais de uma medida associada. Neste caso, o valor apresentado graficamente representa o valor médio. Por isso, os valores máximos obtidos no polarplot são menores que os observados no gráfico de concentrações horárias (**Gráfico 1**).

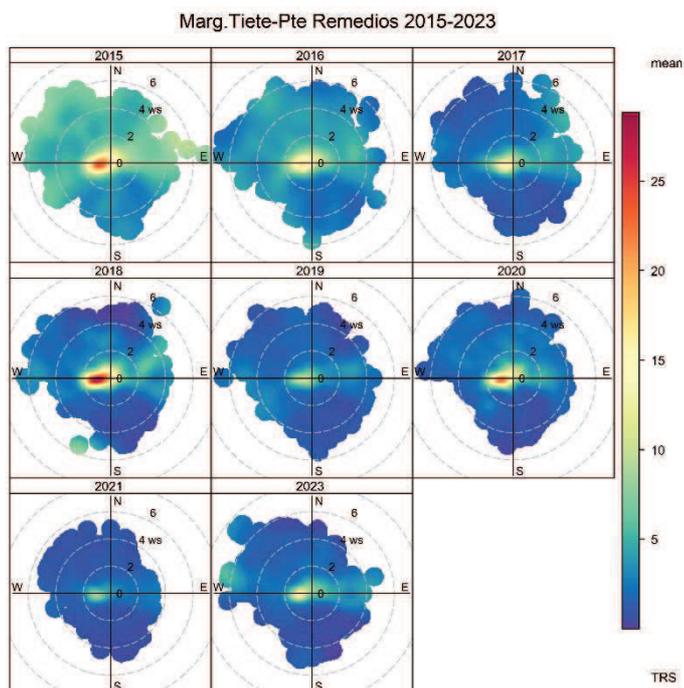
Observa-se (**Figura 8**) que os maiores valores médios de ERT são provenientes da faixa de direções SSW-W-WNW, com ventos fracos (velocidades menores do que 2 m/s), indicando contribuições deste poluente oriundas das águas do rio Tietê, nas proximidades da estação. Há também contribuições provenientes de outras direções, porém com menor intensidade, transportadas pelo vento (velocidades acima de 2 m/s). Por exemplo, concentrações oriundas do quadrante E-N podem ter suas origens provenientes das águas do rio Tietê, na extensão do rio a montante da estação Marginal Tietê-Ponte dos Remédios; já as concentrações oriundas do quadrante S-W, podem ser provenientes das águas do rio Tietê, a jusante da estação.

**Figura 8 – Polarplot de ERT e direção e velocidade dos ventos 2015-2023**



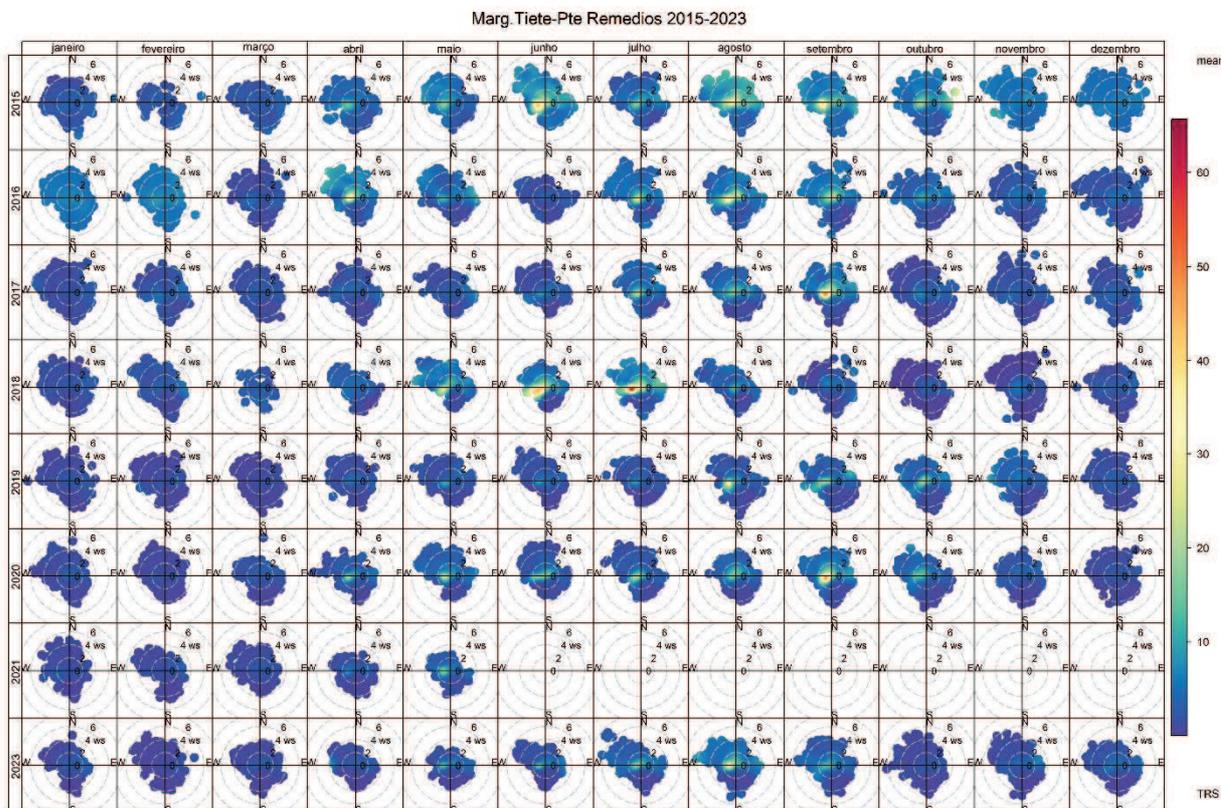
A **Figura 9** mostra a representação gráfica polarplot de ERT para cada ano, onde se observa que 2018, seguido por 2015 e 2020, foram os anos que apresentaram os maiores valores médios, com ventos fracos.

