



Universidad Autónoma del Estado de México



Facultad de Planeación Urbana y Regional

Estudio de las variaciones de las concentraciones de los contaminantes criterio detectados por la RAMA-ZMVT, comparando los periodos 2018-2019 y 2020-2021.

TESIS

Que para obtener el título de:

Licenciada en Ciencias Ambientales

Presenta:

Edith Flores González

Directoras de Tesis:

Dra. en A. Ana Marcela Gómez Hinojos

Dra. en A.D. Gloria Ortega Santillán

Toluca Estado de México, Junio 2023

Índice

| | |
|---|-----------|
| Resumen | 14 |
| Introducción | 15 |
| Esquema de la investigación | 16 |
| • Justificación | 16 |
| • Objetivo general | 16 |
| • Objetivos particulares | 16 |
| • Hipótesis | 17 |
| • Planteamiento del problema | 17 |
| Metodología | 18 |
| Proceso de la investigación..... | 18 |
| Desglose de actividades | 18 |
| Alcance de la investigación | 18 |
| Diseño de la investigación | 18 |
| Población de estudio | 19 |
| Instrumento de medición | 19 |
| Recolección de datos | 19 |
| Análisis estadístico | 19 |
| Capítulo 1. Antecedentes | 21 |
| 1.1 Ámbito Internacional..... | 22 |
| 1.1.1 Valle del Meuse, Bélgica 1930..... | 22 |
| 1.1.2 Donora Pensilvania, Estados Unidos 1948..... | 22 |
| 1.1.3 Londres, Inglaterra 1952 | 23 |
| 1.1.4 Región Metropolitana de Sao Paulo (RMSP), Brasil 2003 | 23 |
| 1.1.5 Región Metropolitana de Santiago, Chile 2003 | 23 |
| 1.1.6 Dock Sud, Argentina 2017 | 23 |
| 1.1.7 Erupción del volcán Cumbre Vieja, España 2021 | 24 |
| 1.2 Ámbito nacional | 24 |
| 1.2.1 Zona Metropolitana del Valle de México..... | 24 |
| 1.2.2 Zona Centro de Guadalajara | 25 |
| 1.2.3 Zona Metropolitana de Monterrey..... | 25 |
| 1.2.4 Municipio de Puebla, Puebla..... | 25 |
| 1.2.5 Zona urbana y rural de Mexicali, Baja California | 26 |
| 1.3 Ámbito Local..... | 26 |
| 1.3.1 Contaminantes Criterio..... | 26 |
| 1.3.1.1 Monóxido de carbono CO | 27 |

| | |
|---|-----------|
| 1.3.1.2 Ozono O ₃ | 27 |
| 1.3.1.3 Bióxido de nitrógeno NO ₂ | 27 |
| 1.3.1.4 Material particulado PM ₁₀ | 28 |
| 1.3.1.5 Material particulado PM _{2.5} | 28 |
| 1.3.1.6 Bióxido de azufre SO ₂ | 28 |
| Epílogo | 29 |
| Capítulo 2. Marco teórico-conceptual | 30 |
| 2.1 Contaminación ambiental..... | 31 |
| 2.2 La atmósfera | 31 |
| 2.2.1 Contaminación atmosférica..... | 32 |
| 2.2.2 Clasificación de la contaminación..... | 33 |
| 2.2.3 Contaminantes que dañan la atmósfera | 33 |
| 2.2.4 Fuentes de contaminación atmosférica..... | 34 |
| 2.2.5 Escalas de contaminación atmosférica | 35 |
| 2.3 Contaminantes Criterio..... | 35 |
| 2.3.1 Monóxido de carbono CO | 35 |
| 2.3.1.1 Efectos del monóxido de carbono CO en la salud..... | 36 |
| 2.3.1.2 Efectos del monóxido de carbono CO en el medio ambiente | 36 |
| 2.3.2 Ozono O ₃ | 36 |
| 2.3.2.1 Efectos del ozono O ₃ en la salud | 37 |
| 2.3.2.2 Efectos del ozono O ₃ en el medio ambiente..... | 37 |
| 2.3.3 Bióxido de nitrógeno NO ₂ | 38 |
| 2.3.3.1 Efectos del bióxido de nitrógeno NO ₂ en la salud..... | 38 |
| 2.3.3.2 Efectos del bióxido de nitrógeno NO ₂ en el medio ambiente..... | 38 |
| 2.3.4 Bióxido de azufre SO ₂ | 39 |
| 2.3.4.1 Efectos del bióxido de azufre SO ₂ en la salud | 39 |
| 2.3.4.1 Efectos del bióxido de azufre SO ₂ en el medio ambiente..... | 39 |
| 2.3.4.1.1 Lluvia ácida | 39 |
| 2.3.5 Material particulado PM ₁₀ | 40 |
| 2.3.5.1 Efectos del material particulado PM ₁₀ en la salud..... | 40 |
| 2.3.5.2 Efectos del material particulado PM ₁₀ en el medio ambiente | 40 |
| 2.3.6 Material particulado PM _{2.5} | 41 |
| 2.3.6.1 Efectos del material particulado PM _{2.5} en la salud | 41 |
| 2.3.6.1 Efectos del material particulado PM _{2.5} en el medio ambiente | 42 |
| 2.4 Monitoreo atmosférico | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.1 Programa de gestión para mejorar la calidad del aire (Pro-Aire) | 42 |
| 2.4.2 Red Automática de Monitoreo Atmosférico RAMA | 43 |
| 2.4.2.1 Factores que intervienen en el diseño de la RAMA | 43 |
| 2.4.3 Estaciones de monitoreo atmosférico | 43 |
| 2.5 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire IMECA | 44 |
| Epílogo | 45 |
| Capítulo 3. Marco contextual..... | 46 |
| 3.1 Localización..... | 47 |
| 3.2 Caracterización natural de la ZMVT | 49 |
| 3.2.1 Orografía y relieve de la ZMVT..... | 49 |
| 3.2.2 Clima de la ZMVT | 51 |
| 3.2.2.1 Meteorología de la ZMVT..... | 53 |
| 3.2.2.1.2 Precipitación | 53 |
| 3.2.2.1.3 Temperatura..... | 53 |
| 3.2.2.1.4 Presión atmosférica | 53 |
| 3.2.2.2 Velocidad y dirección del viento de la ZMVT | 54 |
| 3.2.3 Uso del suelo y vegetación de la ZMVT | 55 |
| 3.3 Caracterización socioeconómica de la ZMVT | 56 |
| 3.3.1 Población de la ZMVT | 56 |
| 3.3.2 Actividades económicas de la ZMVT | 58 |
| 3.3.2.1 Vías de comunicación y transporte..... | 59 |
| 3.4 Funcionamiento de la RAMA..... | 59 |
| 3.4.1 Las estaciones de la RAMA en la ZMVT | 60 |
| 3.4.1 Reportes de la calidad del aire en la ZMVT | 63 |
| Epílogo | 66 |
| Capítulo 4. Marco jurídico | 67 |
| 4.1 Normatividad internacional | 68 |
| 4.1.1 Parámetros de la Organización Mundial de la Salud (OMS) | 68 |
| 4.1.2 Parámetros de la <i>Environmental Protection Agency</i> (EPA)..... | 69 |
| 4.1.3 Parámetros de la Unión Europea (UE) | 70 |
| 4.2 Normatividad nacional | 71 |
| 4.2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos..... | 71 |
| 4.2.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) | 71 |
| 4.2.3 Normas Oficiales Mexicanas NOM | 74 |
| 4.2.3.1 Normas aplicables para el monitoreo de la calidad del aire | 74 |
| 4.2.3.1.1 Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012 Sistemas de | |

| | |
|---|-----------|
| monitoreo..... | 74 |
| 4.2.3.1.2 Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 Índice Aire y Salud | 75 |
| 4.2.3.2 Normatividad de los Contaminantes Criterio | 76 |
| 4.2.3.2.1 Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2021 O ₃ | 76 |
| 4.2.3.2.2 Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021 CO | 77 |
| 4.2.3.2.3 Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019 SO ₂ | 77 |
| 4.2.3.2.4 Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021 NO ₂ | 77 |
| 4.2.3.2.5 Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 PM _{2.5} y PM ₁₀ | 77 |
| 4.2.3.2.6 mites máximos permisibles para Contaminantes Criterio en México | 78 |
| 4.3 Normatividad estatal..... | 79 |
| 4.3.1 Código para la Biodiversidad del Estado de México (CBEM)..... | 79 |
| 4.4 Diferencia entre los límites máximos permisibles..... | 81 |
| Epílogo | 82 |
| Capítulo 5. Resultados y observaciones | 83 |
| 5.1 Alcance de medición de las estaciones de monitoreo..... | 84 |
| 5.2 Concentraciones de los Contaminantes Criterio en la ZMVT 2018-2021 | 87 |
| 5.2.1 Concentraciones de monóxido de carbono CO 2018-2021 | 88 |
| 5.2.1.1 Concentraciones por día de monóxido de carbono CO | 88 |
| 5.2.1.2 Concentraciones en enero de monóxido de carbono CO..... | 89 |
| 5.2.1.3 Concentraciones en abril de monóxido de carbono CO | 90 |
| 5.2.1.4 Concentraciones en julio de monóxido de carbono CO | 91 |
| 5.2.1.5 Concentraciones en octubre de monóxido de carbono CO..... | 92 |
| 5.2.1.6 aaciones por estación del año de monóxido de carbono CO 2018-2021 | 93 |
| 5.2.2 Concentraciones de ozono O ₃ 2018-2021 | 94 |
| 5.2.2.1 Concentraciones por día de ozono O ₃ | 94 |
| 5.2.2.2 Concentraciones en enero de ozono O ₃ | 95 |
| 5.2.2.3 Concentraciones en abril de ozono O ₃ | 96 |
| 5.2.2.4 Concentraciones en julio de ozono O ₃ | 97 |
| 5.2.2.5 Concentraciones en octubre de ozono O ₃ | 98 |
| 5.2.2.6 Concentraciones por estación del año de ozono O ₃ 2018-2021 | 99 |
| 5.2.3 Concentraciones de bióxido de azufre SO ₂ 2018-2021 | 100 |
| 5.2.3.1 Concentraciones por día de bióxido de azufre SO ₂ | 100 |
| 5.2.3.2 Concentraciones en enero de bióxido de azufre SO ₂ | 101 |
| 5.2.3.3 Concentraciones en abril de bióxido de azufre SO ₂ | 102 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.2.3.4 | Concentraciones en julio de bióxido de azufre SO ₂ | 103 |
| 5.2.3.5 | Concentraciones en octubre de bióxido de azufre SO ₂ | 104 |
| 5.2.3.6 | aciones por estación del año de bióxido de azufre SO ₂ 2018-2021 | 105 |
| 5.2.4 | Concentraciones de bióxido de nitrógeno NO ₂ 2018-2021 | 106 |
| 5.2.4.1 | Concentraciones por día de bióxido de nitrógeno NO ₂ | 106 |
| 5.2.4.2 | Concentraciones en enero de bióxido de nitrógeno NO ₂ | 107 |
| 5.2.4.3 | Concentraciones en abril de bióxido de nitrógeno NO ₂ | 108 |
| 5.2.4.4 | Concentraciones en julio de bióxido de nitrógeno NO ₂ | 109 |
| 5.2.4.5 | Concentraciones en octubre de bióxido de nitrógeno NO ₂ | 110 |
| 5.2.4.6 | aciones por estación del año de bióxido de nitrógeno NO ₂ 2018- 2021 | 111 |
| 5.2.5 | Concentraciones de material particulado PM ₁₀ 2018-2021 | 112 |
| 5.2.5.1 | Concentraciones por día de material particulado PM ₁₀ | 112 |
| 5.2.5.2 | Concentraciones en enero de material particulado PM ₁₀ | 113 |
| 5.2.5.3 | Concentraciones en abril de material particulado PM ₁₀ | 114 |
| 5.2.5.4 | Concentraciones en julio de material particulado PM ₁₀ | 115 |
| 5.2.5.5 | Concentraciones en octubre de material particulado PM ₁₀ | 116 |
| 5.2.5.6 | aciones por estación del año de material particulado PM ₁₀ 2018- 2021 | 117 |
| 5.2.6 | Concentraciones de material particulado PM _{2.5} 2018-2021..... | 118 |
| 5.2.6.1 | Concentraciones por día de material particulado PM _{2.5} | 118 |
| 5.2.6.2 | Concentraciones en enero de material particulado PM _{2.5} | 119 |
| 5.2.6.3 | Concentraciones en abril de material particulado PM _{2.5} | 120 |
| 5.2.6.4 | Concentraciones en julio de material particulado PM _{2.5} | 121 |
| 5.2.6.5 | Concentraciones en octubre de material particulado PM _{2.5} | 122 |
| 5.2.6.6 | Concentraciones por estación del año de material particulado PM _{2.5} | 123 |
| 5.3 | Dinámica de vientos en la ZMVT | 124 |
| 5.3.1 | Dirección y velocidad del viento 2018..... | 126 |
| 5.3.2 | Dirección y velocidad del viento 2019 | 127 |
| 5.3.3 | Dirección y velocidad del viento 2020..... | 128 |
| 5.3.3 | Dirección y velocidad del viento 2021 | 129 |
| 5.3.4 | Relación entre la dirección y velocidad del viento con respecto a las concentraciones de contaminantes criterio | 130 |
| 5.4 | Transporte y vialidades en la ZMVT 2018-2021 | 134 |
| | Epílogo | 136 |

| | |
|--|------------|
| Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones..... | 137 |
| 6.1 Conclusiones..... | 138 |
| 6.2 Recomendaciones | 141 |
| Bibliografía | 142 |

Índice de Figuras

Capítulo 2. Marco teórico-conceptual

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 2. 1 Capas de la atmósfera.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 2. 2 Tamaño del material particulado.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 2. 3 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire</i> | <i>44</i> |

Capítulo 3. Marco contextual

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 3. 1 Mapa de localización de la ZMVT</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 3. 2 Mapa de orografía de la ZMVT.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figura 3. 3 Mapa de climas en la ZMVT</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 3. 4 Rosa de los vientos de la ZMVT 2015-2015.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Figura 3. 5 Automóviles registrados en la ZMVT.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 3. 6 Mapa de estaciones de monitoreo 2018.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 3. 7 Mapa de estaciones de monitoreo 2021</i> | <i>62</i> |
| <i>Figura 3. 8 Reporte horario de la calidad del aire en la ZMVT (ICA).....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 3. 9 Mapa diario de la calidad del aire en la ZMVT.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 3. 10 Reporte mensual de la calidad del aire en la ZMVT.....</i> | <i>65</i> |

Capítulo 5. Resultados y observaciones

| | |
|---|------------|
| <i>Figura 5. 1 Mapa de alcance de medición de las estaciones de monitoreo 2018.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figura 5. 2 Mapa de alcance de medición de las estaciones de monitoreo 2021.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Figura 5. 3 Rosa de vientos 2018 ZMVT.....</i> | <i>126</i> |
| <i>Figura 5. 4 Rosa de vientos 2019 ZMVT.....</i> | <i>127</i> |
| <i>Figura 5. 5 Rosa de vientos 2020 ZMVT.....</i> | <i>128</i> |
| <i>Figura 5. 6 Rosa de vientos 2021 ZMVT.....</i> | <i>129</i> |

Índice de Tablas

Capítulo 2. Marco teórico-conceptual

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabla 2. 1 Matriz de clasificación de la contaminación.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Tabla 2. 2 Clasificación de las fuentes de contaminación</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabla 2. 3 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire</i> | <i>44</i> |

Capítulo 3. Marco contextual

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabla 3. 1 Municipios ZMVT.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Tabla 3. 2 Elevaciones en la ZMVT</i> | <i>49</i> |
| <i>Tabla 3. 3 Población ZMVT</i> | <i>56</i> |

Capítulo 4. Marco jurídico

| | |
|--|----|
| Tabla 4. 1 Parámetros OMS..... | 68 |
| Tabla 4. 2 Estándares de la EPA..... | 69 |
| Tabla 4. 3 Estándares de calidad del aire en la Unión Europea | 70 |
| Tabla 4. 4 Artículos en materia de contaminación atmosférica..... | 72 |
| Tabla 4. 5 Categorías del Índice Aire y Salud..... | 75 |
| Tabla 4. 6 Recomendaciones asociadas a las categorías de calidad del aire y riesgos a la salud | 76 |
| Tabla 4. 7 Límite máximo permisible de las partículas suspendidas | 78 |
| Tabla 4. 8 Artículos en materia de contaminación atmosférica del CBEM..... | 79 |
| Tabla 4. 9 Comparación entre límites máximos permisibles de contaminantes criterio | 81 |

Capítulo 5. Resultados y observaciones

| | |
|-------------------------------------|-----|
| Tabla 5. 1 Escala de Beaufort | 125 |
|-------------------------------------|-----|

Índice de Gráficas

Capítulo 3. Marco contextual

| | |
|--|----|
| Gráfica 3. 1 Porcentaje de población por municipio en la ZMVT..... | 57 |
| Gráfica 3. 2 Población por edad en la ZMVT | 58 |

Capítulo 5. Resultados y observaciones

Concentraciones de monóxido de carbono CO

| | |
|---|----|
| Gráfica 5.2.1. 1 Promedio por día de CO por EMA 2018 | 88 |
| Gráfica 5.2.1. 2 Promedio por día de CO por EMA 2019 | 88 |
| Gráfica 5.2.1. 3 Promedio por día de CO por EMA 2020 | 88 |
| Gráfica 5.2.1. 4 Promedio por día de CO por EMA 2021 | 88 |
| Gráfica 5.2.1. 5 Promedio en enero de CO por EMA 2018..... | 89 |
| Gráfica 5.2.1. 6 Promedio en enero de CO por EMA 2019..... | 89 |
| Gráfica 5.2.1. 7 Promedio en enero de CO por EMA 2020..... | 89 |
| Gráfica 5.2.1. 8 Promedio en enero de CO por EMA 2021 | 89 |
| Gráfica 5.2.1. 9 Promedio en abril de CO por EMA 2018 | 90 |
| Gráfica 5.2.1. 10 Promedio en abril de CO por EMA 2019 | 90 |
| Gráfica 5.2.1. 11 Promedio en abril de CO por EMA 2020 | 90 |
| Gráfica 5.2.1. 12 Promedio en abril de CO por EMA 2021 | 90 |
| Gráfica 5.2.1. 13 Promedio en julio de CO por EMA 2018..... | 91 |
| Gráfica 5.2.1. 14 Promedio en julio de CO por EMA 2019..... | 91 |
| Gráfica 5.2.1. 15 Promedio en julio de CO por EMA 2020..... | 91 |
| Gráfica 5.2.1. 16 Promedio en julio de CO por EMA 2021..... | 91 |
| Gráfica 5.2.1. 17 Promedio en octubre de CO por EMA 2018..... | 92 |
| Gráfica 5.2.1. 18 Promedio en octubre de CO por EMA 2019..... | 92 |

| | |
|---|----|
| Gráfica 5.2.1.19 Promedio en octubre de CO por EMA 2020 | 92 |
| Gráfica 5.2.1.20 Promedio en octubre de CO por EMA 2021 | 92 |
| Gráfica 5.2.1.21 Promedio anual de CO por EMA 2018 | 93 |
| Gráfica 5.2.1.22 Promedio anual de CO por EMA 2019 | 93 |
| Gráfica 5.2.1. 21 Promedio anual de CO por EMA 2018..... | 92 |
| Gráfica 5.2.1. 22 Promedio anual de CO por EMA 2019..... | 92 |
| Gráfica 5.2.1. 24 Promedio anual de CO por EMA 2021..... | 93 |
| Gráfica 5.2.1. 23 Promedio anual de CO por EMA 2020..... | 93 |

Concentraciones de ozono O₃

| | |
|--|----|
| Gráfica 5.2.2. 1 Promedio por día de O ₃ por EMA 2018..... | 94 |
| Gráfica 5.2.2. 2 Promedio por día de O ₃ por EMA 2019..... | 94 |
| Gráfica 5.2.2. 3 Promedio por día de O ₃ por EMA 2020..... | 94 |
| Gráfica 5.2.2. 4 Promedio por día de O ₃ por EMA 2021..... | 94 |
| Gráfica 5.2.2. 5 Promedio en enero de O ₃ por EMA 2018 | 95 |
| Gráfica 5.2.2. 6 Promedio en enero de O ₃ por EMA 2019 | 95 |
| Gráfica 5.2.2. 7 Promedio en enero de O ₃ por EMA 2020 | 95 |
| Gráfica 5.2.2. 8 Promedio en enero de O ₃ por EMA 2021 | 95 |
| Gráfica 5.2.2. 9 Promedio en abril de O ₃ por EMA 2018..... | 96 |
| Gráfica 5.2.2. 10 Promedio en abril de O ₃ por EMA 2019..... | 96 |
| Gráfica 5.2.2. 11 Promedio en abril de O ₃ por EMA 2020..... | 96 |
| Gráfica 5.2.2. 12 Promedio en abril de O ₃ por EMA 2021..... | 96 |
| Gráfica 5.2.2. 13 Promedio en julio de O ₃ por EMA 2018..... | 97 |
| Gráfica 5.2.2. 14 Promedio en julio de O ₃ por EMA 2019..... | 97 |
| Gráfica 5.2.2. 15 Promedio en julio de O ₃ por EMA 2020 | 97 |
| Gráfica 5.2.2. 16 Promedio en julio de O ₃ por EMA 2021 | 97 |
| Gráfica 5.2.2. 17 Promedio en octubre de O ₃ por EMA 2018 | 98 |
| Gráfica 5.2.2. 18 Promedio en octubre de O ₃ por EMA 2019 | 98 |
| Gráfica 5.2.2. 19 Promedio en octubre de O ₃ por EMA 2019 | 98 |
| Gráfica 5.2.2. 20 Promedio en octubre de O ₃ por EMA 2021 | 98 |
| Gráfica 5.2.2. 21 Promedio anual de O ₃ por EMA 2018..... | 99 |
| Gráfica 5.2.2. 22 Promedio anual de O ₃ por EMA 2019 | 99 |
| Gráfica 5.2.2. 23 Promedio anual de O ₃ por EMA 2020..... | 99 |
| Gráfica 5.2.2. 24 Promedio anual de O ₃ por EMA 2021 | 99 |

Bióxido de azufre SO₂

| | |
|--|-----|
| Gráfica 5.2.3. 1 Promedio por día de SO ₂ por EMA 2018..... | 100 |
| Gráfica 5.2.3. 2 Promedio por día de SO ₂ por EMA 2019..... | 100 |
| Gráfica 5.2.3. 3 Promedio por día de SO ₂ por EMA 2020..... | 100 |
| Gráfica 5.2.3. 4 Promedio por día de SO ₂ por EMA 2021..... | 100 |
| Gráfica 5.2.3. 5 Promedio en enero de SO ₂ por EMA 2018 | 101 |
| Gráfica 5.2.3. 6 Promedio en enero de SO ₂ por EMA 2019 | 101 |
| Gráfica 5.2.3. 7 Promedio en enero de SO ₂ por EMA 2020 | 101 |
| Gráfica 5.2.3. 8 Promedio en enero de SO ₂ por EMA 2021 | 101 |
| Gráfica 5.2.3. 9 Promedio en abril de SO ₂ por EMA 2018..... | 102 |

| | |
|---|-----|
| <i>Gráfica 5.2.3. 10 Promedio en abril de SO₂ por EMA 2019</i> | 102 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 11 Promedio en abril de SO₂ por EMA 2020</i> | 102 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 12 Promedio en abril de SO₂ por EMA 2021</i> | 102 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 13 Promedio en julio de SO₂ por EMA 2018</i> | 103 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 14 Promedio en julio de SO₂ por EMA 2019</i> | 103 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 15 Promedio en julio de SO₂ por EMA 2020</i> | 103 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 16 Promedio en julio de SO₂ por EMA 2021</i> | 103 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 17 Promedio en octubre de SO₂ por EMA 2018</i> | 104 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 18 Promedio en octubre de SO₂ por EMA 2019</i> | 104 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 19 Promedio en octubre de SO₂ por EMA 2020</i> | 104 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 20 Promedio en octubre de SO₂ por EMA 2021</i> | 104 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 21 Promedio anual de SO₂ por EMA 2018</i> | 105 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 22 Promedio anual de SO₂ por EMA 2019</i> | 105 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 23 Promedio anual de SO₂ por EMA 2020</i> | 105 |
| <i>Gráfica 5.2.3. 24 Promedio anual de SO₂ por EMA 2021</i> | 105 |

Bióxido de nitrógeno NO₂

| | |
|---|-----|
| <i>Gráfica 5.2.4. 1 Promedio por día de NO₂ por EMA 2018</i> | 106 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 2 Promedio por día de NO₂ por EMA 2019</i> | 106 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 3 Promedio por día de NO₂ por EMA 2020</i> | 106 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 4 Promedio por día de NO₂ por EMA 2021</i> | 106 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 5 Promedio en enero de NO₂ por EMA 2018</i> | 107 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 6 Promedio en enero de NO₂ por EMA 2019</i> | 107 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 7 Promedio en enero de NO₂ por EMA 2020</i> | 107 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 8 Promedio en enero de NO₂ por EMA 2021</i> | 107 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 9 Promedio en abril de NO₂ por EMA 2018</i> | 108 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 10 Promedio en abril de NO₂ por EMA 2019</i> | 108 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 11 Promedio en abril de NO₂ por EMA 2020</i> | 108 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 12 Promedio en abril de NO₂ por EMA 2021</i> | 108 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 13 Promedio en julio de NO₂ por EMA 2018</i> | 109 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 14 Promedio en julio de NO₂ por EMA 2019</i> | 109 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 15 Promedio en julio de NO₂ por EMA 2020</i> | 109 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 16 Promedio en julio de NO₂ por EMA 2021</i> | 109 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 17 Promedio en octubre de NO₂ por EMA 2018</i> | 110 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 18 Promedio en octubre de NO₂ por EMA 2019</i> | 110 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 19 Promedio en octubre de NO₂ por EMA 2020</i> | 110 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 20 Promedio en octubre de NO₂ por EMA 2021</i> | 110 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 21 Promedio anual de NO₂ por EMA 2018</i> | 111 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 22 Promedio anual de NO₂ por EMA 2019</i> | 111 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 23 Promedio anual de NO₂ por EMA 2020</i> | 111 |
| <i>Gráfica 5.2.4. 24 Promedio anual de NO₂ por EMA 2021</i> | 111 |