Figura 9 – Polarplot de ERT e direção e velocidade de vento – por ano



A Figura 10 mostra a representação gráfica polarplot de ERT para cada ano e por mês, onde se observa que os maiores valores médios ocorreram nos meses de junho a setembro, com ventos mais fracos.

Figura 10 – Polarplot de ERT e direção e velocidade de vento – por mês



Nota: Por motivos técnicos, o monitoramento de ERT foi interrompido entre 2021 e 2022, nesta estação.

Conforme mencionado anteriormente, o ERT se forma em condições anaeróbicas pela redução biológica dos sulfatos presentes no rio.

É importante considerar que há inúmeras condições que podem interferir nas concentrações de ERT, como por exemplo, pH e temperatura do corpo de água, velocidade e sentido do escoamento do rio, volume de água, acúmulo de detritos na superfície da água e no leito do rio, entre outros fatores. Além disso, as concentrações de ERT na atmosfera também dependem das condições meteorológicas, que podem favorecer ou não a dispersão atmosférica dos poluentes.

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento dos compostos de enxofre reduzido na atmosfera medidos na estação de monitoramento da qualidade do ar Marginal Tietê-Ponte dos Remédios, utilizando dados horários do período de 01/01/2015 a 31/12/2023.

As concentrações mais elevadas de ERT foram detectadas especialmente nos meses de inverno, em dias consecutivos com ausência de chuvas. Essas concentrações foram oriundas principalmente da direção oeste, com ventos fracos (velocidade menor do que 2 m/s), indicando a contribuição das concentrações de ERT proveniente das águas do rio Tietê, nas proximidades da estação. Embora as concentrações excedam os limites de percepção de odor, causando incômodo em algumas ocasiões, o valor-guia para saúde da OMS não foi excedido em nenhuma ocasião do período de estudo.

Nessa estação, foi observado que não houve variação significativa no comportamento das concentrações de ERT ao longo dos anos, indicando que a variação ocorre mais em função das condições meteorológicas.

Os dados gerados constituem em referência importante para futuras avaliações após a implementação do programa Integra Tietê, com previsão de redução da carga de efluentes sanitários lançada no rio, o que poderá refletir na emissão de compostos de enxofre reduzido para atmosfera.

## REFERÊNCIAS

EUA. NDEQ. Nebraska Department of Environmental Quality. *Technical Basis for a Total Reduced Sulfur Ambient Air Quality Standard*. May 1997. Disponível em: [https://www.casahome.org/attachments/CFO\\_interestinginfo\\_trs.pdf](https://www.casahome.org/attachments/CFO_interestinginfo_trs.pdf). Acesso em: ago.2023.

EUA. CARB. California Air Resources Board. *The Perception of Hydrogen Sulfide Odor in Relation to Setting an Ambient Air Quality Standard*. Final Report - contract A4-046-33. April 1985. Disponível em: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/research/apr/past/a4-046-33.pdf>. Acesso em: ago.2023.

EUA. New York State. Department of Environmental Conservation. Official Compilation of Codes, Rules and Regulations. Air Resources. Subpart 257-5.3: *Ambient Air Quality Standard – Hydrogen Sulfide (H<sub>2</sub>S)*. February 2022. Disponível em: [https://govt.westlaw.com/nycrr/Document/I4e9bfb36cd1711dda432a117e6e0f345?viewType=FullText&originationContext=documenttoc&transitionType=CategoryPageItem&contextData=\(sc.Default\)](https://govt.westlaw.com/nycrr/Document/I4e9bfb36cd1711dda432a117e6e0f345?viewType=FullText&originationContext=documenttoc&transitionType=CategoryPageItem&contextData=(sc.Default)). Acesso em: ago.2023.