Material particulado PM₁₀

| | |
|--|-----|
| <i>Gráfica 5.2.5. 1 Promedio por día de PM₁₀ por EMA 2018</i> | 112 |
| <i>Gráfica 5.2.5. 2 Promedio por día de PM₁₀ por EMA 2019</i> | 112 |

| | |
|---|-----|
| Gráfica 5.2.5. 3 Promedio por día de PM ₁₀ por EMA 2021..... | 112 |
| Gráfica 5.2.5. 4 Promedio por día de PM ₁₀ por EMA 2020..... | 112 |
| Gráfica 5.2.5. 5 Promedio en enero de PM ₁₀ por EMA 2018..... | 113 |
| Gráfica 5.2.5. 6 Promedio en enero de PM ₁₀ por EMA 2019..... | 113 |
| Gráfica 5.2.5. 7 Promedio en enero de PM ₁₀ por EMA 2020..... | 113 |
| Gráfica 5.2.5. 8 Promedio en enero de PM ₁₀ por EMA 2021..... | 113 |
| Gráfica 5.2.5. 9 Promedio en abril de PM ₁₀ por EMA 2018..... | 114 |
| Gráfica 5.2.5. 10 Promedio en abril de PM ₁₀ por EMA 2019..... | 114 |
| Gráfica 5.2.5. 11 Promedio en abril de PM ₁₀ por EMA 2020..... | 114 |
| Gráfica 5.2.5. 12 Promedio en abril de PM ₁₀ por EMA 2021..... | 114 |
| Gráfica 5.2.5. 13 Promedio en julio de PM ₁₀ por EMA 2018..... | 115 |
| Gráfica 5.2.5. 14 Promedio en julio de PM ₁₀ por EMA 2019..... | 115 |
| Gráfica 5.2.5. 15 Promedio en julio de PM ₁₀ por EMA 2021..... | 115 |
| Gráfica 5.2.5. 16 Promedio en julio de PM ₁₀ por EMA 2020..... | 115 |
| Gráfica 5.2.5. 17 Promedio en octubre de PM ₁₀ por EMA 2018..... | 116 |
| Gráfica 5.2.5. 18 Promedio en octubre de PM ₁₀ por EMA 2019..... | 116 |
| Gráfica 5.2.5. 19 Promedio en octubre de PM ₁₀ por EMA 2020..... | 116 |
| Gráfica 5.2.5. 20 Promedio en octubre de PM ₁₀ por EMA 2021..... | 116 |
| Gráfica 5.2.5. 21 Promedio anual de PM ₁₀ por EMA 2018..... | 117 |
| Gráfica 5.2.5. 22 Promedio anual de PM ₁₀ por EMA 2019..... | 117 |
| Gráfica 5.2.5. 23 Promedio anual de PM ₁₀ por EMA 2020..... | 117 |
| Gráfica 5.2.5. 24 Promedio anual de PM ₁₀ por EMA 2021..... | 117 |

Material particulado PM_{2.5}

| | |
|--|-----|
| Gráfica 5.2.6. 1 Promedio por día de PM _{2.5} por EMA 2018..... | 118 |
| Gráfica 5.2.6. 2 Promedio por día de PM _{2.5} por EMA 2019..... | 118 |
| Gráfica 5.2.6. 3 Promedio por día de PM _{2.5} por EMA 2020..... | 118 |
| Gráfica 5.2.6. 4 Promedio por día de PM _{2.5} por EMA 2021..... | 118 |
| Gráfica 5.2.6. 5 Promedio en enero de PM _{2.5} por EMA 2018..... | 119 |
| Gráfica 5.2.6. 6 Promedio en enero de PM _{2.5} por EMA 2019..... | 119 |
| Gráfica 5.2.6. 7 Promedio en enero de PM _{2.5} por EMA 2020..... | 119 |
| Gráfica 5.2.6. 8 Promedio en enero de PM _{2.5} por EMA 2021..... | 119 |
| Gráfica 5.2.6. 9 Promedio en abril de PM _{2.5} por EMA 2018..... | 120 |
| Gráfica 5.2.6. 10 Promedio en abril de PM _{2.5} por EMA 2019..... | 120 |
| Gráfica 5.2.6. 11 Promedio en abril de PM _{2.5} por EMA 2020..... | 120 |
| Gráfica 5.2.6. 12 Promedio en abril de PM _{2.5} por EMA 2021..... | 120 |
| Gráfica 5.2.6. 13 Promedio en julio de PM _{2.5} por EMA 2018..... | 121 |
| Gráfica 5.2.6. 14 Promedio en julio de PM _{2.5} por EMA 2019..... | 121 |
| Gráfica 5.2.6. 15 Promedio en julio de PM _{2.5} por EMA 2020..... | 121 |
| Gráfica 5.2.6. 16 Promedio en julio de PM _{2.5} por EMA 2021..... | 121 |
| Gráfica 5.2.6. 17 Promedio en octubre de PM _{2.5} por EMA 2018..... | 122 |
| Gráfica 5.2.6. 18 Promedio en octubre de PM _{2.5} por EMA 2019..... | 122 |
| Gráfica 5.2.6. 19 Promedio en octubre de PM _{2.5} por EMA 2020..... | 122 |
| Gráfica 5.2.6. 20 Promedio en octubre de PM _{2.5} por EMA 2021..... | 122 |
| Gráfica 5.2.6. 21 Promedio anual de PM _{2.5} por EMA 2018..... | 123 |

| | |
|---|------------|
| <i>Gráfica 5.2.6. 22 Promedio anual de PM_{2.5} por EMA 2019.....</i> | <i>123</i> |
| <i>Gráfica 5.2.6. 23 Promedio anual de PM_{2.5} por EMA 2020.....</i> | <i>123</i> |
| <i>Gráfica 5.2.6. 24 Promedio anual de PM_{2.5} por EMA 2021.....</i> | <i>123</i> |

Transporte y vialidades de la ZMVT

| | |
|---|------------|
| <i>Gráfica 5.4 1 Vehículos registrados en la ZMVT 2018-2021</i> | <i>134</i> |
| <i>Gráfica 5.4 2 Transito diario promedio anual en la ZMVT 2018-2021.....</i> | <i>135</i> |

Glosario

- EPA: Environmental Protection Agency
- LMP: Límite Máximo Permisible
- mg/m³: microgramos sobre metro cubico = 0.00000.1 g / metro cubico (1000L)
- OMS: Organización Mundial de la Salud
- ppb: partes por billón= 1 ppm = 1000 ppb
- ppm: partes por millón= 1mg/l
- RAMA: Red Automática de monitoreo atmosférico
- UE: Unión Europea
- ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Resumen

Los problemas ambientales pueden llegar a tener repercusiones en la salud humana de manera directa o indirecta, en el caso de la contaminación atmosférica esta repercute de las dos formas, con síntomas leves que pueden ser pasados por desapercibidos a graves y las principales causas son las actividades industriales y el uso de combustibles fósiles lo que provoca el deterioro de la calidad del aire.

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico RAMA, es la encargada de monitorear la calidad del aire con las concentraciones de Contaminantes Criterio (ozono O₃, bióxido de nitrógeno NO₂, bióxido de azufre SO₂, monóxido de carbono CO, material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}) conocidos como criterio ya que se encuentran regulados por sus efectos nocivos en la población y tienen establecidos Límites Máximos Permisibles en México por las Normas Oficiales Mexicanas para cada uno, además la RAMA mide distintas variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, precipitación velocidad y dirección del viento, presión atmosférica entre otras en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca en las diferentes estaciones de monitoreo atmosférico que se encuentran en la ZMVT y con ello dan a conocer el estado de la calidad del aire a la población con reportes horarios, diarios y mensuales.

A través de análisis cartográficos y gráficos el presente trabajo tiene la finalidad de cuantificar las concentraciones promedio de Contaminantes Criterio en dos periodos antes de la pandemia por SARS COVID-19 (2018-2019) el durante y después de la pandemia (2020-2021) para así observar las variabilidades de las emisiones de estos contaminantes y si con el confinamiento influyo en la reducción de la contaminación atmosférica en la ZMVT.

Introducción

Una de las principales problemáticas ambientales que afecta a la salud de la población es la contaminación atmosférica, ya que esta incide en el aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares principalmente y contribuye significativamente en la pérdida de millones de años de vida en los países con ingresos bajos o medios (OMS, 2021a).

Acorde con la OMS (2021a), los niveles de contaminación y el deterioro de la calidad del aire se presentan en los países en desarrollo derivado de la urbanización y al desarrollo económico que está basado en un modelo capitalista que explota los combustibles fósiles en gran medida y al uso ineficiente de energías alternativas, así mismo en 2019 por ejemplo diversos países superaron los límites máximos permisibles de concentraciones de contaminantes criterio repercutiendo en la salud de las personas.

Los daños a la salud van a depender del tiempo de exposición y concentraciones de los Contaminantes Criterio, por ello son importantes los reportes de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), así los habitantes pueden conocer el estado de la calidad del aire y tomar las precauciones correspondientes.

La presente investigación está enfocada a dicha problemática, las concentraciones de los contaminantes criterio de la ZMVT. En el primer capítulo se abordan los antecedentes en donde se mencionan los sucesos de contaminación atmosférica e investigaciones relacionadas con la problemática a nivel internacional, nacional y local. El marco teórico conceptual expone los principales conceptos relacionados con la contaminación del aire, tipos de contaminantes, efectos y sus principales fuentes; El marco contextual en donde se brinda un panorama general de la situación actual de la zona, desde su población y actividades económicas hasta sus características naturales como clima y orografía.

El marco jurídico, enuncia las principales instituciones que regulan la calidad del aire como lo es la Organización Mundial de la Salud (OMS) a nivel internacional, las leyes y normas oficiales mexicanas que buscan regular y establecer límites máximos permisibles de los contaminantes criterios en el ámbito nacional y el principal instrumento regulado a nivel estatal, que es el Código para la Biodiversidad. Los resultados, en donde a través de un análisis cuantitativo se grafican las concentraciones de contaminantes criterio, así como la representación de rosas del viento para representar su velocidad y dirección en la ZMVT la velocidad y dirección del viento, que es la variable meteorológica que puede influir en el comportamiento de los contaminantes criterio y una serie de recomendaciones en cuanto a cómo se debe reportar la calidad del aire y que medidas debe tomar la población de la zona de estudio.

Esquema de la investigación

Muestra la justificación, así como la generación de los objetivos particulares y específicos los cuales son los que guían y establecen lo que se pretende lograr con la presente investigación. La hipótesis que son explicaciones tentativas de un fenómeno o problema, investigado como proposiciones o afirmaciones que guían el estudio, relacionan variables o pronostican algo y el último punto que forma parte del esquema de la investigación es el planteamiento del problema el cual consiste en estructurar la idea de la investigación (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018)

● Justificación

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) genera datos y reportes de calidad del aire dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), estos se pueden consultar en su página de web, sin embargo, el propósito de este trabajo de investigación es llevar a cabo un análisis de las concentraciones de los Contaminantes Criterio del 2018-2019 y 2020-2021, en el que se puede observar el aumento o disminución que pudieran presentar los niveles de concentración de cada contaminante y las variaciones para cada una de las estaciones de monitoreo atmosférico de la zona de estudio, ya que estas también a lo largo de este periodo se han incrementado.

La importancia de esta investigación radica en que los contaminantes criterio deben ser monitoreados en toda la ZMVT para conocer su comportamiento y sus concentraciones, el estudio de los dos periodos de tiempo (2018-2019 y 2020-2021) permite tener información reciente sobre las concentraciones de los contaminantes lo que puede incidir en la planificación de programas y toma de decisiones encaminados a disminuir o controlar la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera.

● Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es:

Analizar las variaciones de concentraciones de los contaminantes criterio, en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) con los datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), en los periodos 2018-2019 y 2020-2021.

● Objetivos particulares

- Elaborar los antecedentes sobre estudios acerca de contaminación atmosférica y Contaminantes Criterio.
- Realizar un marco teórico conceptual en el que se definan y aborden los temas y subtemas referentes a la investigación.
- Elaborar un marco jurídico a un nivel internacional, nacional y local referente al monitoreo atmosférico, contaminación atmosférica y Contaminantes Criterio.
- Identificar y geolocalizar las estaciones de monitoreo atmosférico los periodos 2018-2019 y 2020-2021.

- Comparar el alcance de medición de las estaciones de monitoreo atmosférico en los periodos 2018-2019 y 2020-2021 con apoyo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Recabar y limpiar la base de datos generada por la RAMA-ZMVT de los Contaminantes Criterio y variables meteorológicas para los periodos 2018-2021.
- Seleccionar las variables meteorológicas que influyen en el comportamiento y medición de los contaminantes criterio en la ZMVT.
- Analizar y comparar las concentraciones de Contaminantes Criterio en la ZMVT por estación, con la base de datos de la RAMA durante los periodos 2018-2019 y 2020-2021.
- Generar un análisis sobre las variaciones en las concentraciones de Contaminantes Criterio y para elaborar las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

• Hipótesis

La hipótesis de la presente investigación es la siguiente:

El incremento de dos estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2020 - 2021 provoca que haya variaciones en las concentraciones de los Contaminantes Criterio con respecto al periodo 2018 – 2019.

• Planteamiento del problema

La RAMA es la institución encargada de la medición y registro de los Contaminantes Criterio por medio de las estaciones de monitoreo atmosférico en la ZMVT, dichas estaciones contienen equipos especializados que registran los niveles de los Contaminantes Criterio. A lo largo de los años se han agregado nuevas estaciones en municipios donde antes no se contaba con monitoreo atmosférico tal es el caso del 2020 que fue cuando se añadieron dos estaciones nuevas al norte de la ZMVT, por lo que puede haber un registro de datos mayor, además que se expanden el radio de influencia de la detección de los contaminantes que mide la RAMA-ZMVT. ¿El aumento de dos estaciones de monitoreo atmosférico ocasiona que existan variaciones en las concentraciones de Contaminantes Criterio en los periodos 2018-2019 y 2020 – 2021?

Metodología

El análisis de las concentraciones de los Contaminantes Criterio involucra la obtención de los datos que son generados por la RAMA que han registrado en los periodos 2018-2019 y 2020-2021, su posterior limpiado descartando los datos nulos, a partir de ello, para cada una de las estaciones de monitoreo atmosférico observar el comportamiento de los contaminantes criterio así y sus variaciones dentro de la ZMVT, por ello la presente investigación tiene un alcance exploratorio de tipo descriptivo un diseño no experimental, longitudinal comparativa y cuantitativa, estos aspectos que se desglosan a continuación:

Proceso de la investigación

Desglose de actividades

La investigación se llevará a cabo con la revisión de literatura que incluirá libros, artículos, tesis, páginas web, etc. Los antecedentes, están conformados a nivel internacional, nacional y local y tiene como fin recopilar la información de los Contaminantes Criterio y contaminación atmosférica, tales como eventos que hayan influido en la salud de la población, al igual que estudios previos sobre la problemática que fundamentan la presente investigación.

En el marco teórico conceptual, se establecen los conceptos y términos referentes a la investigación, acerca de la contaminación atmosférica, Contaminantes Criterio y las posibles repercusiones de estos a la salud humana.

El marco contextual, busca caracterizar la ZMVT y el funcionamiento de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). En el marco jurídico se presentan la normatividad a nivel internacional, nacional y estatal acerca de los límites máximos permisibles de los contaminantes criterio y otros aspectos de la contaminación atmosférica.

Alcance de la investigación

La presente investigación tiene dos tipos de alcance, el primero **es exploratorio** ya que de acuerdo con Hernández-Sampieri & Mendoza (2018) este tipo de investigaciones tiene como propósito analizar un tema poco estudiado para anteceder futuras investigaciones., en este caso analizarán las concentraciones de Contaminantes Criterio en la ZMVT con base en los datos generados en la RAMA. La investigación **es descriptiva** debido a que tiene la finalidad de especificar propiedades y características de variables en un contexto determinado, en este trabajo se basa en la importancia que tienen algunos parámetros meteorológicos en la dispersión de los contaminantes y las mediciones de los contaminantes que realizan las estaciones de la RAMA, además de cuantificar el alcance de medición que tienen las estaciones, de acuerdo con Domínguez (2015), es de 5 km.

Diseño de la investigación

Esta es una investigación **no experimental**, ya que no hay manipulación de datos deliberada (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018), en el trabajo se analizarán las concentraciones de

contaminantes criterio en la ZMVT con los datos ya generados de la RAMA, después de limpiar la base de datos, esta investigación no experimental también **tiene un carácter longitudinal comparativo** el cual se refiere a la recopilación de datos en diferentes momentos del tiempo de una población en específico para realizar inferencias de la evolución de una problemática (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018); así en esta investigación se compararán la variabilidad de los seis contaminantes criterio del 2018-2019 y 2020-2021, y contrastar la diferencia que hubo en el alcance de medición en los periodos mencionados.

Población de estudio

El lugar de estudio es la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), la cual se encuentra conformada por 22 municipios, Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Oztolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Xalatlaco, Xonacatlán, Zinacantepec (Martínez & Lara, 2015).

Instrumento de medición

Por medio de la base de datos de las estaciones de monitoreo que conforman la RAMA, en dos periodos de tiempo, el primero durante el 2018-2019, cuando solo se encontraban en funcionamiento seis estaciones Oxtotitlán (OX), Toluca Centro (CE), Metepec (MT), Ceboruco (CB), San Mateo Atenco (SM y San Cristóbal Huichochitlán (SC) y, el segundo 2020-2021 con un total de ocho estaciones ya que se añadieron la estación de Almoloya de y Xonacatlán (XO), de estas estaciones se realizará un **análisis cuantitativo** de los seis Contaminantes Criterio que miden y algunas variables meteorológicas.

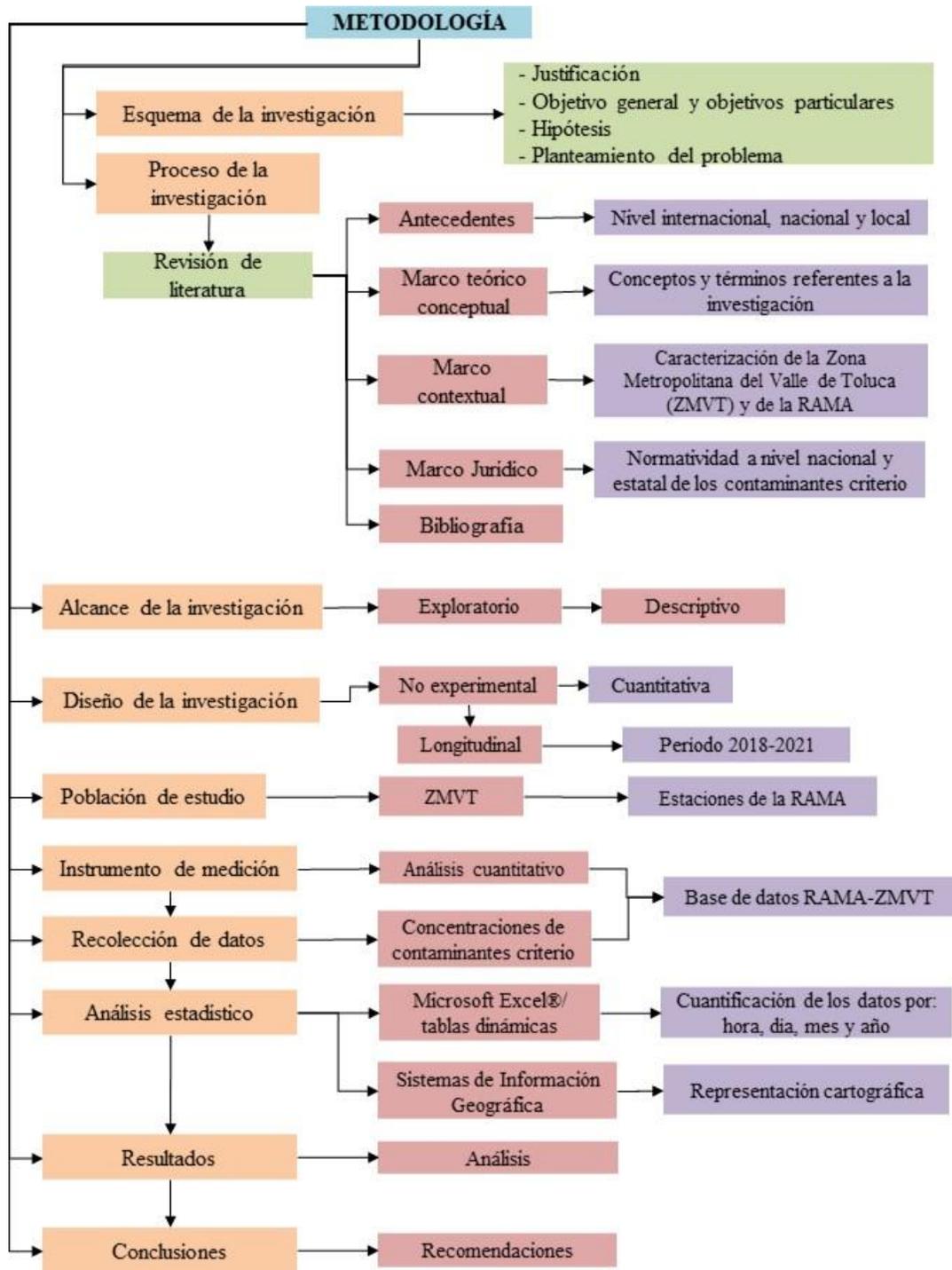
Recolección de datos

Las bases de datos se depuran para obtener las concentraciones de Contaminantes Criterio y validar los datos que reportan las estaciones de monitoreo: bióxido de nitrógeno (NO₂), bióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), material particulado menor o igual a 10 micras (PM₁₀) y material particulado de 2.5 micras (PM_{2.5}) y las variables meteorológicas, la velocidad y dirección del viento.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de la investigación se lleva a cabo por medio de tablas dinámicas de Excel®, para cuantificar las concentraciones de contaminantes criterio por estación y por día, así mismo el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la representación cartográfica y espacial de las estaciones de Contaminantes Criterio y su alcance de medición en los dos periodos de interés 2018-2019 y 2020-2021.

Figura 1 Metodología de la investigación



Fuente: Elaboración propia.

A stylized landscape illustration at the bottom of the page. On the left, there are industrial elements: three grey smokestacks emitting white smoke, and a white factory building with three chimneys. In the center, three cars are shown: a red one, a black one, and a yellow one. On the right, there are three green trees with brown trunks and three brown logs. The background features several grey, fluffy clouds of various sizes scattered across the sky. The entire scene is set against a light grey ground line.

Capítulo 1. Antecedentes

Este capítulo tiene como objeto presentar los antecedentes de la contaminación atmosférica y de los contaminantes criterio utilizados como parámetro para medir la calidad del aire; dentro del ámbito internacional se enlistan acontecimientos históricos que han afectado a la población; en el ámbito nacional se exponen investigaciones relacionadas con la contaminación atmosférica en la República Mexicana y finalmente el ámbito local se hace mención de los trabajos relacionados con los contaminantes criterio en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

1.1 Ámbito Internacional

La contaminación atmosférica es una problemática de carácter mundial que no solo afecta a la salud humana (Yassi et al., 2002), sino también a los ecosistemas y aquello que los compone; existe evidencia de que la salud de 1,000 millones de personas se encuentra comprometida por este tipo de contaminación, las afectaciones son más evidentes cuando las concentraciones de los contaminantes son elevadas y capaces de producir efectos negativos en la población de manera significativa.

1.1.1 Valle del Meuse, Bélgica 1930

Etze & French (2000), establecen que el valle del río Meuse en Bélgica en 1911 ya se encontraba industrializado, lo que causó una inversión térmica que atrapó a los contaminantes a lo largo de 24 km y en el 1930 a causa de la combinación de SO₂ (dióxido de azufre), H₂SO₄ (ácido sulfúrico), y NO_x (óxidos de nitrógeno), provenientes de los procesos de combustión industrial provocaron la muerte de 63 personas de la tercera edad, además de enfermedades cardíacas y pulmonares en jóvenes y adultos.

1.1.2 Donora Pensilvania, Estados Unidos 1948

Gilbert (2018), mencionó que una niebla tóxica en Donora Pensilvania Estados Unidos, en el año de 1948, tuvo una duración de alrededor de 4 días, desde el 27 de octubre hasta que llovió el día 31, causando la muerte de alrededor de 20 personas y enfermedades respiratorias en 7,000 más, lo que en ese entonces era cerca de la mitad de la población del lugar. Esta ciudad industrial fue construida para aprovechar el carbón barato de Pensilvania, las empresas encargadas Donora Zinc Works y la planta American Steel and Wire Plant gestionadas por U.S Steel, liberaron fluoruro de hidrógeno (HF), dióxido de azufre (SO₂) y otros gases que generalmente se dispersaban. Sin embargo, debido a que una masa de aire cálido atrapó una capa de aire frío debajo, las concentraciones de estos contaminantes formaron una niebla ácida amarillenta; los altos niveles de contaminación dificultaban la movilidad de las personas enfermas por falta de visibilidad en los caminos, además el smog y otras emisiones causaron la degradación de la vegetación en un radio de una milla del lugar de la emisión.

1.1.3 Londres, Inglaterra 1952

Gilbert (2018), indica que la gran niebla en Londres de 1952 fue a causa del aumento de la quema de carbón derivada de una ola de frío para mantener los hogares cálidos, el carbón utilizado tenía altas cantidades de sulfuro provocando el aumento de las emisiones de SO₂ (dióxido de azufre) lo que contribuyó a la severidad de la niebla. Se registraron concentraciones de humo (esmog) 5 veces mayores a lo normal y en algunas zonas esta cifra se duplicó. De acuerdo con los informes más de 4,000 personas murieron y 100,000 sufrieron enfermedades por las infecciones respiratorias, siendo los jóvenes y adultos los principales afectados. Este evento fue de gran importancia principalmente por la cantidad de enfermos y muertos, por lo que se aprobó la Ley de Aire Limpio de 1956, a través de la Ley del Parlamento del Reino Unido, un gran paso para la salud ambiental y humana.

1.1.4 Región Metropolitana de Sao Paulo (RMSP), Brasil 2003

Simioni (2003), mencionó que desde 1994 el gobierno de Sao Paulo, Brasil a través de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado y la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental, desarrollaron acciones preventivas y correctivas para 22 estaciones de vigilancia de la calidad del aire, en 1999 se implementó el programa de la Prefectura de Sao Paulo que consiste en la restricción de los vehículos en zonas críticas de contaminación con el objetivo de solucionar los congestionamientos en las horas pico principalmente, sin embargo, en 2001 la flota automotriz superó los 5 millones de vehículos en Sao Paulo, exponiendo a la población a altos índices de contaminación del aire, por otro lado el desinterés de los habitantes y la escasa información que se les brindada no permitieron que estos de programas tuvieran resultados satisfactorios.

1.1.5 Región Metropolitana de Santiago, Chile 2003

Simioni (2003), enuncia que, en la Región Metropolitana de Santiago en 1996, fue declarada zona saturada de CO (monóxido de carbono), material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) y O₃ (ozono). Debido a que la presencia de un conjunto de montañas alrededor de esta zona limita la ventilación de la ciudad y la evacuación de los contaminantes, por ello desde el 2001 se implementó el Plan de Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago y el programa “Santiago Limpio”. En donde se observó que uno de los principales desafíos fue la aplicación de la política adecuada de comunicación para la sensibilización de la población, la cual buscaba tecnologías más limpias, limitación de la contaminación industrial, reducción de las partículas en suspensión en la vía pública y control de la contaminación vehicular.

1.1.6 Dock Sud, Argentina 2017

Represa et al. (2017), elaboraron un análisis del comportamiento de la contaminación atmosférica en el periodo 2011-2017 en la localidad de Dock Sud, que se encuentra a 4 Km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, caracterizada por poseer el puerto y la zona

industrial conocida como “El Polo Petroquímico”, en donde se opera toda la logística petrolera y química del área. Se midieron las concentraciones de los contaminantes criterio en relación con los límites establecidos por la OMS y se encontró que las concentraciones de NO₂ (dióxido de nitrógeno) y CO (monóxido de carbono), se mantuvieron bajas y no superaban los valores recomendados de 40 µg/m³ para NO₂ y 0.01 µg/m³ para el CO en un rango de 8 horas. En cuanto al SO₂ (dióxido de azufre), los límites se superaron 2,521 veces en el periodo cálido en relación con su valor recomendado de 20 µg/m³; el O₃ (ozono), se excedió 24 veces dentro del horario de 10 a 15 horas, en su valor de 100 µg/m³. El material particulado PM_{2.5} superó 44 veces lo establecido 25 µg/m³ en 24 horas y el PM₁₀ excedió su límite 50 µg/m³ por 24 horas un total de 12 veces.

1.1.7 Erupción del volcán Cumbre Vieja, España 2021

La erupción del volcán Cumbre Vieja en la isla La Palma en 2021, causó importantes afectaciones en cientos de hogares, forzando la evacuación de los habitantes, las autoridades extremaron precauciones por las explosiones y emisiones de gases nocivos para la salud de los pobladores que viven cerca de la isla (BBC News, 2021).

El Gobierno de Canarias (2021), reportó que en octubre de 2021 la altura media de las cenizas superó los 3,000 metros y las emisiones de SO₂ dióxido de azufre fueron de más de 5,849 toneladas diarias, el gobierno ha reforzado la red de calidad del aire incorporando dos estaciones de monitoreo, las cuales han reportado niveles elevados de SO₂ y material particulado PM₁₀ emitidos por el volcán, aunque no han supuesto un riesgo inmediato para la población se elaboró un plan de emergencia de protección civil y atención de emergencias por riesgo volcánico en las isla.

1.2 Ámbito nacional

En México desde los años 80's se han implementado acciones encaminadas al monitoreo atmosférico, así como planes y programas que buscan regular las emisiones de contaminantes criterio. Algunos ejemplos son el programa “Hoy no Circula” en 1989, “Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica” 1990, el “Programa Coordinado para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de México” 1995-200, entre otros (Simioni, 2003).

1.2.1 Zona Metropolitana del Valle de México

Arredondo (2019), analizó el manejo y control de la contaminación en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y, determinó que desde que se inició con el monitoreo atmosférico uno de los contaminantes que la mayoría de los años ha rebasado los límites establecidos por las normas oficiales mexicanas (NOM) ha sido el O₃ (ozono). En 2016 se implementó la Fase 1 del plan de contingencia ambiental al registrarse una concentración de 203 puntos de este contaminante en el IMECA (Índice Metropolitana de la Calidad del Aire), siendo el límite máximo permisible (LMP), para este contaminante 0.095 ppm por día;

limitando la circulación de casi el 40% del parque vehicular de la ZMVM. El autor demuestra con base en este análisis que las acciones tomadas por las dependencias no han sido eficaces para disminuir la problemática.

1.2.2 Zona Centro de Guadalajara

Hernández et al. (2018), estudiaron la calidad del aire en relación a las concentraciones del material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ medidos por un video contador de partículas de una sonda isocinética, en la zona centro de la ciudad de Guadalajara; encontrando que en 11 puntos de medición el promedio de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ presentaban una buena calidad del aire, en 15 presentaban rango de precaución y en 3 la calidad del aire era mala, atribuyeron estos resultados a la actividad vehicular y a los congestionamientos viales de la ciudad. Otro factor que influye en estos resultados es la baja velocidad de los vientos lo que no permite la dispersión de las partículas y favorece la combinación con emisiones de compuestos volátiles de las diferentes fuentes de emisión.

1.2.3 Zona Metropolitana de Monterrey

Vásquez (2017), realizó un estudio de las tendencias de la calidad del aire en Monterrey y su Zona Metropolitana en el periodo 1993 a 2016, con el objetivo de brindar un panorama general del comportamiento de los diferentes contaminantes criterio emitidos en el área de estudio. Obtuvo que en ese lapso de 24 años en la zona metropolitana de Monterrey la calidad del aire ha sido mala principalmente por el material particulado PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3 (ozono), cada año estos exceden los valores permisibles dentro de la normativa mexicana y de la OMS, al igual que el resto de contaminantes como el SO_2 (bióxido de azufre), NO_2 (bióxido de nitrógeno) y CO (monóxido de carbono), concluyó que en la época invernal el O_3 disminuye sus concentraciones mientras que las de NO_2 aumentan y es el caso contrario durante el verano.

1.2.4 Municipio de Puebla, Puebla

Cercas (2020), analizó el comportamiento de los contaminantes criterio en relación con la meteorología durante 2012 al 2017 a través de las estaciones de monitoreo con las que cuenta el municipio de Puebla, encontrando que las concentraciones de O_3 (ozono) eran elevadas, en los años 2012, 2013 y 2017 observó que a mayor temperatura será mayor las concentraciones de este contaminante, sin embargo, en los años 2014, 2015 y 2016 no se presentó este comportamiento. En relación con el material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} se observó que ambos contaminantes aumentaban sus concentraciones con el aumento de temperatura principalmente en los años 2012, 2014, 2016 y 2017. Se registró que las concentraciones de monóxido de carbono (CO) disminuían con la temperatura, aunque en algunas temporadas del año cuando la temperatura disminuía las concentraciones de los contaminantes aumentaban, la autora lo atribuye este suceso principalmente a que una de las estaciones del municipio es cercana a un boulevard en donde las emisiones de los automóviles incrementan las concentraciones de CO

Cercas (2020), menciona que las concentraciones de NO₂ (bióxido de nitrógeno) disminuyeron ante una baja temperatura, lo atribuye a las reacciones químicas que sufre el contaminante en la atmósfera, lo que ocasiona que este desaparezca y no sea detectado por las estaciones de monitoreo atmosférico. En cuanto al SO₂ (bióxido de azufre), observo que en algunos años (2012, 2014 y 2016) al aumentar la temperatura, las concentraciones de este contaminante disminuyeron.

1.2.5 Zona urbana y rural de Mexicali, Baja California

Canales et al. (2014), realizaron un análisis de las partículas respirables PM₁₀ en la zona urbana y rural de Mexicali llevando a cabo un muestreo dividido en dos temporadas: invierno de 2011 y verano del mismo año. Se recolectaron 32 muestras de las concentraciones de PM₁₀ en la zona rural y urbana durante el invierno y 34 muestras para el verano; encontrando que las concentraciones de la temporada invernal en la zona urbana superaba 12 veces los límites establecidos por la NOM-025-SSA1-2014, (120 µg/m³), ya que en promedio de presentaron concentraciones de 149.25 µg/m³, por otro lado en la zona rural se rebasaron 15 veces este límite con un promedio de concentraciones de 152.93 µg/m³. En verano las violaciones a la norma disminuyeron, en la zona urbana se excedió 8 veces el límite con concentraciones de 141.44 µg/m³ y en la zona rural un total de 7 veces con un promedio 136.28 µg/m³. Estos niveles de concentraciones en la zona urbana se atribuyen principalmente a los asaderos de carbón, actividades de construcción, quema de madera y residuos de la época invernal, en verano la principal causa es el material geológico producto del polvo del desierto y en la zona rural los principales factores que causan estas concentraciones son los terrenos usados para la cría de ganado, así como la quema de materia orgánica del campo, madera y los residuos de los hogares.

1.3 Ámbito Local

La República Mexicana cuenta con 59 Zonas Metropolitanas de las cuales hasta el 2016 y 42 de ellas realizan el monitoreo de la calidad del aire, dentro de estas se encuentra la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), (INECC, 2017), en donde se han realizado las siguientes investigaciones en relación a los contaminantes criterio.

1.3.1 Contaminantes Criterio

Domínguez (2015), realizó una representación espacial con interpolación Kriging de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) en el 2011, en donde por medio de dicha representación se destacó que los niveles de PM₁₀ y PM_{2.5}, y el O₃ aumentaron en la temporada cálida. Por otro lado, las concentraciones de CO se registraron elevadas en la temporada invernal y las concentraciones más bajas durante el verano, además en los horarios pico (6:00-11:00 horas y 18:00-23:00) también se presentaron niveles alto de CO, aunque no rebasaron la norma. Las concentraciones más altas del NO₂ se registraron por la mañana y noche durante el tráfico, así como en los meses fríos principalmente por las actividades

antrópicas de fin de año. Por su parte el O_3 presenta concentraciones elevadas casi todas las semanas durante el periodo de tiempo estudiado principalmente entre las 12:00 y 19:00 horas, en la mayoría de las estaciones de monitoreo. Finalmente, el SO_2 obtuvo niveles más altos se encuentran en los alrededores de la estación Aeropuerto principalmente por la actividad industrial y vehicular, durante las 8:00 y 11:00 horas, así como en los meses de noviembre a marzo.

Mogrovejo (2015) elaboró un análisis del comportamiento de los contaminantes criterio en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) del 2000 al 2013, se observó que entre el 2005 y 2007 la contaminación atmosférica aumentó, las concentraciones de los contaminantes criterio fueron más elevadas con respecto al resto de años estudiado, así dedujo que durante el periodo estudiado estos fueron los años críticos en los niveles de contaminación en la ZMVT, así mismo se aplicó un modelo de regresión lineal para predecir el promedio diario de las concentraciones del Material Particulado (PM_{10}) con un 90% de veracidad de los datos, esto con el fin de informar la concentración de este contaminante que se tendría al día siguiente.

1.3.1.1 Monóxido de carbono CO

Luna (2018), analizó las concentraciones de CO (monóxido de carbono) del 2011 al 2017 en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) por medio de un análisis estadístico determinó que a partir de las 7 horas del día las concentraciones de este contaminante aumenta hasta las 9 horas, por otro lado, existe una disminución entre las 14 y 16 horas. Con respecto a las estaciones de monitoreo atmosférico la del Aeropuerto (fuera de servicio actualmente), presentó las concentraciones más altas con 6.87 ppm de CO.

1.3.1.2 Ozono O_3

Milpa (2018), elaboró un análisis de O_3 (ozono) y su relación con la temperatura en Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) del 2011 al 2016, en donde encontró que en los meses de abril y junio (altas temperaturas), registró una alta concentración de O_3 y en la época de invierno tanto la temperatura como la emisión de O_3 disminuyó. Llegó a la conclusión que si al O_3 aumenta influye en el incremento de la temperatura y viceversa. Se recomienda expandir el número de estaciones de monitoreo en la ZMVT, por ejemplo, en el municipio de Xonacatlán (en donde actualmente ya se encuentra una estación), con el objetivo de contar con más sitios de monitoreo y conocer el comportamiento de O_3 .

1.3.1.3 Bióxido de nitrógeno NO_2

Sura (2018), analizó las concentraciones de NO_2 (bióxido de nitrógeno) de 2011 a 2016, en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), las concentraciones de NO_2 se redujeron en 2014 con respecto a otros años, cabe destacar que en la temporada de lluvias los niveles de NO_2 disminuyeron ya que se formó ácido nítrico y se precipitó como lluvia ácida. Una de las estaciones con mayor problemática fue la que se encontraba en el Aeropuerto, ya que en el 2015 está fue deshabilitada, sin embargo, en los años anteriores se registraron las mayores concentraciones de NO_2 debido a la actividad industrial, automovilística y aeronáutica, señalan que en la ZMVT no se superaron los límites establecidos por la NOM-023-SSA1-1993 que es de $395 \mu g/m^3$ por hora al año.

1.3.1.4 Material particulado PM₁₀

Flores et al. (2010), realizaron una estimación de riesgo a la exposición de Material Particulado (PM₁₀) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), en un periodo de 8 años (1998-2005), a partir del 2003 se observó un incremento de las concentraciones de este contaminante por encima de 140 µg/m³. Así mismo se estimó la probabilidad de ocurrencia de las altas concentraciones en intervalos de 1, 5, 10, 14 y 20 años, los datos obtenidos indicaron que la contaminación por PM₁₀ seguirá ocurriendo a no ser que exista un cambio en el control de la política ambiental en fuentes fijas y móviles.

Anguiano (2018), analizó las concentraciones de PM₁₀ (material particulado) durante 2011-2017 en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), acorde con los datos obtenidos, las estaciones que presentaron una mayor dispersión de este contaminantes fueron las que se encuentran en San Cristóbal Huichochitlán, Ceboruco, San Mateo Atenco y Aeropuerto, la variabilidad observada en las estaciones lo atribuye principalmente a los aspectos meteorológicos que contribuyen a la dispersión de PM₁₀ al igual que el entorno de cada estación; la estación San Cristóbal Huichochitlán recibe las concentraciones de PM₁₀ principalmente de las vialidades no pavimentadas y de la zona industria, por otro lado la estación del Aeropuerto y San Mateo Atenco al ubicarse en zonas industriales y en donde hay grandes congestiones de automóviles y transporte, dan origen a concentraciones de las PM₁₀ que en todas las estaciones superaron los límites permisibles por la NOM-025-SSA1-2014.

1.3.1.5 Material particulado PM_{2.5}

Mares (2019), estudió las concentraciones del material particulado PM_{2.5} (material particulado) en un periodo 2012-2018 en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), de acuerdo con los datos obtenidos este contaminante supero el límite de acuerdo con la NOM-025-SSA1-2014, principalmente en la estaciones ubicadas en San Mateo Atenco y San Cristóbal Huichochitlán, además de que los años 2012, 2013 y 2016 mostraron un alto nivel de concentraciones, a causa del parque vehicular, incrementó de las industrias y la combustión de biomasa, como la leña que es de uso doméstico. A pesar de que la Zona Metropolitana del Valle de Toluca cuente con los instrumentos para la gestión de calidad del aire, existe una deficiencia en su funcionamiento debido a la ausencia de datos principalmente por lo que no se ha logrado aminorar las concentraciones de PM_{2.5}.

1.3.1.6 Bióxido de azufre SO₂

Salazar (2018), llevó a cabo un análisis de las concentraciones de SO₂ (bióxido de azufre), con relación a la temperatura en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) durante el 2011-2016, en la que por los datos obtenidos en la estación Aeropuerto determinó que las concentraciones de SO₂ aumentan sin que la temperatura se vea afectada, sin embargo, considerando que el SO₂ al ser un gas de vida corta no es capaz de reaccionar con la temperatura ni de hacerla reaccionar, señalando una causalidad entre las emisiones de SO₂ y las temperaturas bajas en la zona.

Epílogo

En este apartado se mostró que la contaminación atmosférica sin duda es uno de los problemas ambientales a los que el ser humano a estado expuesto desde hace décadas y que con el incremento de la población cada vez más personas se pueden ver afectadas por esta problemática desde sucesos que han cobrado la vida de cientos de personas.

Derivado de ello se han generado diversos estudios a nivel internacional, nacional y local, que permiten tener un mejor panorama sobre la implicación de la contaminación atmosférica en la vida cotidiana de las personas, y es tal las afectaciones que se han tomado medidas y establecido leyes y programas al respecto de esta problemática que buscan reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera para beneficio de la población.

Los estudios que realizados en República Mexicana muestran que son pocos los días en los que se goza con un estado de la calidad del aire bueno, son más los días en los que las altas concentraciones de los Contaminantes Criterio superan los límites permisibles.

A nivel local sucede algo similar, de acuerdo con los trabajos previos que se realizaron en la ZMVT, la tendencia indica que la contaminación atmosférica ha ido en aumento a través de los años y en la actualidad.

De acuerdo con estos antecedentes se puede decir que las emisiones Contaminantes Criterio provenientes principalmente de las actividades industriales y de la movilidad urbana (sin olvidar que también provienen de fuentes naturales) en diferentes regiones son de los principales contaminantes que contribuyen a la degradación de la calidad del aire y como consecuencia afectan al medio natural y la salud de los habitantes.

The background of the page features a stylized landscape illustration. The sky is filled with several grey, fluffy clouds of varying sizes. The ground is a dark grey horizontal line. On the left side, there are industrial elements: three grey smokestacks emitting white smoke, and a white factory building with several windows and chimneys. In the center, there are three small cars: a red one, a black one, and a yellow one. On the right side, there are three green bushes with brown trunks, and three brown cylindrical objects, possibly barrels or drums. The overall style is simple and graphic.

Capítulo 2. Marco teórico-conceptual

En el presente capítulo por a través de una revisión de literatura en libros, artículos y páginas web, presenta los diversos términos y conceptos relacionados con la contaminación atmosférica, sus tipos y los diversos contaminantes que son emitidos a la atmósfera con sus características y las diferentes repercusiones que estos pueden tener tanto en la salud de la población como en el medio ambiente.

2.1 Contaminación ambiental

La contaminación ambiental es definida por Juliño et al. (2021), como la introducción de agentes biológicos, químicos y físicos a un medio natural, pueden producir daños a los ecosistemas y recursos como el agua, aire y suelo, afectando su estado natural. Villasante (2000), define a la contaminación como la disminución o aumento de una sustancia en la naturaleza que tiene impactos negativos en el medio ambiente.

Por otro lado, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (1988), define a la contaminación como la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o la combinación de ellos que provoque un desequilibrio ecológico, es decir, que altere las relaciones que conforman el ambiente y que amenaza la existencia, transformación y desarrollo del hombre, así como de otros seres vivos.

2.2 La atmósfera

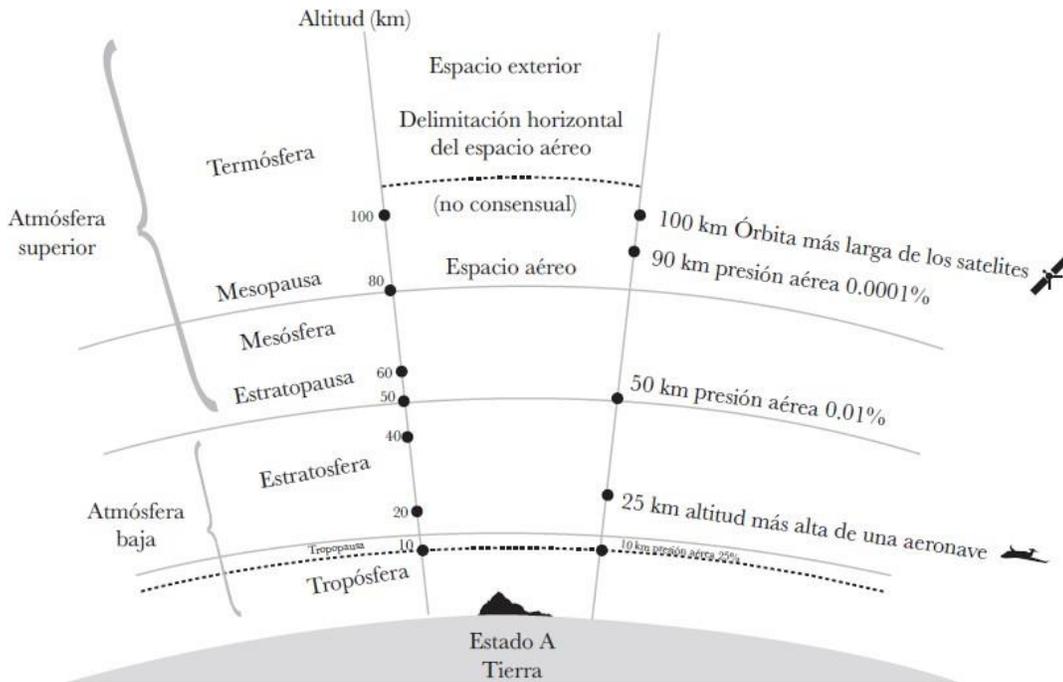
La atmósfera es la capa gaseosa que rodea a la Tierra y cualquier alteración sobre ella tiene repercusiones en los seres vivos, contiene una mezcla de gases transparentes de 640 kilómetros de espesor, he evolucionado durante millones de años permitiendo la vida en la tierra (SEMARNAT, 2013).

La composición química de la atmósfera varía según su altura, la cual comienza en la superficie terrestre (Figura 2.1), Anglés et al. (2021) mencionan que gracias a la atmósfera es posible la vida en el planeta, ya que permite la existencia de la diversidad de organismos vivos.

La atmósfera se encuentra formada por 78% de nitrógeno (N_2), 21% de oxígeno (O_2), un total de 0.93% de argón (Ar), de bióxido de carbono (CO_2) un 0.39%, 0.0008 de neón (Ne), 0.0005% de helio (He), 0.0017% de metano (CH_4), de kriptón (Kr) un 0.0001%, un 0.00003% de óxido nitroso (N_2O) y vapor de agua, el cual es variable (SEMARNAT, 2013).

La atmósfera protege a todos los seres vivos de la radiación ultravioleta procedente del sol, las corrientes de aire, las cuales redistribuyen la temperatura en la Tierra permitiendo la diferencia de la temperatura entre el día y la noche no sea extrema (Orizaola, 2017).

Figura 2. 1 Capas de la atmósfera



Fuente: (Anglés et al., 2021)

2.2.1 Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica ocurre cuando la presencia de sustancias y formas de energía alteran la calidad del aire e implica riesgo o daño para las personas, los bienes materiales y a la naturaleza (Carnicer, 2008).

Por otro lado Yassi et al., (2002), definen a la contaminación atmosférica como la emisión de sustancias peligrosas en una cantidad que supera la capacidad de los procesos naturales de la atmósfera, para transformarlos, precipitarlos, y depositarlos o diluirlos por medio del aire.

Choudhary & Garg (2015), mencionan que la contaminación atmosférica es la introducción de químicos partículas o material biológico en forma de gases, polvo o humo y que causa daños en el medio natural, organismos vivos además de enfermedades e incluso la muerte en los seres humanos.

2.2.2 Clasificación de la contaminación

La contaminación ambiental puede clasificarse por su origen, clases, fuentes y efectos (Tabla 2.1).