WHO. World Health Organization. *Air Quality Guidelines for Europe: Chapter 6.6, Hydrogen Sulfide*. Regional Office for Europe. Second Edition, Copenhagen, Denmark, 2000. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107335>. Acesso em: ago.2023.

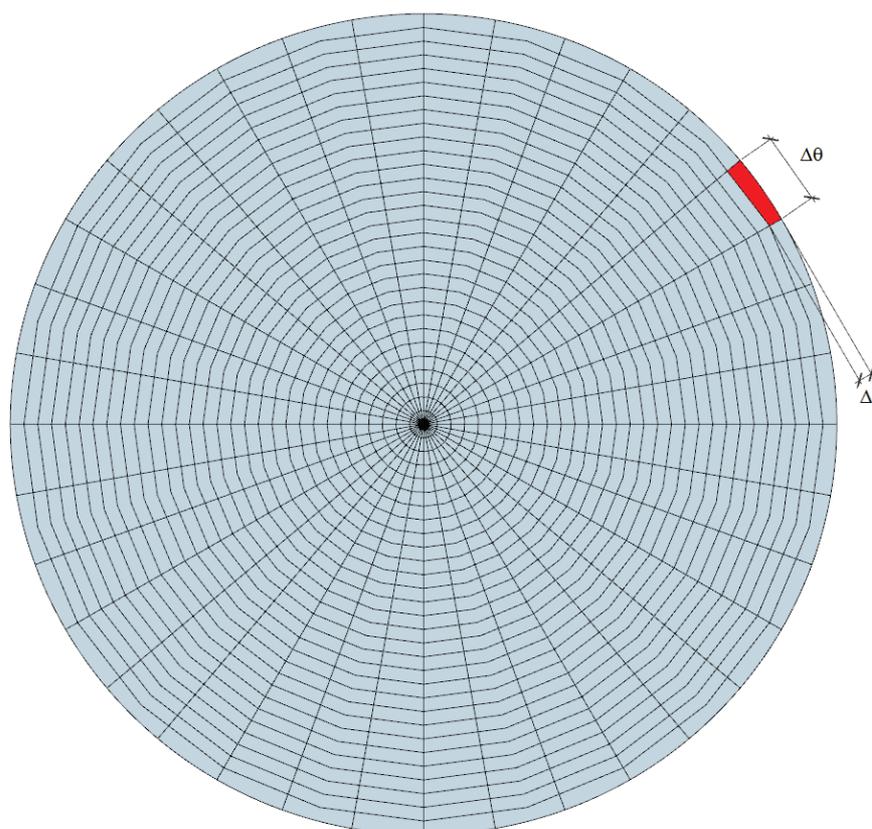
Sullivan, R.J. *Air Pollution Aspects of Odorous Compounds*. 1969.

## APÊNDICE

### Metodologia de cálculo do polarplot

O polarplot é um gráfico polar, ou seja, a localização de um ponto no espaço não é feita por um par  $(x, y)$ , mas por um par  $(r, \theta)$  – um raio e um ângulo. No caso do polarplot, o eixo radial representa a velocidade do vento – quanto mais afastado do centro está o ponto, maior a velocidade do vento; o ângulo  $\theta$  representa a direção do vento. O gráfico fornece ainda uma terceira informação, que é representada por uma cor, associada à concentração do poluente.

A distribuição de pontos no gráfico é feita, inicialmente, dividindo o círculo em pequenas áreas, como na figura abaixo: são 36 intervalos de ângulo ( $\Delta\theta = 10^\circ$ ) e 30 intervalos de velocidade do vento (depende dos dados, pega a velocidade máxima no conjunto de dados e divide por 30:  $\Delta r = w_s \text{ máxima}/30$ ).



Os dados são então distribuídos nessas áreas e é realizado um cálculo estatístico para as concentrações quando mais de um ponto cai dentro da mesma área. O cálculo padrão é a média, mas é possível definir outras funções, como a máxima, a mediana, entre outras. Atribui-se assim para cada área um valor de concentração e cor associada.

O gráfico é o resultado da plotagem de todas as áreas. Ainda é aplicada uma suavização sobre a plotagem, então não é possível enxergar os setores individualmente.



Secretaria de  **SÃO PAULO**  
**Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística** GOVERNO DO ESTADO

Acompanhe as redes sociais da CETESB:

-  Site: [cetesb.sp.gov.br](http://cetesb.sp.gov.br)
-  Facebook: [facebook.com/cetesbsp](https://facebook.com/cetesbsp)
-  LinkedIn: [linkedin.com/company/cetesb](https://linkedin.com/company/cetesb)
-  Instagram: [instagram.com/cetesbsp](https://instagram.com/cetesbsp)
-  SoundCloud: [soundcloud.com/cetesbsp](https://soundcloud.com/cetesbsp)