Tabla 2. 1 Matriz de clasificación de la contaminación

| <i>Causa</i> | <i>Tipo</i> | <i>Descripción</i> |
|---------------------------------------|----------------------|--|
| Por el origen del contaminante | Origen natural | Es el resultado de un proceso que el hombre no puede controlar, como las erupciones volcánicas o transporte de materiales por las corrientes de un río. |
| | Origen antropogénico | Causado por las actividades humanas, los contaminantes se encuentran en un medio al que no corresponde o sus concentraciones están por arriba de las naturales. |
| | Xenobiótico | Son nuevos en el mundo, es decir, ajenos a los componentes naturales de un ser vivo, son tóxicos para la salud, como clorofluorocarbonos, DDT y detergentes. |
| Por el tipo de contaminante | Biológicos | Virus y bacterias que se alojan en personas, animales y en ecosistemas |
| | Físicos | Diferentes tipos de energía generadas por fuentes concretas |
| | Químicos | Sustancias orgánicas o inorgánicas, naturales o sintéticas, dependerá de su naturaleza, cantidad y frecuencia de emisiones. |
| Por sus efectos | Toxinas | Precedentes de organismos vivos y que causan efectos adversos de cualquier tipo |
| Por el sustrato afectado | Tóxicos | Causa un efecto indeseable en los seres vivos como el daño funcional en el organismo expuesto o cambios irreversibles. |
| | Aire | En un medio en particular se pueden encontrar de manera simultánea diversos contaminantes que pasan de uno a otros, del aire al agua o del agua a los alimentos y del suelo a los organismos |
| | Agua | |
| | Suelo | |

Fuente: Elaboración propia con base en Albert, (1995).

2.2.3 Contaminantes que dañan la atmósfera

En el aire se encuentran disueltos o en suspensión contaminantes que por su composición física o química pueden ocasionar diferentes efectos dependiendo la estación del año, la actividad industrial, cambios en la dirección y velocidad del viento, adicionalmente los niveles promedio de contaminantes aumentan o disminuyen con respecto a la época del año Yassi et al. (2002).

De forma general se pueden clasificar en:

- Contaminantes primarios: se emiten directamente de la fuente de emisión y mantienen su forma química (SEMARNAT, 2018).
- Contaminantes secundarios: se originan en el aire debido a la interacción de dos o más contaminantes primarios o por sus reacciones con otros componentes de la atmósfera (SEMARNAT, 2018).
- Contaminantes peligrosos del aire (CPA) o tóxicos: conforme a COFEPRIS (2017a), son compuestos en forma de gases o partículas que a pesar de que se encuentren en concentraciones bajas en la atmósfera sus toxicidad y persistencia representa un peligro para la salud humana, animal o vegetal, ya que en el ser humano presenta efectos a corto y largo plazo. Los efectos son diversos dependerán del tiempo y la dosis a la que se exponga una persona, entre estos contaminantes se encuentra el amoníaco, cloro, benceno, tolueno y xileno.
- Contaminantes criterio: son contaminantes a los cuales se les ha establecido un límite máximo permisible por medio de normas, con la finalidad de proteger la salud humana y garantizar el bienestar de la población (COFEPRIS, 2017a).

2.2.4 Fuentes de contaminación atmosférica

Los contaminantes atmosféricos provienen de actividades o procesos u operaciones (SEMARNAT, 2013), se pueden clasificar dependiendo de la fuente de origen como se muestra en la Tabla 2.2:

Tabla 2. 2 Clasificación de las fuentes de contaminación

| <i>Tipo</i> | <i>Descripción</i> | | |
|-------------------------------|---|--|--|
| Fuentes Naturales | Emiten contaminantes por procesos naturales | Los volcanes que emiten partículas y gases, incendios forestales, descomposición de la materia orgánica en el suelo y océanos. | |
| Fuentes Antropogénicas | Son de las más importantes ya que generan importantes afectaciones a la salud pública, son emitidas por las principales actividades humanas | Fuentes fijas | Se encuentran en un punto fijo, como las plantas de energía, fábricas, centrales térmicas entre otros. |
| | | Fuentes móviles | Contemplan los medios de transporte y vehículos automotores |
| | | Fuentes de área | Corresponden a las zonas industriales y urbanas que en conjunto afectan la calidad del aire como el uso de madera, imprentas, actividades agrícolas etc. |

Fuente: Elaboración propia con base a (Albert, 1995; Carnicer, 2008; SEMARNAT, 2018)

2.2.5 Escalas de contaminación atmosférica

Querol (2018), enuncio que la población es la más afectada por la contaminación atmosférica, tan solo en 1950, 6% vivía ciudades, en el 2016 este porcentaje supera el 54% y la previsión para el 2050 es de más del 66%, el consumo energético y las emisiones de contaminantes a la atmósfera han causado el deterioro acelerado de la calidad del aire alrededor de las grandes ciudades del mundo.

Querol (2018), hace mención de que la contaminación atmosférica puede clasificarse por escalas:

- **Escala Global:** Son las emisiones de gases de efecto invernadero y afecta de manera indirecta a la población y naturaleza a través del cambio climático.
 - **Escala media:** Los contaminantes son emitidos por región y transportados y depositados lejos de éstas. Es decir, las zonas que reciben el impacto se encuentran a decenas o cientos de kilómetros de la fuente de emisión.
 - **Microescala:** Son zonas urbanas o industriales que reciben el impacto directo de las emisiones, se dan los efectos más importantes en lo que corresponde al deterioro de la calidad del aire.

2.3 Contaminantes Criterio

Los Contaminantes Criterio son aquellos que están normados por un límite máximo permisible de concentración en el aire (COFEPRIS, 2017a). Según Vallerio (2014), los Contaminantes Criterio sirven para determinar si una región cumple con los parámetros de la calidad del aire. Herrera (2015), menciona que este tipo de contaminantes son perjudiciales para la salud y bienestar de los seres humanos, se conocen como criterio debido a que se sometieron a diversas evaluaciones con relación con la calidad del aire en Estados Unidos, para así establecer límites máximos permisibles con el objetivo de salvaguardar la salud de la población y la calidad del aire.

Los Contaminantes Criterio incluyen al monóxido de carbono (CO), Ozono (O₃), bióxido de nitrógeno (NO₂), bióxido de azufre (SO₂), material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), estos contaminantes son generados principalmente por actividades de combustión (combustibles fósiles), actividades industriales y de construcción; las concentraciones de estos contaminantes sirven para monitorear las fuentes de emisión y la calidad del aire (Kumar & Yadav, 2021).

2.3.1 Monóxido de carbono CO

Acorde con la SEMARNAT (2013), es de los contaminantes más abundantes y se encuentra en la capa inferior de la atmósfera, es un gas inestable que se oxida generando dióxido de carbono CO₂, aproximadamente un 70% de este contaminante proviene de las emisiones vehiculares.

Se produce principalmente de la combustión incompleta de los combustibles fósiles (usados en los motores de gasolina, calentadores de carbón o petróleo), debido a su peso mayor al del aire suele, concentrarse en espacios confinados (Yassi et al., 2002).

Téllez et al. (2006), definieron al monóxido de carbono como un contaminante incoloro e inodoro que se forma por la combustión incompleta de material orgánico en presencia de un déficit de oxígeno, es considerado uno de los mayores contaminantes de la atmósfera. Además de las emisiones de vehículos, los incendios forestales y urbanos, la incineración de materia orgánica contribuye a la producción monóxido de carbono (CO). A causa del aumento del uso de electrodomésticos como chimeneas y sistemas de calefacción en los hogares se ha convertido en un agente de riesgo de intoxicación domiciliar por monóxido de carbono (CO).

2.3.1.1 Efectos del monóxido de carbono CO en la salud

En los últimos años se han estudiado las afectaciones al cuerpo humano por las altas concentraciones de monóxido de carbono, se ha encontrado evidencia de que la población que se encuentra expuesta de manera crónica a este contaminante presentan afectaciones en el organismo, principalmente en el cerebro y corazón (Téllez et al., 2006).

El monóxido de carbono se asocia con la hemoglobina, es decir cuando el contaminante entra al organismo inhibe la función de esta para transportar oxígeno a los tejidos. Se pueden presentar síntomas comunes como dolor de cabeza, náuseas, vómito y fatiga (Gilbert, 2018).

Guirola et al. (2019) mencionaron que las personas que se exponen de manera constante al monóxido de carbono presentan las siguientes afectaciones en su organismo: inhibe las proteínas en la hemoglobina, por lo que reduce la capacidad de las células para producir energía, bloquea la cadena respiratoria, por su alto nivel oxidante, daña las proteínas y lípidos y ácidos nucleicos. Otros síntomas son: arritmias cardíacas, dolor torácico, problemas respiratorios, somnolencia, y en casos más graves cuando los individuos son expuestos a concentraciones elevadas pueden transitar al coma.

2.3.1.2 Efectos del monóxido de carbono CO en el medio ambiente

El monóxido de carbono en la atmósfera puede reaccionar con otros contaminantes, cuando eso ocurre se puede formar ozono dañino a nivel del suelo (Campbell et al., 2019). El NPI, (2009) hace mención que en el momento en el que el CO reacciona con otros contaminantes o con gases de efecto invernadero provoca que la temperatura de una zona aumente, alterando a los ecosistemas, además de perturbar los patrones de lluvia, generando eventos climáticos extraordinarios. Cuando las especies se exponen a altos niveles de monóxido de carbono, por ejemplo, en los incendios forestales, puede afectar su organismo lo que les impide reproducirse.

2.3.2 Ozono O₃

Conforme a Bermejo et al. (2009), el ozono O₃ es uno de los principales protectores frente a la radiación ultravioleta en la estratosfera, ya que en ella se localiza el 90% del ozono atmosférico y forma la capa de ozono, la cual filtra la mayor parte de la radiación ultravioleta proveniente del sol, lo que hace posible la vida sobre la Tierra.

Se produce por medio de una serie de reacciones químicas entre compuestos volátiles como el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) en presencia de radiación solar. Cuando las emisiones de NO_x son elevadas este actúa como catalizador en conjunto

con los compuestos volátiles para la producción de ozono, provocando que las concentraciones altas de ozono en la troposfera superando el límite natural (Bermejo et al., 2009)

La SEMARNAT (2013), define al ozono O₃ como uno de los componentes de la atmósfera, cuando se encuentra a baja altura (ozono troposférico) resulta perjudicial debido a que es oxidante, reactivo, corrosivo y tóxico, lo que provoca que reaccione con rapidez generando compuestos secundarios.

Por su parte Mantilla et al. (2015), precisan que es una molécula formada por tres átomos de oxígeno (O₃), que a temperatura y presión ambiente se encuentra en forma de gas en la atmósfera en dos niveles: en las proximidades del suelo (troposfera) y en los niveles altos (estratosfera). Las reacciones químicas ocurren en la troposfera a partir de otros contaminantes que reaccionan con la luz solar tienen como resultado el ozono troposférico, el cual es dañino para la población.

El ozono es transportado a largas distancias causando problemas ambientales en áreas lejanas a la fuente de origen, las concentraciones pueden variar dependiendo de la hora, del día y del año, porque para su producción es necesaria la luz solar, por ello la orografía y clima son de los principales factores que influyen y en el comportamiento del este contaminante (Mantilla et al., 2015).

2.3.2.1 Efectos del ozono O₃ en la salud

Según Gilbert (2018), las principales afectaciones del ozono se presentan cuando el individuo tiene una exposición aguda a este, y presentando síntomas como dolor y dificultad al respirar y ataques de asma, sin embargo, cuando es una exposición crónica pueden agravarse, causando daño permanente en los pulmones, y empeorando enfermedades como el asma, enfisema pulmonar y bronquitis.

Por otro lado, Mantilla et al. (2015), mencionan que estudios epidemiológicos han demostrado que la principal población afectada son los niños, incide en su capacidad y desarrollo pulmonar, poniendo a este grupo de la población entre los más sensibles ante la exposición del ozono. Se ha encontrado evidencia de una posible relación entre el ozono y las placas arteriales, es decir, que tiene un alto potencial de incidencia en afecciones cardiovasculares.

2.3.2.2 Efectos del ozono O₃ en el medio ambiente

Las afectaciones que tiene el ozono en el medio ambiente pueden observarse principalmente en la vegetación, según Bermejo et al. (2009), los daños dependerán de la cantidad de ozono que consiga alcanzar el interior de las plantas e interferir en sus reacciones químicas y metabólicas encargadas del desarrollo y crecimiento vegetal, penetra en las plantas por medio los tejidos vegetales, los que permiten la fotosíntesis y respiración.

Cuando las concentraciones de ozono exceden la capacidad de absorción de las plantas y sus defensas celulares, se producen daños a nivel metabólico, observables a simple vista en las hojas, adquieren un tono rojizo, marrón o púrpura, lo cual indica que el contaminante ha causado un daño irreversible. En las coníferas las hojas presentan las puntas quemadas y defoliación (caída prematura de las hojas cuando el árbol enferma), provocando el envejecimiento de los bosques (Bermejo et al., 2009).

En los cultivos se manifiestan síntomas visibles en las hojas, así como la reducción de la producción y calidad de las cosechas (Bermejo et al., 2009). Debido a ello los cultivos pueden aumentar el nivel de sensibilidad al estrés y ser más susceptibles a sufrir plagas o carencias nutricionales. Con el deterioro de las plantas estas reducen su capacidad para la fijación de bióxido de carbono (CO₂) al mismo tiempo que afectan sus procesos productivos, como la germinación del polen (Mantilla et al., 2015).

Por otro lado, el ozono facilita la corrosión de los materiales como la pintura, textiles sintéticos, gomas, entre otros materiales que están presentes comúnmente en edificios y hogar, lo que a su vez acelera su degradación y envejecimiento (SEMARNAT, 2013).

2.3.3 Bióxido de nitrógeno NO₂

Una de las principales características que tiene el bióxido de nitrógeno NO₂ es su color café anaranjado cuando sus concentraciones son elevadas (Skiba & Parra, 2011). La SEMARNAT (2013), precisa que este contaminante se produce principalmente de la combustión de productos fósiles por medio de los motores de vehículos, quema de carbón y madera, así como la producción de fertilizantes, explosivos, tabaco y calderas; el bióxido de nitrógeno es un importante precursor en la formación de esmog fotoquímico.

El bióxido de nitrógeno se produce de dos formas, la primera, por medio de la oxidación del NO (óxido nítrico) en presencia de luz solar, considerándose un contaminante secundario, pero a su vez se puede emitir de manera directa por la combustión a altas temperaturas de las plantas generadoras de energía eléctrica o en interiores por las hornillas de gas (Yassi et al., 2002).

2.3.3.1 Efectos del bióxido de nitrógeno NO₂ en la salud

De acuerdo con la OMS (2005), la exposición prolongada del dióxido de nitrógeno, provoca bronquitis en los niños asmáticos y disminución pulmonar cuando las concentraciones del contaminante son elevadas, principalmente en localidades urbanas.

Yassi et al. (2002), establecieron que el bióxido de nitrógeno reduce la capacidad inmune del sistema respiratorio, lo que aumenta la incidencia de infecciones respiratorias después de la exposición al contaminante, así mismo, reduce la capacidad de los pulmones para eliminar las partículas y bacterias. Algunos síntomas más comunes que menciona Gilbert (2018), son: irritación de nariz y garganta, tos, ataques de asma y dificultad al respirar.

2.3.3.2 Efectos del bióxido de nitrógeno NO₂ en el medio ambiente

Según Beaudry (2021), el bióxido de nitrógeno es un importante contaminante que contribuye a la formación del esmog, este se presenta en color marrón que generalmente se observa en las grandes ciudades o aquellas localidades urbanizadas e industrializadas particularmente en verano. Cuando el NO₂ se expone a los rayos UV e interactúan con los compuestos orgánicos volátiles, tiene la capacidad de formar ozono troposférico, que es el que se encuentra a nivel del suelo y que afecta a la población y vegetación.

2.3.4 Bióxido de azufre SO₂

El bióxido de azufre SO₂, es un gas incoloro con un olor asfixiante característico, es una sustancia reductora que en contacto con el aire y la humedad puede convertirse en trióxido de azufre SO₃ el cual es liberado de diversas fuentes como lo son: la combustión de carbón, petróleo, diésel o gas natural (Imbert & Zapata, 2017).

Contribuye a la formación de lluvia ácida, transformándose en ácido sulfúrico H₂SO₄, se encuentra regulado por los Estándares Nacionales de Calidad del Aire, de la Ley de Aire Limpio de Estados Unidos, es considerado uno de los contaminantes que ponen en riesgo la seguridad laboral Gilbert (2018).

2.3.4.1 Efectos del bióxido de azufre SO₂ en la salud

La exposición a largo plazo puede ocasionar daños en el sistema respiratorio, las personas con asma, particularmente los niños son más propensos a las afectaciones de bióxido de azufre (EPA, 2021d).

Yassi et al. (2002), determinan que uno de los principales efectos del bióxido de azufre es la broncoconstricción, es decir, la reducción y estrechamiento de las vías aéreas que ocasiona la resistencia en la respiración. Las afectaciones respiratorias se presentarán dependiendo el tiempo de exposición y la concentración del contaminante, por lo que pueden variar en gravedad y ocurrencia, por ejemplo, Gilbert (2018), señala que a largo plazo los pulmones se dañan y causan enfisema, bronquitis y problemas cardiovasculares; a corto plazo, son como ya se ha mencionado anteriormente, bronquitis, asma y dificultad para respirar.

2.3.4.1 Efectos del bióxido de azufre SO₂ en el medio ambiente

En altas concentraciones el bióxido de azufre puede causar daños en las plantas y árboles, perjudicando su follaje lo que a su vez ocasiona afectaciones en el crecimiento de los mismos (EPA, 2021c). Además de depositarse en las plantas, también lo hace en el suelo, lo que conlleva a la pérdida de nutrientes en estos provocados por efectos de la lixiviación (Imbert & Zapata, 2017).

El SO₂ puede reaccionar con otros compuestos en la atmósfera para formar partículas finas que reducen la visibilidad, además estas partículas pueden depositarse en monumentos, edificios, provocando su degradación por corrosión. (EPA, 2021d).

2.3.4.1.1 Lluvia ácida

Según la EPA (2021b) la lluvia ácida, es cualquier tipo de precipitación que contenga componentes ácidos, como ácido sulfúrico o nítrico que caen desde la atmósfera en forma seca o húmeda, por ejemplo, lluvia, niebla, nieve, granizo e incluso polvo. Se genera por la reacción del bióxido de azufre SO₂ y óxidos de nitrógeno NO_x, con agua, oxígeno y otros compuestos de la atmósfera, formando ácido sulfúrico H₂SO₄ y ácido nítrico HNO₃, los cuales se mezclan con agua y otros materiales antes de precipitarse.

Uno de los principales factores meteorológicos que influyen en la formación de la lluvia ácida es la velocidad y dirección del viento, ya que estos tienen la capacidad de transportar el bióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno a grandes distancias, por lo que la lluvia ácida

es un problema a mayor escala, no solo en los lugares donde se emiten estos contaminantes (EPA, 2021b).

La lluvia ácida lixivia el aluminio del suelo, lo que ocasiona la eliminación de los minerales y nutrientes que necesitan los árboles, plantas y cultivos para crecer, por lo que cuando una zona está afectada por la lluvia ácida es común observar que la vegetación se encuentre moribundas o secas (EPA, 2021b).

2.3.5 Material particulado PM₁₀

El material particulado, según la EPA (2021a), es una mezcla de partículas sólidas en suspensión que se encuentran en el aire, por ejemplo, el hollín, el polvo y la suciedad tienen el tamaño y color para ser percibido a simple vista, existen otras que solo pueden detectarse por medio de un microscopio. Las partículas PM₁₀, son aquellas que tienen un diámetro de 10 µm (micrómetros) (Figura 2.2).

Rojas & Garibay (2003), indican que las PM₁₀ se forman por la abrasión, evaporación de aerosoles y suspensión de polvos, se componen principalmente de polvos suspendidos, cenizas generadas por la combustión de carbón, sal, polen, esporas, residuos de llantas e incluso fragmentos de plantas y animales; tienen un promedio de vida de un minuto a horas.

2.3.5.1 Efectos del material particulado PM₁₀ en la salud

Aldunate et al. (2006), refieren que en el momento que el material particulado ingresa al organismo, los pulmones generan mucosidad para expulsar las partículas al toser o estornudar, transportando estas partículas a la boca para que sean eliminadas al exterior del sistema digestivo. Las partículas entran en los pulmones alcanzando los alvéolos y pueden tardar, semanas, meses, o incluso años para que el cuerpo las elimine, por ello la respiración de este contaminante reduce la capacidad de limpieza y defensa de los pulmones, lo que a su vez genera problemas enfermedades respiratorias, que influyen en el sistema circulatorio y corazón.

En otros términos, las partículas que son retenidas tienen la capacidad de solubilizarse, pasar al torrente sanguíneo y combinarse con la sangre, lo que no solo afectaría a los pulmones, también a otros órganos, en palabras más simples, entre más profundo viajan las partículas el efecto será más grave, esto puede ocurrir mientras se realizan actividades físicas (Aldunate et al., 2006).

El material particulado a corto y largo plazo puede generar: irritación de los ojos y vías respiratorias, infecciones, congestión nasal, alergias, resfríos, faringitis, amigdalitis, neumonía y asma (Aldunate et al., 2006). Las personas que se exponen de manera crónica tienen más posibilidades de desarrollar cardiopatías y neumopatías, en casos más severos cáncer de pulmón y una muerte prematura (COFEPRIS, 2017b).

2.3.5.2 Efectos del material particulado PM₁₀ en el medio ambiente

Los daños más evidentes por este material particulado son de tipo estético, por ejemplo, afecta la calidad de los metales en edificios y monumentos desgastándolos, así como daños en la vegetación que impiden el su crecimiento y desarrollo (Aldunate et al., 2006). De

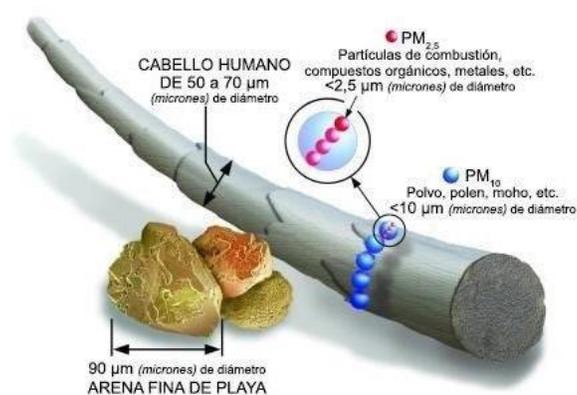
acuerdo con la EPA (2021a), contribuye a la acidificación de lagos y ríos, al igual que deteriora los nutrientes del suelo, lo que a su vez limita el desarrollo de los bosques y cultivos.

2.3.6 Material particulado $PM_{2.5}$

Son las llamadas partículas finas o de fracción respiratoria, tienen un diámetro igual o menor a $2.5 \mu m$ (Figura 2.2), son generados por la industria metalúrgica, los caminos no pavimentados y la generación de energía eléctrica (SMA, 2017).

Rojas & Garibay (2003), establecen que su mecanismo de formación también puede ser por reacciones químicas, evaporación de niebla y gotas en las que los gases se han disuelto y reaccionado, se emiten principalmente por la combustión de carbón, aceites, gasolina, madera y por compuestos orgánicos que incluyen a especies biogénicas. Pueden recorrer distancias de cientos a miles de kilómetros y su periodo de duración en el aire es de días a semanas.

Figura 2. 2 Tamaño del material particulado.



Fuente: (EPA, 2021a).

2.3.6.1 Efectos del material particulado $PM_{2.5}$ en la salud

Randolph (2021), estableció que los efectos a corto plazo del material particulado $PM_{2.5}$ con una exposición menor (24 horas), influyen en admisiones a hospitales por dificultades respiratorias o cardíacas, se presentan casos de bronquitis aguda y crónica. Así como otros síntomas más comunes como tos e irritación de las vías respiratorias (EPA, 2021a).

A largo plazo, cuando la exposición es prolongada (meses o años), se puede agravar los problemas cardíacos o pulmonares provocando una muerte prematura (Randolph, 2021), en concentraciones elevadas causa derrames cerebrales y ataques cardíacos, puesto que este contaminante entra más fácil al organismo y penetra el torrente sanguíneo, por ello se considera más peligroso que el material particulado PM_{10} (Gilbert, 2018).

2.3.6.1 Efectos del material particulado PM_{2.5} en el medio ambiente

El INECC (2012), señalo que los principales efectos que tiene este contaminante es la degradación de los bosques por deposición de las partículas en las hojas, provocando su deterioro, cuando llueve en abundancia las partículas pueden ser removidas de las hojas o de las construcciones combinándolo con el material particulado y así se transfieren al suelo, en donde las PM_{2.5} al integrarse al suelo pueden modificar los elementos que lo componen, alterando los procesos de flujos de energía y el ciclo de nutrientes, la inhibición de la toma de nutrientes, cambios en las estructuras de los ecosistemas y la reducción de microorganismos en el suelo, los cuales son vitales para la cadena alimenticia.

2.4 Monitoreo atmosférico

Salcido et al. (2019), plantearon que el monitoreo atmosférico es un conjunto de acciones que permiten medir los niveles de contaminación del aire, al igual que las condiciones meteorológicas que interfieren en el transporte y dispersión de los contaminantes y contribuye para establecer medidas de control de la contaminación, en el establecimiento de políticas para proteger la salud de la población. Con los datos que brinda el monitoreo se pueden evaluar las tendencias y patrones de contaminación. Permite establecer correlaciones entre contaminantes y los daños a la salud, identificación de las fuentes y receptores de la contaminación, al igual que genera información sobre la calidad del aire y meteorología para estudios científicos y académicos.

Según la SEMARNAT (2013), el conocer el estado de la calidad del aire en diferentes zonas en tiempo real, permite tomar decisiones de protección a la salud. Algunos de los criterios que se toman en cuenta para el monitoreo son: la densidad de la población, distribución de las fuentes de contaminación, meteorología y topografía.

2.4.1 Programa de gestión para mejorar la calidad del aire (Pro-Aire)

De acuerdo con SEMARNAT (2015), el Pro-Aire es un instrumento que busca revertir las tendencias de deterioro de la calidad del aire, al establecer, metas, estrategias, medidas y acciones, que tienen como objetivo reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera no solo para el cuidado del medio ambiente, también para la protección de la salud de la población.

SEMARNAT (2015), establece que existen tres aspectos fundamentales para este programa:

1. **Diagnóstico de la calidad del aire** basada en los sistemas de monitoreo atmosférico, al igual que de los inventarios de emisiones.
2. Una **estrategia** que tenga como objetivo mejorar la calidad del aire, controlando y/o disminuyendo los contaminantes en una zona en específico, además de que contenga medidas y acciones específicas que puedan implementarse durante la vigencia del programa.
3. Un **espacio de acuerdos**, en donde se pueda implementar la estrategia con la participación de los sectores involucrados y la sociedad.

2.4.2 Red Automática de Monitoreo Atmosférico RAMA

De acuerdo con la (Secretaría del Medio Ambiente, 2020a), la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), forma parte de las actividades del monitoreo atmosférico del Estado de México, tiene como objetivo conocer el impacto que ejercen los contaminantes en la población, para el desarrollo de estrategias de control para prevenir problemas de contaminación.

Surge como un programa de vigilancia atmosférica vinculada con la evaluación de la calidad del aire de una zona en específico, por medio de la generación de indicadores de calidad del aire creando las medidas necesarias para controlar la contaminación, observa la tendencia de los contaminantes a largo plazo, evalúa los estándares de calidad del aire y su cumplimiento para así brindar información en caso de situación de alerta; obtiene una base de datos para planear la distribución del suelo y transporte (Secretaría del Medio Ambiente, 2020a).

2.4.2.1 Factores que intervienen en el diseño de la RAMA

La (Secretaría del Medio Ambiente, 2020a), establece los siguientes factores a considerar para que la red genere datos confiables y representativos:

- Zona de estudio: lugar donde se localizará la red considerando su topografía.
- Clima: determinará la selección del área en conjunto con las variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento, precipitación pluvial, temperatura y presión atmosférica).
- Sitio de muestreo: lugar representativo, accesible, que cuente con servicios básicos y con capacidad para resistir condiciones extremas.
- Inventario de emisiones: enlistar las fuentes de emisión de la zona y los contaminantes que se emiten.
- Manejo y reporte de datos: los datos deben ser validados, se debe contar con un mínimo de ellos por periodos de tiempo específicos.
- Métodos de análisis de los contaminantes: contar con metodologías oficiales aprobadas y aplicables de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas.
- Contabilidad: considerar los costos del equipo, los de construcción del sitio, equipo de oficina, personal y transporte.
- Número mínimo de estaciones: estas se establecen de acuerdo con la población de la zona de estudio.

2.4.3 Estaciones de monitoreo atmosférico

Son recintos metálicos, climatizados, que albergan en su interior el equipo que analiza y mide los contaminantes atmosféricos de manera automática, cuenta con una torre meteorológica, en la cual se encuentran instalados los sensores, además cuenta con energía regulada (Secretaría del Medio Ambiente, 2020a).

De acuerdo con el INECC (2010), las estaciones de monitoreo se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- **Móviles:** se establece cuando la fuente de emisión predomina en vialidades, estacionamientos, talleres, o sitios de servicio vehicular.
- **Área:** se ubica cuando la fuente de emisión predomina en servicios de restaurantes, tintorerías, bodegas, centros comerciales, entre otros.
- **Biogénicas:** son calles no pavimentadas, parques o lotes baldíos.
- **Fijas:** se ubican cuando la fuente se establece en zonas industriales.

2.5 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire IMECA

La SEMARNAT (2013), señala que el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), se comenzó a implementar a principios de la década de los 80's como el valor de referencia para informar a la población de las ciudades principalmente, acerca de los niveles de contaminación del aire (Figura 2.3).

Por definición el IMECA es un valor adimensional, calculado a partir de la información obtenida por medio de la legislación vigente, relacionada con las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, tiene como objetivo facilitar a la población la información y datos correspondientes con la contaminación del aire a nivel local (SEMARNAT, 2013).

Trejo (2006), establece que el IMECA se elabora por medio de la información de la red de monitoreo atmosférico de una zona, primero calcula la concentración de un contaminante, posteriormente es promediado en un día, zona, u hora en particular. Puede medirse para cualquiera de los contaminantes criterio y por lo generar el IMECA se reporta de acuerdo con el contaminante con la mayor concentración.

Tabla 2. 3 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

| <i>Categoría</i> | <i>Intervalo</i> | <i>Significado</i> | <i>Recomendaciones</i> |
|---------------------|------------------|--|--|
| Buena | 0-50 | La calidad del aire es satisfactoria no hay ningún riesgo para la salud. | Se pueden realizar actividades al aire libre. |
| Regular | 51-100 | La calidad del aire es aceptable, sin embargo, las personas sensibles pueden presentar síntomas moderados. | Las personas de grupos sensibles deben limitar su tiempo de exposición. |
| Mala | 101-150 | Los grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud, el público en general no es afectado. | Niños, adultos mayores, y personas con enfermedades respiratorias deben limitar su tiempo al aire libre. |
| Muy mala | 151-200 | Todos experimentan efectos en la salud, en los grupos sensibles los síntomas son más graves. | La población en general y de grupos sensibles deben limitar su exposición al aire libre. |
| Extremadamente mala | >200 | Es una condición de emergencia. Toda la población es afectada. | La población en general debe suspender su tiempo al aire libre |

Fuente: Comisión Ambiental de la Megalópolis (2018).

Epílogo

El conocimiento de la contaminación atmosférica desde el tipo, escalas, fuentes de contaminación y sobre todo el tipo de contaminante que genera, permite predecir en qué medida se degrada la calidad del aire, lo que es de suma importancia para entender la problemática ambiental a la que día con día se enfrentan los seres vivos.

Si bien existen diferentes y variados tipos de contaminantes que influyen en la contaminación atmosférica, son los Contaminantes Criterio los que por sus características se encuentran normados y se busca que sus emisiones no superen lo establecido en los parámetros nacionales. Estos contaminantes además de afectar a la salud de la población generando problemas cardiovasculares y respiratorios también pueden perjudicar los inmuebles, medio natural y los seres vivos de la ZMVT.

La generación de estos contaminantes se deriva principalmente de las actividades económicas, los procesos de combustión, las actividades industriales y el continuo uso de las energías fósiles, implica el aumento en las concentraciones de los Contaminantes Criterio.

A través del monitoreo atmosférico se busca medir los niveles de contaminación para poder generar reportes sobre la calidad del aire en beneficio de la población, este tipo de actividades en conjunto con los programas como Pro-Aire contribuyen a que se conozca el nivel de contaminación en la ZMVT y que de esta manera las diversas organizaciones gubernamentales correspondientes tomen acciones en cuanto el estado de la calidad del aire se torne malo y genere afectaciones graves a la población, con el objetivo de buscar reducir las emisiones de Contaminantes Criterio.

Aunque la reducción de los niveles de los Contaminantes Criterio deberá implicar el compromiso tanto de las empresas e industrias del sector privado y de la cooperación de la población y del gobierno todos estos factores en conjunto para disminuir las emisiones de estos contaminantes a la atmósfera.

Capítulo 3. Marco contextual



La zona de estudio de la presente investigación es la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), en este apartado se contextualiza su localización, y sus características naturales como el relieve, clima, uso del suelo y vegetación, el comportamiento de los vientos y la meteorología; además de los atributos sociales y económicos que la conforman, al igual que funcionamiento de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de esta zona.

3.1 Localización

Las zonas metropolitanas de acuerdo con INEGI (2014), se definen como la agrupación de dos o más municipios, en donde habitan más de 50,000 habitantes, se caracteriza por las funciones y actividades que rebasan el límite del municipio, incorporando como parte de sí misma a los municipios aledaños con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica.

La ZMVT, se ubica en la parte centro del Estado de México (Figura 3.1), entre 18°59'07'' y 19°34'47'' de latitud norte y los meridianos 99°38'22'' y 99°56'13'' de longitud oeste con respecto al meridiano de Greenwich (Secretaría del Medio Ambiente, 2007).

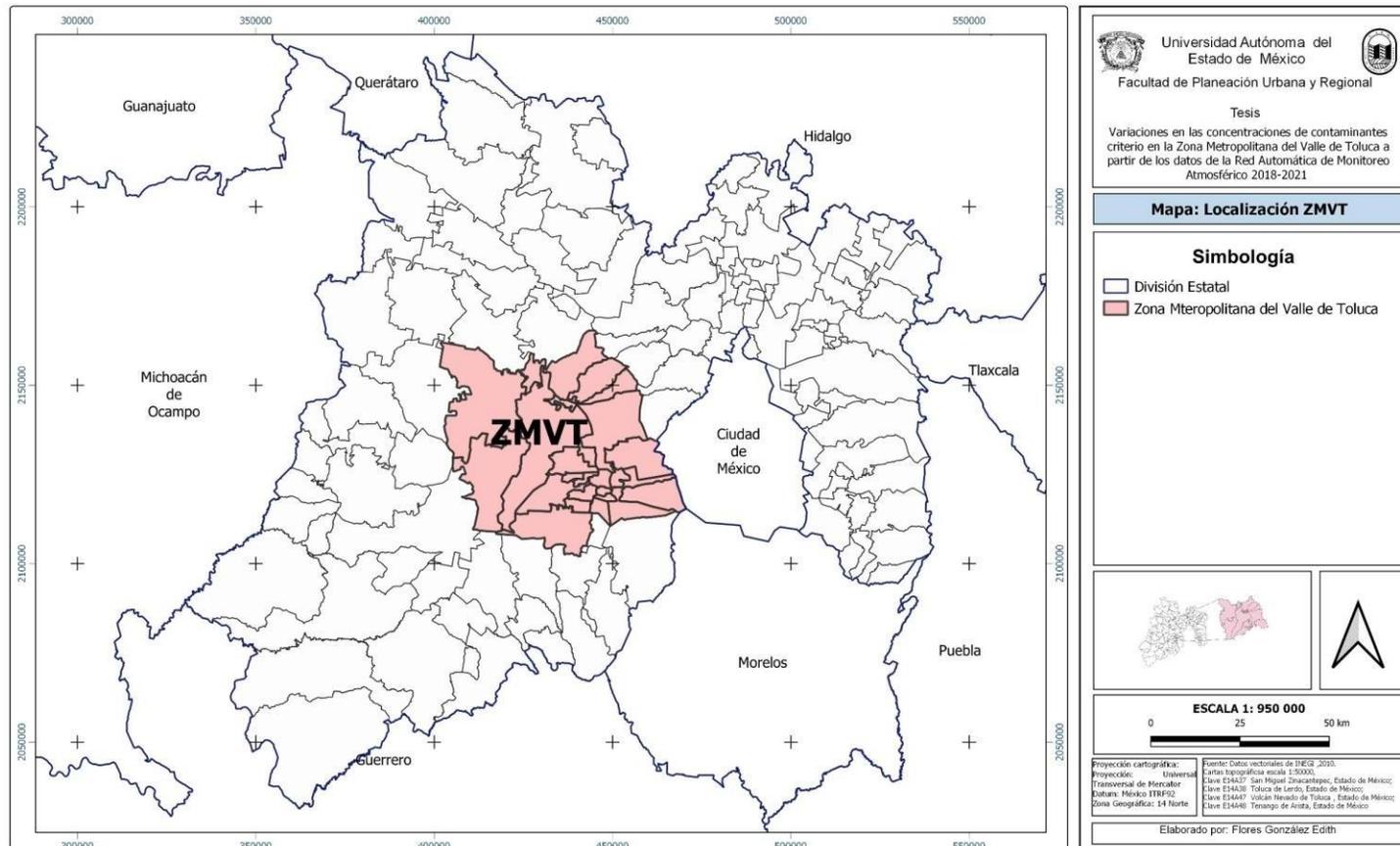
Esta zona se encuentra conformada por 22 municipios (Tabla 3.1) que comprenden una superficie de 2,669.78 km² (Secretaría del Medio Ambiente, 2007), sin embargo, para efectos de la investigación y tomando en cuenta la ubicación de las estaciones y su radio de medición se consideraran los siguientes municipios que se encuentran dentro de la ZMVT.

Tabla 3. 1 Municipios ZMVT

| <i>Municipio</i> | |
|--------------------|---------------------|
| Almoloya de Juárez | Rayón |
| Almoloya del Río | San Antonio la Isla |
| Atizapán | San Mateo Atenco |
| Calimaya | Temoaya |
| Capulhuac | Tenango del Valle |
| Chapultepec | Texcalyacac |
| Lerma | Tianguistengo |
| Metepc | Toluca |
| Mexicaltzingo | Xalatlaco |
| Ocoyoacac | Xonacatlán |
| Otzolotepec | Zinacantepec |

Fuente: Elaboración propia con base en Secretaría del Medio Ambiente, (2007)

Figura 3. 1 Mapa de localización de la ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2016; Secretaría del Medio Ambiente, 2007).

3.2 Caracterización natural de la ZMVT

Dentro de los aspectos naturales que caracterizan a la ZMVT y que influyen en las concentraciones y transporte de los contaminantes criterio, se tiene, la orografía y relieve, el clima y meteorología, la velocidad y dirección del viento y el uso del suelo y vegetación.

3.2.1 Orografía y relieve de la ZMVT

En la ZMVT se encuentran elevaciones y sierras volcánicas de gran importancia en la calidad del aire de la zona, entre las cuales se encuentran el Nevado de Toluca o también conocido como Xinantécatl Secretaría del Medio Ambiente (2012). Es parte del eje Neovolcánico a una altura de 3,000 a 4,600 msnm y se ubica al suroeste del municipio de Toluca y es considerada la cuarta montaña más alta de México (CEPANAF, 2021).

El Nevado de Toluca es un determinante para la dinámica de los vientos en la ZMVT, por medio de los sistemas de baja y tala presión que se generan a lo largo del año, además en la falda del volcán se encuentran elevaciones menores en el municipio de Zinacantepec, como el Cerro de la Calera y volcán Gordo, los cuales influyen y determinan la dirección de los vientos en el sur (Secretaría del Medio Ambiente, 2012).

Algunas de las elevaciones importantes (Tabla 3.2) que obstruyen considerablemente los vientos que soplan de este a oeste de la zona de estudio, son los que conforman a la Sierra de Monte Alto: el Cerro Xeshadi, y en la Sierra de las Cruces destacan el cerro El Gavilán, y los volcanes cerros: La Palma y La Campana (Secretaría del Medio Ambiente, 2012).

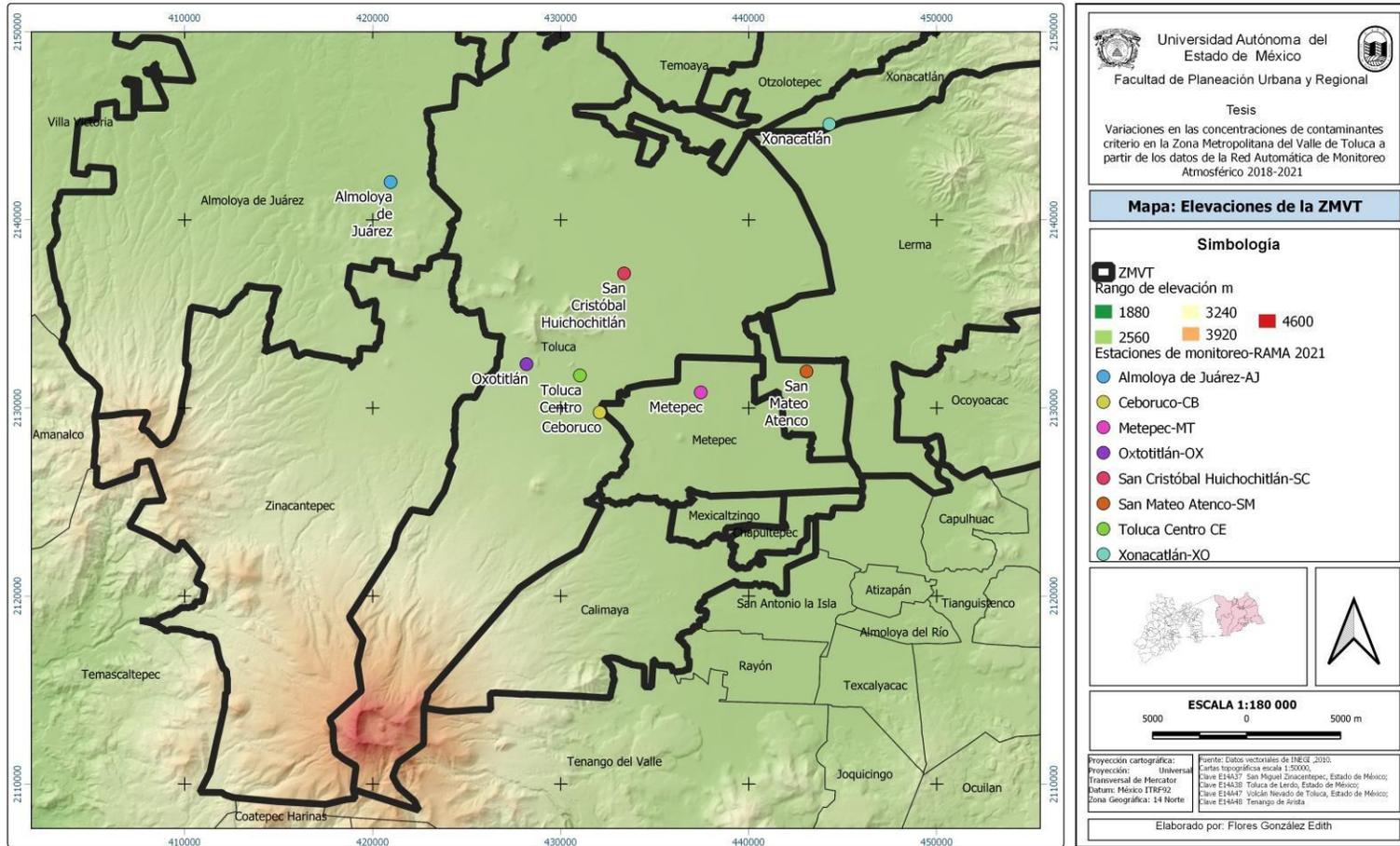
Como se observa en la Figura 3.2 el rango de elevación de la ZMVT se encuentra dentro de los 1880 y 4600 msnm, desde las planicies hasta el eje Neovolcánico. A continuación, se enlistan las elevaciones que predominan en la ZMVT y que realizan modificaciones en la dinámica de vientos.

Tabla 3. 2 Elevaciones en la ZMVT

| <i>Elevación</i> | <i>Ubicación</i> | <i>Msnm</i> |
|----------------------|----------------------|-------------|
| Sierra de Ocoyotepec | Sierra de Ocoyotepec | 2,900 |
| La Campana | Sierra Monte Alto | 3,300 |
| Cerro Xeshadi | | 3,400 |
| El Gavilán | Sierra de las Cruces | 3,000 |
| Molcajete | Sierra Morelos | 2,900 |
| El Ombligo | Nevado de Toluca | 4,600 |
| Pico de Fraile | | 4,600 |
| Volcán Gordo | | 3,700 |
| La Calera | | 3,740 |

Fuente: (Secretaría del Medio Ambiente, 2012).

Figura 3. 2 Mapa de orografía de la ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2010; Secretaría del Medio Ambiente, 2020a).

3.2.2 Clima de la ZMVT

La ZMVT cuenta con dos tipos de clima, el primero es el clima *Cw* templado subhúmedo con lluvias en verano, que de acuerdo con (García, 2004), este clima se caracteriza por tener temperaturas medias de -3 a 18° en los meses más fríos, abarca zonas montañosas y mesetas, los elementos más importantes de este clima, son la precipitación y temperatura ya que influyen de manera significativa en lo referente el grado de humedad.

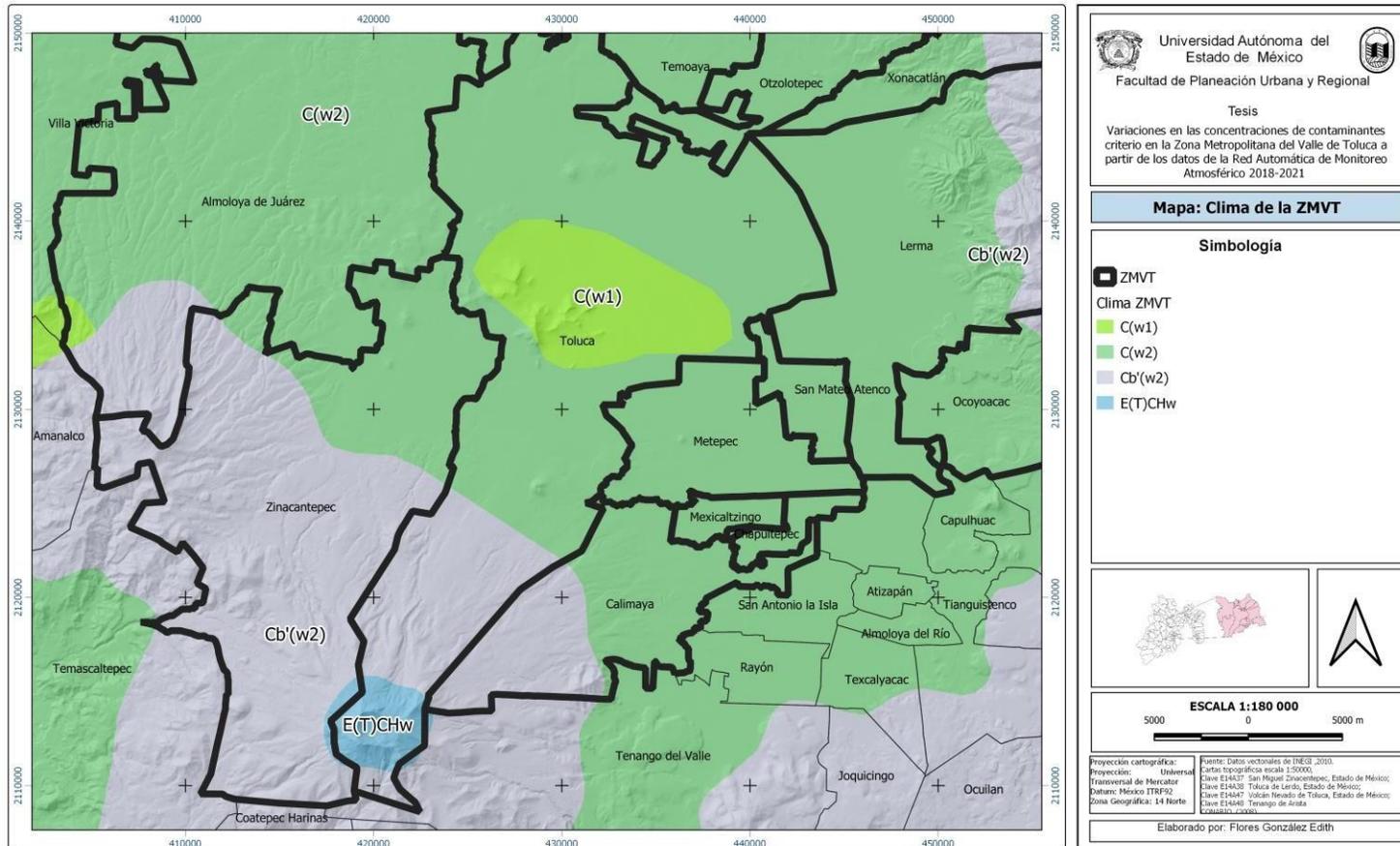
En el mapa de la Figura 3.3 se pueden observar dos subclasificaciones que de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente (2018), son las siguientes:

- C(w1): templado subhúmedo, lluvias en verano con un índice de P/T¹ mayor entre 43.2 y 55.
- C(w2): templado subhúmedo, lluvias en verano con un índice de P/T mayor a 55.
- Cb'(w2): semifrío, subhúmedo con verano fresco largo.

Y el clima de tipo *ET* que es un clima de tundra que presenta temperaturas del mes más caliente entre 0 y 10° C, en México se encuentran en las partes altas de las montañas del centro del país, en la ZMVT el Nevado de Toluca es el que presenta este tipo de clima (García, 2004).

¹ Índice de Lang, es un estimador de eficiencia de la precipitación en relación con la temperatura (Orellana, 2021).

Figura 3. 3 Mapa de climas en la ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en (García & CONABIO, 2008; INEGI, 2010)

3.2.2.1 Meteorología de la ZMVT

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente (2007), dentro de la ZMVT, se cuentan con tres tipos de épocas climáticas a lo largo de todo el año:

- **Seca-fría:** temperatura mensual más baja de noviembre a febrero en un rango de 9 a 11°.
- **Seca-cálida:** se da en los meses de marzo a mayo, con temperaturas mayores a 15°.
- **Lluvia:** abarca los meses de junio a octubre con precipitaciones de 160 a 210 milímetros.

3.2.2.1.2 Precipitación

Se presentan precipitaciones medias de 900 milímetros y durante el verano las lluvias son producidas por el ascenso de aire húmedo y cálido, produciendo lluvias intensas (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

La precipitación es un fenómeno que genera un efecto positivo sobre la calidad del aire, ya que el agua es capaz de absorber parte de los contaminantes, las gotas de agua realizan un lavado a la atmósfera, arrastrando los contaminantes, esto explica que en los meses de junio a septiembre las concentraciones de los contaminantes disminuye (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

3.2.2.1.3 Temperatura

En la ZMVT la temperatura durante el verano es por encima de los 22°C, siendo el mes de julio el más cálido y en el invierno es frío sobre todo en el mes de enero con temperaturas promedio de 8°C (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

La Secretaría del Medio Ambiente (2018), establece que a menor temperatura los contaminantes poseen menos energía cinética para transportarse por lo tanto hay una dispersión limitante de los mismos, en conjunto con la inversión térmica se intensifica en invierno, por ello en los meses más fríos las concentraciones contaminantes aumentan.

3.2.2.1.4 Presión atmosférica

En la ZMVT, la presión más baja se encuentra en el Nevado de Toluca con 727 milibares, el resto de la zona cuenta con una altura de más de 1,800 msnm con una presión atmosférica 22-38% menor que la presión estándar. La presión atmosférica influye cuando se realiza la combustión en altura, por lo que se requiere una cantidad mayor de aire con respecto a lo estándar, causando un aumento de los óxidos de nitrógeno al momento de la combustión (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

3.2.2.2 Velocidad y dirección del viento de la ZMVT

En la ZMVT, por la posición geográfica el suceso de ondas y ciclones tropicales durante la época de lluvia brindan humedad en forma de nubes y lluvias en la ZMVT, contribuyendo a la eliminación de los contaminantes atmosféricos, en la época seca-fría el desplazamiento de los frentes fríos se generan inversiones térmicas ya que se genera un sistema anticiclónico que desfavorecen a la dispersión de contaminantes (Secretaría del Medio Ambiente, 2007).

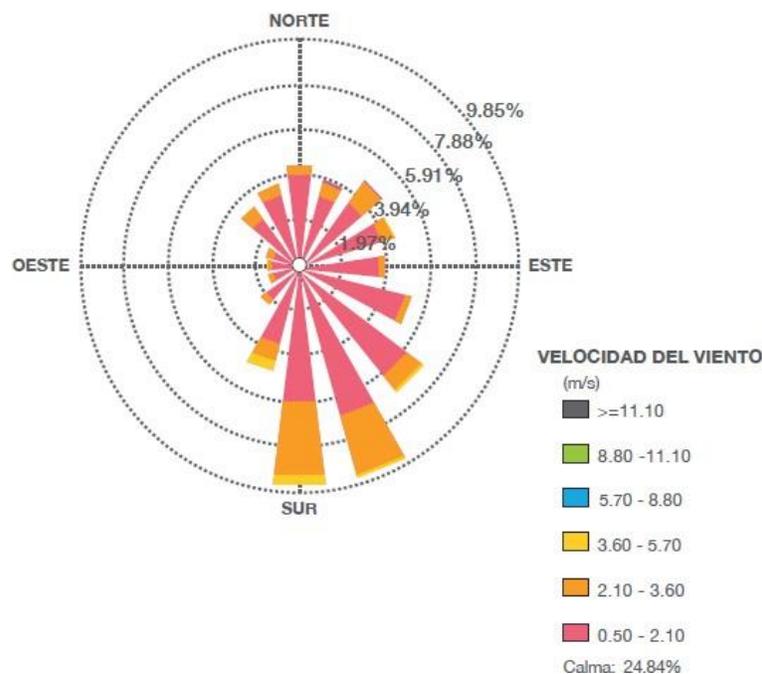
Un punto favorable es que la ZMVT no se encuentra rodeada por completo por barreras naturales (montañas), beneficiando la circulación del viento y ventilación en la ZMVT la mayor parte del año (Secretaría del Medio Ambiente, 2007).

La Secretaría del Medio Ambiente (2018), señala que los vientos predominantes son del sur y sureste (Figura 3.4), lo que facilita el transporte de contaminantes al área norte de la ZMVT, la cual se ve afectada debido a este desplazamiento y de las emisiones de contaminantes de otras zonas.

La dirección cambia de acuerdo a la época del año, en invierno el viento va de sur a norte, con una curvatura que va en el sentido de las manecillas del reloj, por ello las localidades y población del norte de la ZMVT son las más afectadas por los contaminantes criterio provenientes de la zona industrial de Toluca (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

En verano el viento parte del sur hacia el noroeste con una curvatura pronunciada en el sentido de las manecillas del reloj y los contaminantes son transportados de la zona industrial de Lerma a la parte noreste de la ciudad de Toluca (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

Figura 3. 4 Rosa de los vientos de la ZMVT 2015-2015



Fuente: (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

3.2.3 Uso del suelo y vegetación de la ZMVT

En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca cuenta con cinco tipos de suelo: feozem, andosol, cambisol, regosol y leptosol, los cuales son susceptibles a erosión eólica y como consecuencia de esta erosión se incrementan las emisiones de partículas, principalmente las PM_{2.5} sobre todo en las zonas rurales (Secretaría del Medio Ambiente, 2012).

En la ZMVT, el uso de suelo predominante es agrícola con un 63% de la superficie, el uso urbano un 4.2%, forestal un 19.4% y el 12.8% de otros tipos de uso, estos datos de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente (2007). Sin embargo, la Secretaría de Medio ambiente (2018), en todo el estado de México se ha llevado a cabo el cambio de uso de suelo, en el ámbito agrícola la superficie con este uso ha aumentado un 69%, el área urbana un 67%, y las zonas de vegetación han disminuido más del 80%.

El cambio de uso de suelo es de las principales fuentes de contaminantes atmosféricos, es responsable de del 3% de emisiones de NO_x y debido a que este cambio se da principalmente de zonas con vegetación a zonas agrícolas y pastizales, estas dos actividades contribuyen indirectamente a una fracción de emisiones de contaminantes (Secretaría de Medio Ambiente, 2018).

3.3 Caracterización socioeconómica de la ZMVT

En este apartado se especifican las características de la población que conforma la ZMVT, la población que la conforma tiene una gran importancia, ya que es la principal afectada por las emisiones de contaminantes criterio, al igual que sus actividades económicas y antrópicas son de las principales que influyen en la cantidad de contaminantes que se emiten.

3.3.1 Población de la ZMVT

La población del área de estudio se muestra en la siguiente gráfica, los datos obtenidos del Censo de Población y Vivienda del año 2020, se consideraron los municipios que conforman a la ZMVT, en la siguiente Tabla 3.3 se muestran el total del número de habitantes de cada uno:

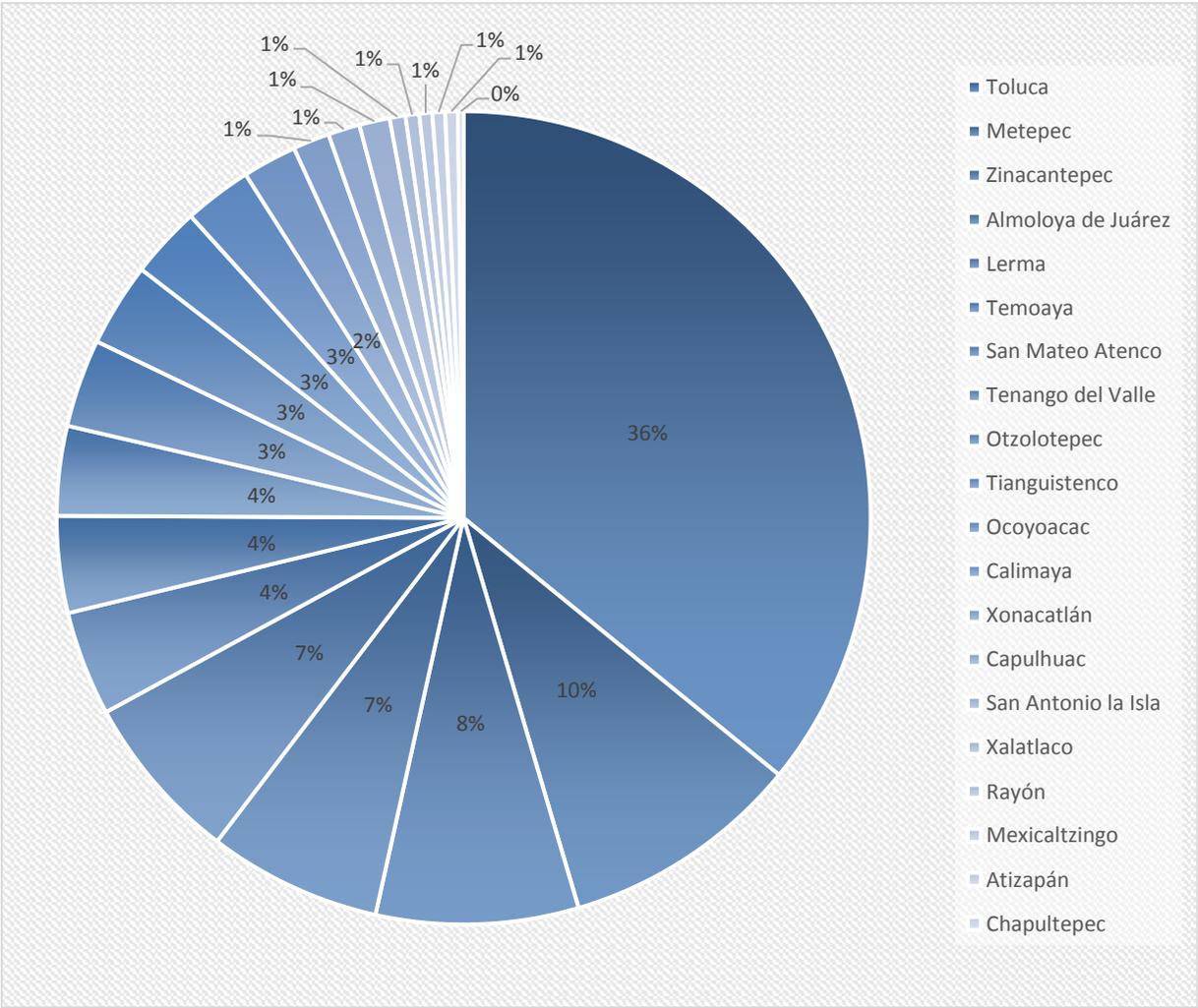
Tabla 3. 3 Población ZMVT

| <i>Municipio</i> | <i>Número de habitantes</i> |
|---------------------|-----------------------------|
| Toluca | 910,608 |
| Metepec | 242,307 |
| Zinacantepec | 203,872 |
| Almoloya de Juárez | 174,587 |
| Lerma | 170,327 |
| Temoaya | 105,766 |
| San Mateo Atenco | 97,418 |
| Tenango del Valle | 90,518 |
| Otzolotepec | 88,783 |
| Tianguistenco | 84,259 |
| Ocoyoacac | 72,103 |
| Calimaya | 68,489 |
| Xonacatlán | 54,633 |
| Capulhuac | 36,921 |
| San Antonio la Isla | 31,962 |
| Xalatlaco | 30,687 |
| Rayón | 15,972 |
| Mexicaltzingo | 13,807 |
| Atizapán | 12,984 |
| Chapultepec | 12,772 |
| Almoloya del Río | 12,694 |
| Texcalyacac | 5,736 |
| Total | 2,537,205 |

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

Como se muestra en la Gráfica 3.1 el 41% de la población se concentra en el municipio de Toluca, seguido con un 11% por Metepec y con un 9% en Zinacantepec, estos tres municipios son los más habitados en la zona y por lo tanto más población se encuentra en riesgo de sufrir las afectaciones por la contaminación atmosférica.

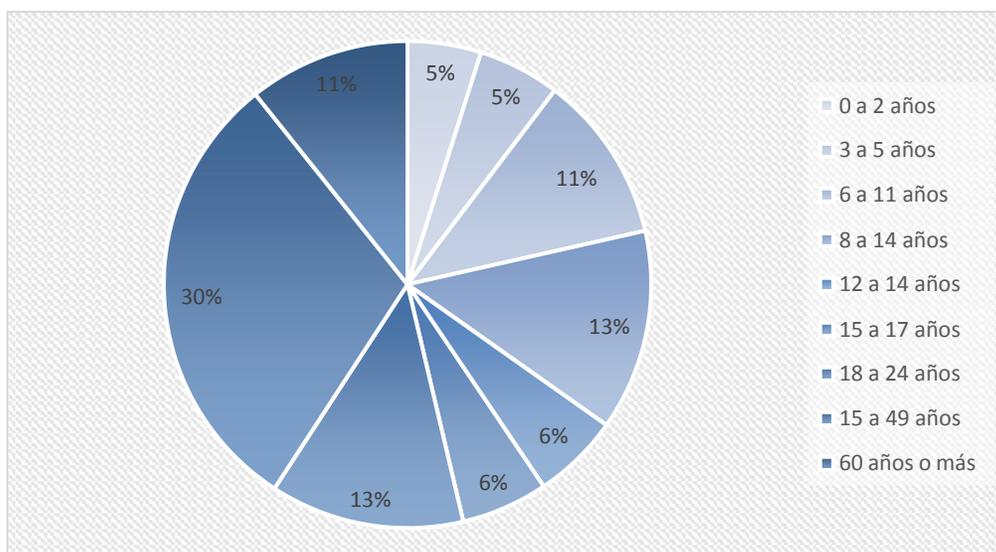
Gráfica 3.1 Porcentaje de población por municipio en la ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

Además de la población que padece enfermedades crónicas, cardiovasculares y pulmonares que es la que se encuentran en mayor riesgo por la contaminación atmosférica, también los niños y adultos mayores, son los más propensos a sufrir los efectos de la contaminación. De acuerdo con en la Gráfica 3.2 que muestra el porcentaje de habitantes por edad en la zona de estudio, aproximadamente el 46% de la población son niños entre los 0 a 17 años y los adultos mayores representan un 11%, es decir, un 57% de la población de la ZMVT se encuentra en riesgos de sufrir daños y deterioro a la salud a causa de la contaminación atmosférica.

Gráfica 3. 2 Población por edad en la ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

3.3.2 Actividades económicas de la ZMVT

A lo largo de los años la economía de la ZMVT se ha transformado de una economía rural a una economía industrial y de servicios, la población económicamente activa de esta zona representa un 49.9% y dentro del sector primario un 3.4%, en el sector secundario un 35.9% y un 56% en el sector terciario, estas cifras indican que hay una tendencia a la terciarización del empleo, desplazando a las actividades del sector primario (Secretaría del Medio Ambiente, 2012).

Dentro del sector primario, predominan actividades como la agricultura y ganadería, que a lo largo de los años han comenzado a invadir zonas forestales por medio de incendios provocados, tala clandestina y quema de pasto; estas actividades al no ser reguladas adecuadamente contribuyen a la emisión de partículas por combustión, además de que a deforestación y el sobre pastoreo provocan el aumento en las concentraciones de material particulado (Secretaría del Medio Ambiente, 2012).

El sector económico secundario está conformado por microindustrias, pequeñas industrias y grandes industrias, que contribuyen significativamente a las emisiones de la atmósfera, destacan los hidrocarburos provenientes de la industria metalmecánica (Secretaría del Medio Ambiente, 2012). La generación de energía eléctrica también supone un problema para la

calidad del aire, ya que se produce con combustibles fósiles derivados del petróleo, la extracción y transporte de estos combustibles generan emisiones de contaminantes criterio como el bióxido de azufre, el consumo y producción de energía eléctrica influye de manera directa e indirecta en la calidad del aire por los contaminantes emitidos en su ciclo de vida (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

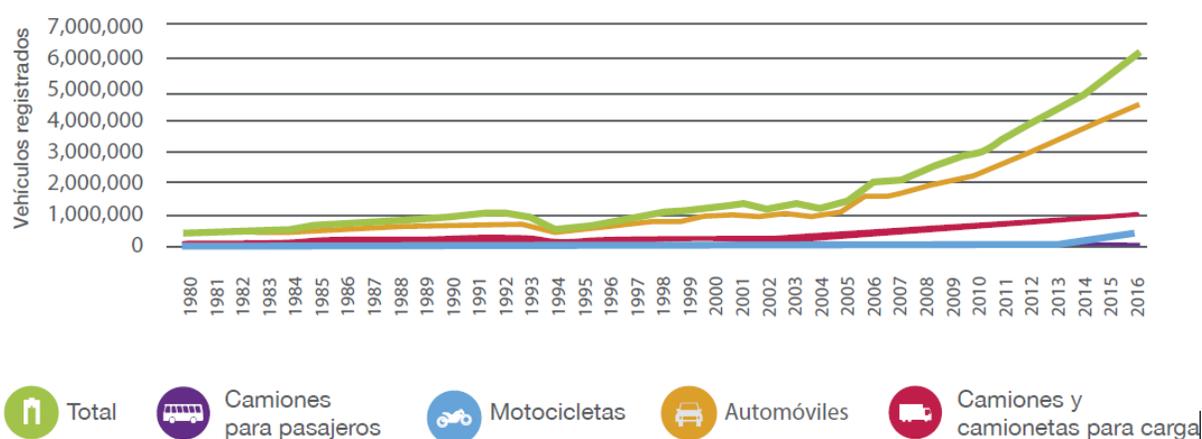
El sector terciario ha aumentado gracias a la expansión urbana, destacan actividades de comercio como la venta de tabaco, alimentos, bebidas y servicios básicos (Secretaría del Medio Ambiente, 2012).

3.3.2.1 Vías de comunicación y transporte

Las vías de comunicación a pesar de ser un factor importante para el desarrollo económico y social de la región, son de los principales responsables de las emisiones de contaminantes a la atmósfera, se ha demostrado que el 77% de emisiones de CO, y 66% de NO_x son provenientes de fuentes móviles, confirmando que los medios de transporte son parte importante en cuanto a las emisiones a la atmósfera (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

Como se observa en la siguiente Figura 3.5, a partir del año 2005 ha aumentado de manera acelerada el número de vehículos registrados, sobre todo los automóviles particulares con más de 4 millones de registros hasta 2016 (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

Figura 3. 5 Automóviles registrados en la ZMVT



Fuente: (Secretaría del Medio Ambiente, 2018)

3.4 Funcionamiento de la RAMA

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), inició su funcionamiento en el año de 1994 y hoy es administrada por la Secretaría del Medio Ambiente del estado, su operación se basa en lo establecido en las Normas Oficiales Mexicanas en materia de salud y aquellas que determinan el valor límite permisible para los 6 contaminantes criterio que mide (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

La medida de los contaminantes inicia con la obtención de una muestra de aire ambiente en la caseta, pasa por los analizadores y se procesa para generar datos que se envían al centro

de control vía internet, se almacenan y validan para integrar los reportes de calidad del aire (Secretaría del Medio Ambiente, 2020a).

3.4.1 Las estaciones de la RAMA en la ZMVT

En el 2018 la RAMA contaba con seis estaciones de monitoreo atmosférico, Toluca Centro (CE), Oxtotitlán (OX), Metepec (MT), Ceboruco (CB), San Mateo Atenco (SM), San Cristóbal Huichochitlán (SC) y la estación Aeropuerto, esta última fuera de servicio (Figura 3.6). En la siguiente Tabla 3.4 se muestra la evolución de las estaciones de monitoreo atmosférico, desde el 2018 a 2021

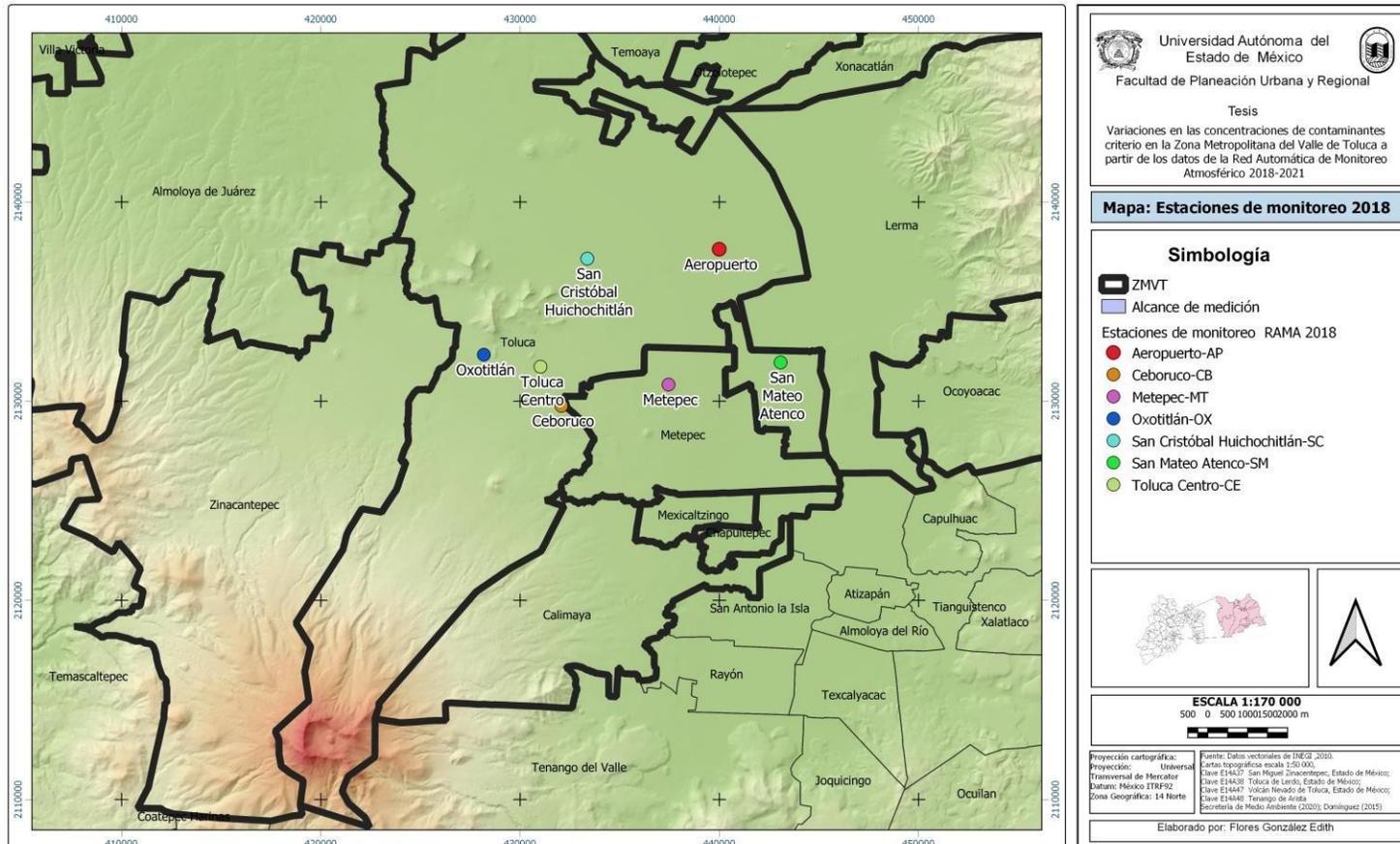
La RAMA actualmente cuenta con dos estaciones más Xonacatlán (XO) y Almoloya de Juárez (AJ) (Figura 3.7), además de una unidad móvil y un centro de control, la red opera las 24 horas del día durante los 365 días del año, para que la generación de datos sea constante y en tiempo real. La red mide los seis contaminantes criterio: bióxido de nitrógeno (NO₂), bióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM₁₀), material particulado (PM_{2.5}), y Ozono (O₃). Al igual que las variables meteorológicas que son importantes para el monitoreo: temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, radiación solar total y precipitación pluvial (Secretaría del Medio Ambiente, 2020a).

Tabla 3.4 Estaciones de monitoreo en la ZMVT

| Zona | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| Norte | Aeropuerto | Aeropuerto | | |
| | San Cristóbal Huichochitlán | San Cristóbal Huichochitlán | San Cristóbal Huichochitlán | San Cristóbal Huichochitlán |
| | | | Almoloya de Juárez | Almoloya de Juárez |
| | | | Xonacatlán | Xonacatlán |
| Centro | Oxtotitlán OX | Oxtotitlán OX | Oxtotitlán OX | Oxtotitlán OX |
| | Toluca Centro | Toluca Centro | Toluca Centro | Toluca Centro |
| Sur | Metepec | Metepec | Metepec | Metepec |
| | Ceboruco | Ceboruco | Ceboruco | Ceboruco |
| | San Mateo Atenco | San Mateo Atenco | San Mateo Atenco | San Mateo Atenco |
| | | | | Calimaya (en funcionamiento a partir de diciembre) |

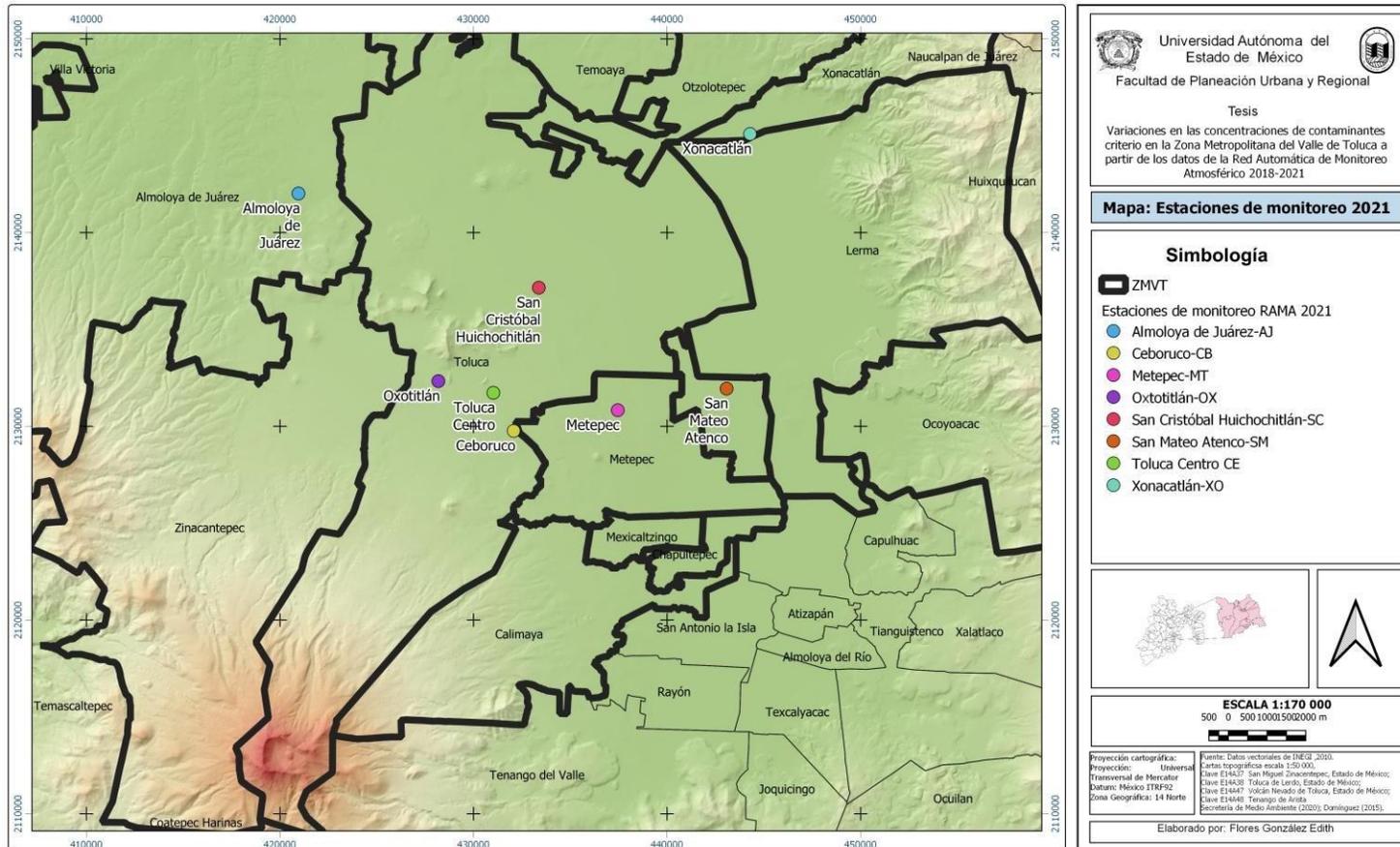
Fuente: elaboración propia

Figura 3. 6 Mapa de estaciones de monitoreo 2018



Fuente: elaboración propia con base en (Domínguez, 2015; INEGI, 2010; Secretaría del Medio Ambiente, 2020b)

Figura 3. 7 Mapa de estaciones de monitoreo 2021



Fuente: elaboración propia con base en (INEGI, 2010; Secretaría del Medio Ambiente, 2020b).

3.4.1 Reportes de la calidad del aire en la ZMVT

La calidad del aire en la ZMVT se reporta en diferentes periodos de tiempo:

- Reporte horario:** La calidad del aire en la ZMVT, se reporta por estación en un mapa dinámico en donde se encuentran las estaciones con los colores que corresponde a la calidad del aire que reportan: verde es buena, amarillo regular, naranja mala, roja muy mala, y morado para la calidad extremadamente mala, se toma como referencia los valores establecidos por el IMECA. Así mismo, las concentraciones máximas por hora de manera general de los 6 contaminantes criterio y por último el Índice Aire y Salud, en donde se reporta el nivel de riesgo para la población con respecto a la calidad del aire; en la Figura 3.8, la calidad del aire es mala y representa un alto riesgo para la salud de la población.

Figura 3. 8 Reporte horario de la calidad del aire en la ZMVT (ICA)



Fuente: (Secretaría del Medio Ambiente, 2021b)

- **Reporte diario:** en este reporte se indican los valores de las concentraciones de los contaminantes por zonas, de acuerdo con el IMECA, se establecen los límites máximos por cada zona como se observa en la Tabla 3.4.

Tabla 3. 4 Datos diarios de la calidad del aire en la ZMVT

HORA DE CORTE: 16:00 hrs.

87

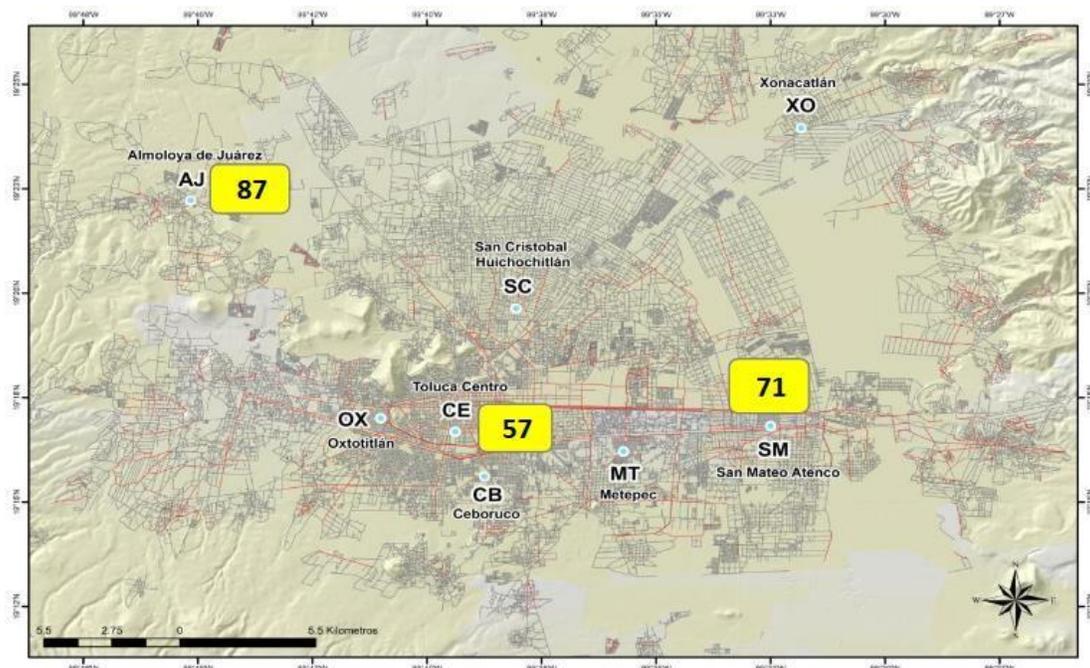
MÁXIMO

| CONTAMINANTE | ZONA CENTRO | ZONA NORTE | ZONA SUR | HORA MAXIMO |
|---|-------------|------------|----------|-------------|
| Partículas Menores a 10 µcras (PM ₁₀) | 57 | 87 | 62 | 12:00 |
| Partículas Menores a 2.5 µcras (PM _{2.5}) | 55 | 62 | 71 | 16:00 |
| Ozono (O ₃) | 40 | 41 | 37 | 16:00 |
| Bióxido de Nitrógeno (NO ₂) | 11 | 16 | 13 | |
| Monóxido de Carbono (CO) | 8 | 8 | 8 | |
| Bióxido de Azufre (SO ₂) | 3 | 8 | 3 | |

Fuente: (Secretaría del Medio Ambiente, 2021a)

Así mismo en este reporte se presenta un mapa en donde por estas zonas se señalan las estaciones con mayor concentración de alguno de los contaminantes medidos Figura 3.9:

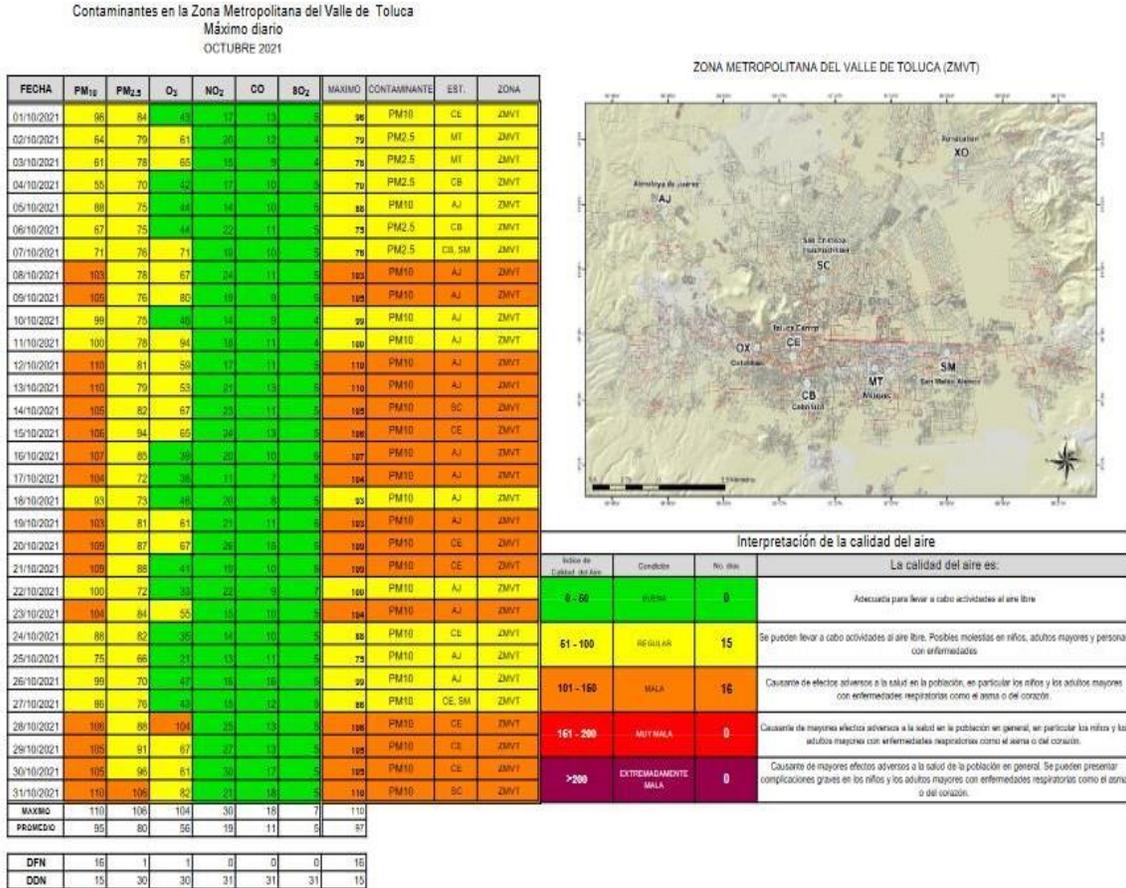
Figura 3. 9 Mapa diario de la calidad del aire en la ZMVT



Fuente: (Secretaría del Medio Ambiente, 2021a)

- Reporte mensual:** recopila las concentraciones de cada contaminante por cada día de un mes (Figura 3.5), así mismo destaca los valores máximos de un día, de que contaminante es y solo destaca la estación en la que se reportó, es decir, es un panorama general de la calidad del aire al mes.

Figura 3. 10 Reporte mensual de la calidad del aire en la ZMVT



Fuente: (Secretaría del Medio Ambiente, 2021a)

Epílogo

La ZMVT, si bien se encuentra conformada por 22 municipios solo en algunos de estos se encuentran las estaciones de monitoreo atmosférico, cabe recalcar que por las diversas actividades económicas que se llevan a cabo en la zona de estudio, como la operación desde pequeñas y grandes industrias, las cuales al igual que el transporte, el uso de combustibles fósiles y comercio contribuyen de manera importante a la degradación de la calidad del aire.

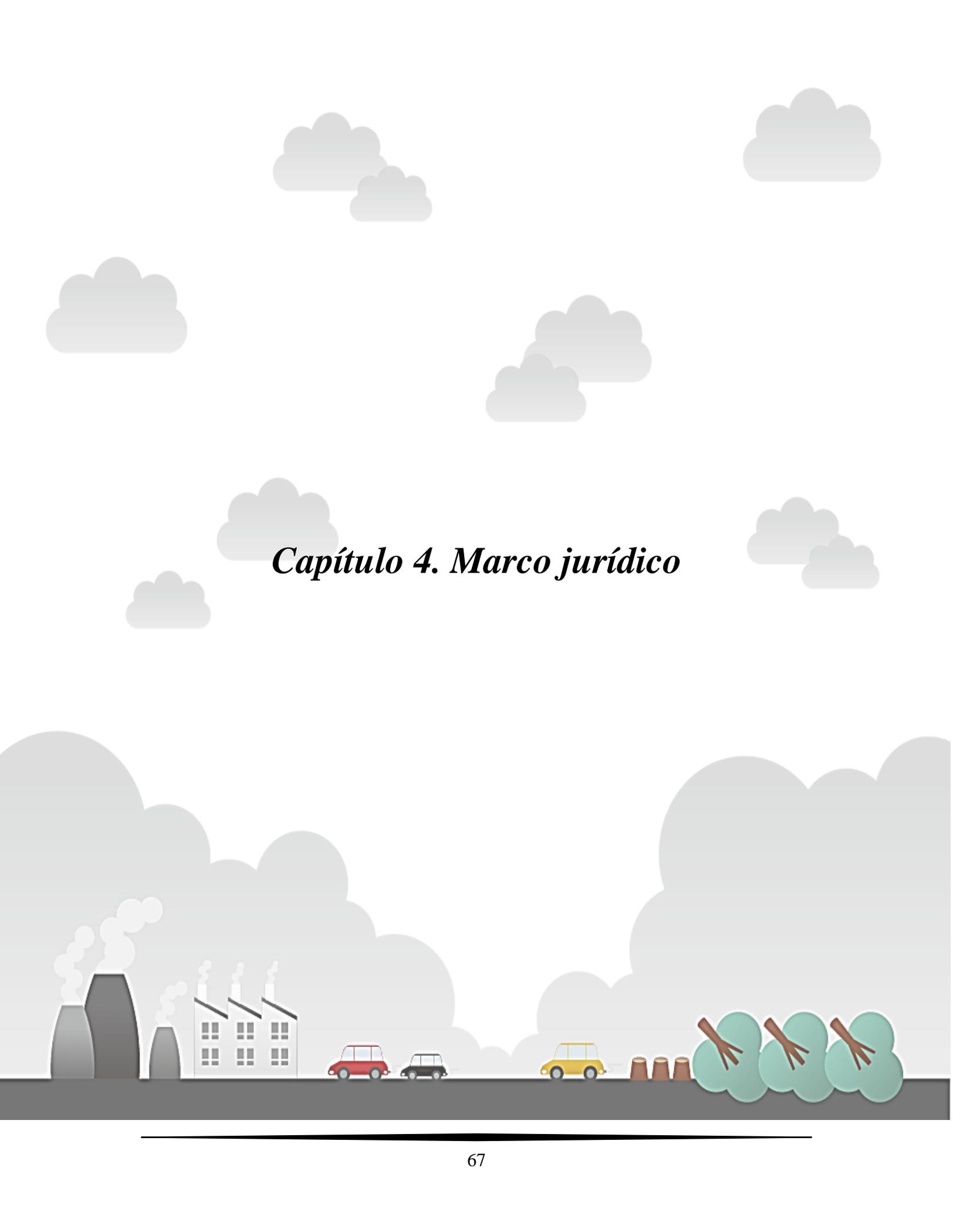
Es importante tener en cuenta que Toluca que además de ser de los municipios más habitados dentro de la ZMVT también es un lugar en el que a diario miles de personas transitan y esto a su vez provoca el incremento de congestiones vehiculares en las diferentes calles y carreteras y a su vez incide en la emisión de Contaminantes Criterio por automotores que operan con combustibles fósiles.

En la ZMVT habitan más de 2.5 millones de habitantes, los cuales se encuentran expuestos día con día a altos niveles de contaminación, poniendo en riesgo a adultos mayores y niños los que tienen una alta probabilidad de sufrir afectaciones respiratorias y cardiovasculares de acuerdo de igual manera con el tiempo de exposición y el nivel de contaminación, aunque el resto de población no queda exenta a presentar daños en la salud.

Influye en gran medida que la ZMVT sea como un valle abierto, ya que esto permite una mejor circulación del viento y por lo tanto el movimiento y dispersión de los contaminantes sea mayor.

Sin embargo, en la principales ciudades y zonas urbanas con su crecimiento también este factor de dispersión puede reducirse debido a la cantidad de edificios construidos y que reducen la velocidad y pueden llegar a cambiar la dirección del viento. Aunque los otros parámetros meteorológicos pueden contribuir de manera positiva o negativa en la dispersión de los contaminantes.

El monitoreo atmosférico que se realiza por la RAMA dentro de la ZMVT permite que se dé a conocer a la población las concentraciones de los contaminantes y variables meteorológicas que cabe resaltar son variantes. Su comportamiento dependerá tanto de factores sociales, económicos y naturales.

A stylized landscape illustration at the bottom of the page. On the left, there are three grey smokestacks emitting white smoke, next to a white factory building with several windows. In the center, a red car and a black car are driving on a grey road. To the right, a yellow car is driving, followed by three brown barrels and three green bushes with brown trunks. The background features large, soft grey clouds. The title 'Capítulo 4. Marco jurídico' is centered in the upper half of the page in a black, italicized serif font.

Capítulo 4. Marco jurídico

En este capítulo se abordan los elementos jurídicos que regulan la contaminación atmosférica, como los límites máximos permisibles de los contaminantes criterio a nivel internacional considerando parámetros de la OMS, Estados Unidos y Europa. La normatividad a nivel nacional dada por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), las Normas Oficiales Mexicanas y la Estrategia Nacional de Calidad del Aire; y a nivel estatal señalada por la Ley de Protección las Ambiente Desarrollo Sustentable del Estado de México.

4.1 Normatividad internacional

A nivel internacional existen parámetros que determinan los límites máximos permisibles de los contaminantes criterio, entre los cuales se consideraron los parámetros de la Organización Mundial de la Salud, *Environmental Protection Agency* (EPA), y la Unión Europea (UE).

4.1.1 Parámetros de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

En el 2005 la Organización Mundial de la Salud, publicó la primera guía de directrices de la calidad del aire, en donde establecía los límites máximos permisibles de los contaminantes criterio, dieciséis años después la organización actualizó los parámetros estableciendo límites máximos permisibles más estrictos con respecto al 2005, en la Tabla 4.1 se muestran los nuevos parámetros (WHO, 2021), las unidades de medida se muestran en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm y ppb².

Tabla 4.1 Parámetros OMS

| <i>Contaminante</i> | <i>Tiempo promedio</i> | <i>Límite 2005</i> | <i>Límite 2021</i> |
|--|-----------------------------|------------------------------|--|
| <i>Monóxido de carbono CO</i> | 24 horas | * | 4 mg/m³ |
| <i>Bióxido de nitrógeno NO₂</i> | 1 año | 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| | 24 horas | * | 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| <i>Ozono O₃</i> | Temporada alta ³ | * | 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| | 8 horas | 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| <i>Material particulado PM_{2.5}</i> | 1 año | 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| | 24 horas | 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| <i>Material particulado PM₁₀</i> | 1 año | 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| | 24 horas | 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| <i>Bióxido de azufre SO₂</i> | 24 horas | 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |

Fuente: Elaboración propia con base en WHO (2021).

² Sus equivalencias y significado se muestran en el glosario al inicio del presente trabajo

³ Promedio de la concentración media de O₃ máxima diaria de 8 horas en seis meses consecutivos con la concentración de O₃ promedio móvil más alta de seis meses.

4.1.2 Parámetros de la *Environmental Protection Agency* (EPA)

La *Environmental Protection Agency* (EPA, 2021c), establece los siguientes valores como límites máximos permisibles de los contaminantes criterio (Tabla 4.2), para los cuales consideraron dos estándares, el primer dirigido a la población sensible y el segundo a la población en general. A continuación, se muestran estos valores (EPA, 2021c).

Tabla 4. 2 Estándares de la EPA

| Contaminante | 1° y 2° estándar | Tiempo promedio | Límite | Especificaciones para la región |
|--|-------------------------|------------------------|------------------------|--|
| Monóxido de carbono CO | 1° estándar | 8 horas | 9 ppm | No debe ser excedido más de una vez al año. |
| | | 1 hora | 35 ppm | |
| Bióxido de nitrógeno NO₂ | 1° estándar | 1 hora | 100 ppb | 98% de concentraciones máximas diarias en una hora promediadas por 3 años |
| | 1° y 2° estándar | 1 año | 53 ppb | Media anual |
| Ozono O₃ | 1° y 2° estándar | 8 horas | 0.070 ppm | Como cuarta concentración más alta anualmente por 8 horas, promediada durante 3 años |
| Material particulado PM_{2.5} | 1° estándar | 1 año | 12.0 µg/m ³ | Media anual |
| | 2° estándar | 1 año | 15.0 µg/m ³ | Media anual |
| | 1° y 2° estándar | 24 horas | 35 µg/m ³ | Promediado a 3 años |
| Material particulado PM₁₀ | 1° y 2° estándar | 24 horas | 150 µg/m ³ | No debe ser excedido a más de 1% por año |
| Bióxido de azufre SO₂ | 1° estándar | 1 hora | 75 ppb | Promediado a 3 años |
| | 2° estándar | 3 horas | 0.5 ppm | No debe ser excedido a más de 1% por año |

Fuente: (EPA, 2021c).

4.1.3 Parámetros de la Unión Europea (UE)

La Unión Europea establece sus límites máximos permisibles (Tabla 4.3) en función de los tiempos de exposición y los efectos ante los contaminantes criterio (European Commission, 2021).

Tabla 4. 3 Parámetros de la Unión Europea

| <i>Contaminante</i> | <i>Tiempo promedio</i> | <i>Límite</i> | <i>Excesos permitidos al año</i> |
|--|------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| <i>Monóxido de carbono CO</i> | 8 horas | 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | No aplica |
| <i>Bióxido de nitrógeno NO₂</i> | 1 hora | 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 18 |
| | 1 año | 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | No aplica |
| <i>Ozono O₃</i> | 8 horas | 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 25 días en promedio durante 3 años |
| <i>Material particulado PM_{2.5}</i> | 1 año | 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | No aplica |
| <i>Material particulado PM₁₀</i> | 24 horas | 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 35 |
| | 1 año | 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | No aplica |
| <i>Bióxido de azufre SO₂</i> | 1 hora | 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 24 |
| | 24 horas | 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 3 |

Fuente: (European Commission, 2021).

4.2 Normatividad nacional

4.2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

En la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, se establecen los siguientes artículos en materia ambiental y de calidad del aire:

- **“Artículo 4°:** *Toda persona tiene derecho a la protección de la salud además de que toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.*”
- **Artículo 73°:** ... “es facultad del Congreso determinar las medidas para prevenir y combatir la contaminación ambiental.”

4.2.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente expedida en 1988 y reformada en 2021 publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF), se refiere a la preservación, y restauración del equilibrio ecológico, la protección al ambiente en el territorio nacional y las zonas donde se establece jurisdicción, tiene por objeto propiciar un desarrollo sustentable para:

- I. Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar;
- II. Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación;
- III. La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;
- IV. La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas;
- V. El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;
- VI. La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo

En materia de contaminación atmosférica y calidad del aire la Ley establece los siguientes artículos (Tabla 4.4):

Tabla 4. 4 Artículos en materia de contaminación atmosférica

| Artículo | Descripción |
|-------------------------|---|
| Artículo 5 | Le corresponde a la federación la regulación de la contaminación atmosférica proveniente de todo tipo de fuentes, el fomento de la aplicación de las tecnologías, equipos y procesos para la reducción de emisiones de contaminantes. |
| Artículo 7 | Los estados son los encargados de la prevención y control de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas y móviles. |
| Artículo 8 | Los municipios deberán aplicar disposiciones jurídicas en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica en concordancia con la legislación estatal. |
| Artículo 11 | La federación a través de la Secretaría podrá suscribir acuerdos de coordinación con gobiernos estatales y municipales para la prevención y control de la contaminación atmosférica provenientes de fuentes fijas y móviles. |
| Artículo 109 BIS | La Secretaría, las entidades federativas, los municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, deberán integrar un registro de emisiones y transferencia de contaminantes al aire. |
| Artículo 110 | <p>Para la protección a la atmósfera se considerarán los siguientes criterios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país. • Las emisiones de contaminantes de la atmósfera de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico. |
| Artículo 111 | <p>Para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera, la Secretaría tendrá las siguientes facultades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Expedir las normas oficiales mexicanas estableciendo límites máximos permisibles en materia de calidad del aire y contaminación atmosférica. • Integrar y mantener actualizado el inventario de las fuentes emisoras de contaminantes a la atmósfera a nivel federal, estatal y local. • Formular y aplicar programas para la reducción de emisión de contaminantes a la atmósfera, para cada área, zona o región de la nación. • Promover y apoyar técnicamente a los gobiernos locales en la formulación y aplicación de programas de gestión de calidad del aire. • Requerir a los responsables de la operación de fuentes fijas de jurisdicción federal, el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes. • Aprobar los programas de gestión de calidad del aire elaborados por los gobiernos locales para el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas respectivas • Promover ante los responsables de la operación de fuentes contaminantes, la aplicación de nuevas tecnologías, con el propósito de reducir sus emisiones a la atmósfera |

Continuación Tabla 4. 5 Artículos en materia de contaminación atmosférica

| | |
|-------------------------|---|
| Artículo 112 | <p>En materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, los gobiernos de las entidades federativas, los Municipios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Controlarán la contaminación del aire en los bienes y zonas de jurisdicción local. • Definir zonas aptas para la instalación de industrias comerciales. • Los responsables de la operación de fuentes fijas deberán cumplir los límites máximos permisibles establecidos en las normas. • Integrarán y mantendrán actualizado el inventario de fuentes de contaminación. • Establecerán y operarán sistemas de verificación de emisiones de automotores en circulación. • Establecerán y operarán, sistemas de monitoreo de la calidad del aire. • Establecerán requisitos para regular las emisiones del transporte público, suspensión de circulación, en casos graves de contaminación. • Tomarán las medidas preventivas para evitar contingencias ambientales por contaminación atmosférica. • Elaborarán informes sobre el estado del medio ambiente. • Impondrán sanciones y medidas por infracciones a las leyes. • Formularán y aplicarán programas de gestión de calidad del aire. |
| Artículo 113 | <p>No deberán emitirse contaminantes a la atmósfera que ocasionen o puedan ocasionar desequilibrios ecológicos o daños al ambiente.</p> |
| Artículo 114 | <p>Las autoridades competentes determinarán las zonas aptas para uso industrial, próximas a áreas habitacionales, instalación de industrias que utilicen tecnologías y combustibles para generar menos contaminantes.</p> |
| Artículo 115 | <p>La Secretaría determinará el uso del suelo para definir el desarrollo urbano con las condiciones topográficas, climáticas y meteorológicas para asegurar la dispersión de contaminantes.</p> |
| Artículo 116 | <p>Las autoridades correspondientes podrán dar estímulos fiscales a quienes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalen u operen equipos para control de emisión de contaminantes. • Fabriquen o den mantenimiento a equipo de filtrado de combustión y de tratamiento de emisiones a la atmósfera. • Realicen investigación científica y tecnológica e innovación para disminuir la generación de emisiones contaminantes. |
| Artículo 159 BIS | <p>La Secretaría desarrollará un Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales registrarán, organizarán, actualizarán y difundirán información relativa a los inventarios de recursos naturales existentes en el territorio nacional, a los mecanismos y resultados obtenidos del monitoreo de la calidad del aire, del agua y del suelo, al ordenamiento ecológico del territorio.</p> |

Fuente: Elaboración propia con base en LGEEPA (2021).

4.2.3 Normas Oficiales Mexicanas NOM

De acuerdo con la Secretaría de Salud (2015), una Norma Oficial Mexicana es una regulación técnica expedidas por las diferentes dependencias que tienen por objetivo reunir los procesos o servicios que puedan constituir un peligro para la seguridad de las personas o dañar su salud, estas NOM son revisadas y evaluadas cada 5 años a partir de su entrada en vigor, además de su revisión serán evaluadas y estudiadas para decidir su posible modificación o cancelación de las mismas.

4.2.3.1 Normas aplicables para el monitoreo de la calidad del aire

A continuación, se desglosan las Normas Oficiales Mexicanas que en materia del monitoreo de la calidad del aire y de la generación del “Índice Aire y Salud”.

4.2.3.1.1 Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012 Sistemas de monitoreo

La SEMARNAT (2012), estableció que esta norma tiene por objetivo especificar las condiciones mínimas para el establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire, es aplicable en todo el territorio mexicano y de observancia obligatoria para los gobiernos de los centros de población en las condiciones de asentamientos humanos con más de 500,000 habitantes, zonas metropolitanas, asentamientos humanos con emisiones superiores a veinte mil toneladas anuales de contaminantes criterio primarios a la atmósfera, conurbaciones y actividad industrial que por sus características requiera de las estaciones de monitoreo atmosférico.

SEMARNAT (2012), determino que las entidades federativas y los municipios deben diseñar los sistemas de monitoreo estableciendo:

- Objetivos del monitoreo de la calidad del aire y muestreo de contaminantes atmosféricos.
- Definir los contaminantes a muestrear, considerando el inventario de emisiones a la atmósfera, modelos de la calidad del aire, información meteorológica de la región, características geográficas, información fisiográfica urbana, localización de los asentamientos humanos, estudios preliminares.
- Selección de instrumentos de medición.
- Determinar la metodología para el monitoreo de la calidad del aire.
- Determinar la escala de representatividad espacial de cada estación.
- Determinar el número de estaciones necesarias.
- Determinar la ubicación y el tipo de estación o estaciones de muestreo y monitoreo.

Algunas características básicas establecidas por la SEMARNAT (2012), en la norma para los sistemas de monitoreo son:

- Los sistemas de monitoreo estarán conformados por una o más estaciones de monitoreo fijas o móviles.
- Estas estaciones tendrán equipo con sistemas para la transmisión continua de la información de la calidad del aire.

- La captura de la información se realizará de manera directa en la memoria de los instrumentos o un equipo externo y será depositada en un medio de almacenamiento.
- Los registros serán procesados y almacenados en el centro de cómputo del sistema.
- Se mantendrá un respaldo permanente de la información, en medios electrónicos.
- El área responsable del sistema de monitoreo tiene que brindar soporte técnico, mantenimiento y calibración a los equipos, análisis estadísticos e interpretación de datos, control y aseguramiento de la calidad y comunicación social para la transparencia y acceso a la información pública.

Con respecto al manejo de datos se realizará un manejo de estos al igual que una verificación y validación para generar periódicamente los reportes de la calidad del aire (SEMARNAT 2012).

4.2.3.1.2 Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 Índice Aire y Salud

Establece los lineamientos para la obtención y comunicación del índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (Tabla 4.5), para informar de manera clara, oportuna y continua el estado de la calidad del aire y los probables daños a la salud que ocasiona y las medidas aplicables para reducir la exposición (SEMARNAT, 2019). El índice notifica el estado de la calidad del aire que evidencia el grado de contaminación atmosférica y los efectos potenciales en la salud, deberá ser difundido por las entidades federativas y municipios responsables del monitoreo de la calidad del aire. Considera cinco categorías de calidad del aire, representadas en colores y los niveles de riesgo asociado (SEMARNAT, 2019).

Tabla 4. 6 Categorías del Índice Aire y Salud

| Calidad del aire | Nivel de riesgo asociado | Descripción |
|---------------------|--------------------------|---|
| Buena | Bajo | El riesgo es mínimo o nulo |
| Aceptable | Moderado | Las personas sensibles presentan síntomas respiratorios y posible agravamiento de enfermedades pulmonares y cardíacas en personas con enfermedad cardiopulmonar y adultos mayores |
| Mala | Alto | Disminución de la capacidad pulmonar, síntomas respiratorios en niños, ancianos, personas con deficiencias nutricionales, trabajadores y ciclistas. Agravamiento y disminución en la tolerancia de la actividad física. |
| Muy mala | Muy alto | Mayor probabilidad de síntomas respiratorios en la población en general, incremento en síntomas cardiovasculares como dolor precordial (enfermos del corazón). Alta probabilidad de muerte prematura en personas con enfermedades pulmonares o cardíacas. |
| Extremadamente mala | Extremadamente malo | Síntomas severos respiratorios en la población en general. Serios efectos y agravamiento de síntomas en personas sensibles y muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas y pulmonares |

Fuente: Elaboración propia con base en SEMARNAT (2019).

Las recomendaciones y acciones por considerar para grupos sensibles y para toda la población se muestran en la Tabla 4.6

Tabla 4. 7 Recomendaciones asociadas a las categorías de calidad del aire y riesgos a la salud

| Calidad del aire | Nivel de riesgo asociado | Recomendaciones | |
|---------------------|--------------------------|--|---|
| | | Para grupos sensibles | Para toda la población |
| Buena | Bajo | Se pueden realizar actividades al aire libre | |
| Aceptable | Moderado | Reducir las actividades físicas vigorosas al aire libre | Pueden realizar actividades al aire libre |
| Mala | Alto | Evitar las actividades físicas (moderadas y vigorosas) al aire libre | Reducir las actividades físicas vigorosas al aire libre |
| Muy mala | Muy alto | No realizar actividades al aire libre. Acudir al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos | Evita las actividades físicas moderadas y vigorosas al aire libre |
| Extremadamente mala | Extremadamente malo | Permanece en espacios interiores. Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardiacos | |

Fuente: Fuente: Elaboración propia con base en SEMARNAT (2019).

4.2.3.2 Normatividad de los Contaminantes Criterio

A continuación, se muestran las Normas Oficiales Mexicanas que determinan los límites máximos permisibles de los seis contaminantes criterio: ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO₂), bióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado menor o igual a 10 micras (PM₁₀) y material particulado de 2.5 micras (PM_{2.5}).

4.2.3.2.1 Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2021 O₃

Tiene por objetivo establecer los límites permisibles para las concentraciones de ozono O₃ y los criterios para su evaluación. Es de carácter obligatorio para todo el territorio nacional, sirve de referencia para las autoridades federales y locales encargados de la vigilancia y evaluación de la calidad del aire para proteger la salud de la población (Secretaría de Salud, 2021a)

Acorde con la Secretaría de Salud (2021a), la norma tiene dos valores límite para las concentraciones ambientales del ozono, para así proteger la salud de la población susceptible:

- **1 hora:** las concentraciones de O₃ debe ser menor o igual a **0.090 ppm o 176 µg/mt**
- **Promedio móvil de 8 horas:** las concentraciones de O₃ deben ser igual a **0.065 ppm o 127 µg/mt.**

4.2.3.2 Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021 CO

La NOM-021-SSA1-2021 se estableció el criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al monóxido de carbono CO, así como el valor permisible para la concentración de este en el medio ambiente (Secretaría de Salud, 2021b).

La (Secretaría de Salud, 2021b), determina que es aplicable en todo el territorio mexicano, en las políticas de saneamiento ambiental en lo referente a la salud humana, situaciones ambientales que causen o puedan causar riesgos o daños a la salud y para el desarrollo de investigación permanente y sistemática de los riesgos y daños que propicie la contaminación a la población. El límite establecido por la norma es el siguiente:

- **Promedio móvil de 8 horas una vez al año:** las concentraciones de CO no deben rebasar el valor permisible de **9.0 ppm** o su equivalente de **10,000 µg/mt**.
- **Promedio horario:** el límite máximo permisible por la norma es de **26.0 ppm** y su equivalente es de **30, 000 µg/mt**.

4.2.3.2.3 Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019 SO₂

La NOM-022-SSA1-2019, tiene por objetivo establecer los límites permisibles de la concentración de bióxido de azufre SO₂, en el aire ambiente y es de carácter obligatorio para todo el territorio mexicano (Secretaría de Salud, 2019).

De acuerdo con lo dispuesto por la Secretaría de Salud (2019), los límites máximos permisibles se enlistan a continuación:

- a) **Promedio 24 horas:** no debe rebasar el límite máximo normado de **0.04 ppm** o **104.8 µg/mt**
- b) **1 hora:** no debe rebasar el límite máximo normado de **0.075 ppm** o **196.5 µg/mt**.

4.2.3.2.4 Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021 NO₂

La Secretaría de Salud, (2021c), en esta norma determino el valor permisible para la concentración de bióxido de nitrógeno NO₂ en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población, esta norma es aplicable en todo el territorio nacional, así el límite máximo permisible es el siguiente:

- **Dato horario:** las concentraciones de bióxido de nitrógeno no deben de rebasar el límite máximo permisible de **0.106 ppm** o **200 µg/mt**, como protección a la salud de la población susceptible.

4.2.3.2.5 Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 PM_{2.5} y PM₁₀

Esta norma establece los valores límite permisible de concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente (Tabla 4.7), con el objetivo de proteger la salud de la población. Es una norma obligatoria para todo el territorio nacional y para las autoridades federales y locales que vigilen y evalúen la calidad del aire (Secretaría de Salud, 2021d).

Tabla 4. 8 Límite máximo permisible de las partículas suspendidas

| Partículas suspendidas | Límite de 24 horas | Límite anual |
|------------------------|----------------------|----------------------|
| PM ₁₀ | 70 µg/m ³ | 36 µg/m ³ |
| PM _{2.5} | 41 µg/m ³ | 10 µg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia con base en (Secretaría de Salud, 2021d).

4.2.3.2.6 Límites máximos permisibles para Contaminantes Criterio en México

De acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas, en México estos son los límites máximos permisibles actuales para las concentraciones de Contaminantes Criterio (Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Límites máximos permisibles en México

| <i>Contaminante</i> | <i>Tiempo promedio</i> | <i>Límite máximo permisible ppm</i> | <i>Límite máximo permisible µg/m³</i> |
|--|------------------------|-------------------------------------|--|
| <i>Monóxido de carbono CO</i> | 1 hora | 26.0 | 176 |
| | 8 horas | 9.0 | 127 |
| <i>Bióxido de nitrógeno NO₂</i> | 1 hora | 0.106 | 200 |
| | Anual | 0.021 | 40 |
| <i>Ozono O₃</i> | 1 hora | 0.090 | 176 |
| | 8 horas | 0.065 | 127 |
| <i>Bióxido de azufre SO₂</i> | 1 hora | 0.075 | 196.5 |
| | 24 horas | 0.04 | 104.8 |
| <i>Material particulado PM_{2.5}</i> | 24 horas | | 41 |
| | Anual | | 10 |
| <i>Material particulado PM₁₀</i> | 24 horas | | 70 |
| | Anual | | 36 |

Fuente: Elaboración propia con base en (Secretaría de Salud, 2019, 2020a, 2020b, 2021b, 2021c, 2021a, 2021d).

4.3 Normatividad estatal

4.3.1 Código para la Biodiversidad del Estado de México (CBEM)

Se especifican las regulaciones para promover la conservación, preservación, rehabilitación, la remediación y el mejoramiento de los ecosistemas y del equilibrio ecológico, para prevenir daños a la salud, el deterioro a la biodiversidad y el fomento a la protección del medio ambiente (Tabla 4.8), (Código para la Biodiversidad del Estado de México, 2021).

Tabla 4. 9 Artículos en materia de contaminación atmosférica del CBEM

| |
|--|
| Título quinto de la protección al ambiente. Capítulo II: De la prevención y control de la contaminación |
| Artículo 2.140: Está prohibido la emisión de contaminantes a la atmósfera, con humos, polvos, gases y vapores que rebasen los límites máximos permisibles. |
| Artículo 2.141: Deberá regularse la emisión de contaminantes a la atmósfera que ocasionen desequilibrios a los ecosistemas. |
| Artículo 2.142: La calidad del aire debe ser satisfactoria en asentamientos humanos y la emisión de contaminantes por distintas fuentes deben ser controladas y reducidas. |
| Artículo 2.143: La Secretaría establecerá y aplicará medidas de prevención y control de la contaminación atmosférica y que puedan alterar al ambiente o daños a la salud. |
| Artículo 2.144: La Secretaría deberá establecer medidas preventivas, aplicación de normas e instalación de equipos para la prevención y control de la contaminación atmosférica. |
| Artículo 2.145: Las personas físicas y jurídicas que operen sistemas industriales, comerciales y agropecuarias que tengan fuentes emisoras deben instalar equipos de control de emisiones, mediciones periódicas de emisiones a la atmósfera y sujetarse a la verificación de la Secretaría. |
| Artículo 2.146: La prevención de la contaminación atmosférica deberá ser en colaboración con las autoridades municipales con medidas preventivas y correctivas, regular el establecimiento y operación de sistemas de verificación de emisiones de vehículos y promover el mejoramiento de los sistemas de transporte. |
| Artículo 2.147: Los propietarios de los vehículos automotores privados o de servicio público deberán realizar el mantenimiento de sus unidades y verificar periódicamente sus emisiones además de observar las medidas y restricciones establecidas. |
| Artículo 2.148: El ayuntamiento regulará las fuentes fijas y móviles de jurisdicción municipal: hornos y mecanismos de incineración de residuos de limpia, hornos crematorios, emisiones por pavimentación de calles, baños y balnearios, hoteles, restaurantes y panaderías, criaderos de ganado, talleres etc. |

Continuación Tabla 4.8 Artículos en materia de contaminación atmosférica del CBEM

| |
|--|
| Artículo 2.149: El ayuntamiento tiene como facultad de llevar a cabo acciones de prevención de contaminación atmosférica, aplicación de criterios ecológicos para la protección de la atmósfera, requerirán a los responsables de fuentes fijas al cumplimiento de límites máximos permisibles aplicando las Normas Oficiales Mexicanas. |
| Artículo 2.150: Las personas que quemen materiales a cielo abierto requieren permiso de la Secretaría. |
| Artículo 2.151: Las emisiones por fuentes naturales serán objetos de emergencia y contingencias ambientales establecido por la federación y el estado. |
| Artículo 2.152: Los propietarios de suelos erosionados o en proceso de erosión y desprovistos de vegetación en conjunto con las autoridades competentes ejecutarán las medidas de protección, remediación, recuperación o restauración para su preservación. |
| Artículo 2.197: Las autoridades declararán contingencia cuando una concentración de contaminantes pueda afectar la salud de la población. |
| Artículo 2.198: La declaración de las contingencias deberá darse a conocer por los medios de comunicación masiva. |

Fuente: Elaboración propia con base en el Código para la Biodiversidad del Estado de México (2021).

4.4 Diferencia entre los límites máximos permisibles

Acorde con los parámetros determinados a nivel internacional y nacional, los límites máximos permisibles establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas en México son distintos con respecto a los criterios establecidos por la OMS, EPA, y UE; (Tabla 4.9).

Tabla 4. 10 Comparación entre límites máximos permisibles de contaminantes criterio

| Contaminante | Tiempo promedio | México | OMS | EPA | UE |
|--|-----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Monóxido de carbono CO | 24 horas | | 4 µg/m ³ | | |
| | 8 horas | 9.0 ppm | | 9 ppm | 10 µg/m ³ |
| | 1 hora | 26.0 ppm | | 35 ppm | |
| Bióxido de nitrógeno NO₂ | 1 año | 0.021 ppm | 10 µg/m ³ | 53 ppb | 40 µg/m ³ |
| | 24 horas | | 25 µg/m ³ | | |
| | 1 hora | 0.106 ppm | | 100 ppb | 200 µg/m ³ |
| Ozono O₃ | Temporada alta ⁴ | | 60 µg/m ³ | | |
| | 8 horas | 0.065 ppm | 100 µg/m ³ | 0.070 ppm | 120 µg/m ³ |
| | 1 hora | 0.090 ppm | | | |
| Bióxido de azufre SO₂ | 24 horas | 0.04 ppm | 40 µg/m ³ | 75 ppb | 125 µg/m ³ |
| | 1 hora | 0.075 ppm | | | 350 µg/m ³ |
| Material particulado PM_{2.5} | 1 año | 10 µg/m ³ | 5 µg/m ³ | 15 µg/m ³ | 25 µg/m ³ |
| | 24 horas | 41 µg/m ³ | 15 µg/m ³ | 35 µg/m ³ | |
| Material particulado PM₁₀ | 1 año | 36 µg/m ³ | 15 µg/m ³ | | 40 µg/m ³ |
| | 24 horas | 70 µg/m ³ | 45 µg/m ³ | 150 µg/m ³ | 125 µg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia con base en (European Comission, 2021; EPA, 2021c; Secretaría de Salud, 2019, 2020a, 2020b, 2021b, 2021c, 2021a, 2021d) y WHO, 2021).

⁴ Promedio de la concentración media de O₃ máxima diaria de 8 horas en seis meses consecutivos con la concentración de O₃ promedio móvil más alta de seis meses.

Epílogo

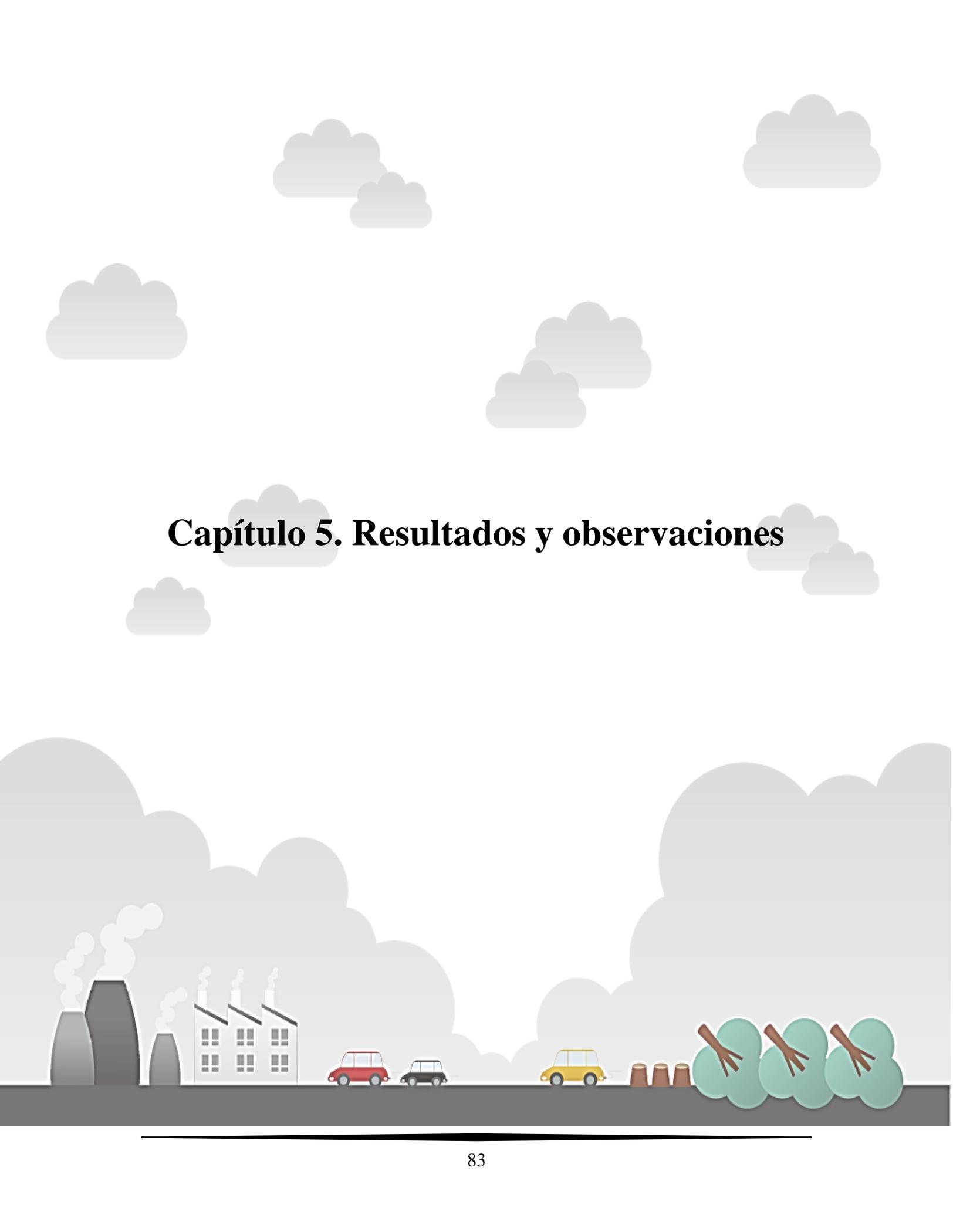
Debido a las consecuencias generadas en el ambiente y en la salud de la población se han generado diversos instrumentos jurídicos en los que se busca regular la contaminación atmosférica, reducir las emisiones de los contaminantes y con ello proteger principalmente a los pobladores, la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2021 actualizó la guía de las directrices en materia de calidad del aire después de 16 años ya que su versión anterior era del año 2005.

Es decir que los parámetros que establecían los límites máximos permisibles no se habían actualizado en más de una década a pesar de que cientos de países se encontraban y se encuentran en desarrollo generando año con año grandes cantidades de Contaminantes Criterio, y si bien estos fueron renovados en 2021, es necesario que sean actualizados cada cierto tiempo para que estos sean cada vez más estrictos y poder asegurar la protección a la salud de la población.

A nivel nacional a través de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) se regula en México el monitoreo de la calidad del aire y si bien en esta ley se establecen los aspectos generales es necesario que tanto las autoridades gubernamentales como el sector privado que emite los contaminantes trabajen en conjunto para el cumplimiento de esta ley y con ello buscar reducir las emisiones de contaminantes, ya que además de ser una problemática de carácter ambiental también lo es en el ámbito social y por supuesto económico.

En cuanto a las Normas Oficiales Mexicanas(NOM) estas han establecido uno de los índices más importantes para medir el estado de la calidad del aire, el cual es el Índice Aire y Salud generado en 2019 y que además de evidenciar el estado de contaminación en una escala de colores es novedoso ya que considera a la posible población que se encuentra en mayor riesgo de sufrir daños a la salud (grupos sensibles) y las actividades que puede realizar cada persona dependiendo si se encuentra en la categoría de grupo sensible o población en general, es un índice más completo y que permite a la población entender mejor sobre la contaminación atmosférica en comparación con el IMECA.

Las NOM sobre Contaminantes Criterio de igual manera fueron actualizadas de 2019 en adelante, ya que algunas de ellas tenían casi 30 años sin ser renovadas entre ellas las que regulaban el bióxido de nitrógeno NO₂ y monóxido de carbono CO, y si bien los nuevos límites permisibles son más rigurosos las altas emisiones a la atmósfera continúan.

The background features a stylized landscape illustration. At the top, several light gray, fluffy clouds are scattered across the white sky. The bottom portion of the image shows a dark gray ground line. On the left, there are industrial elements: two tall, dark gray smokestacks emitting white smoke, and a white factory building with several windows and chimneys. In the center, three small cars are shown: a red one, a black one, and a yellow one. To the right of the cars are three brown tree stumps and three green, rounded bushes with brown trunks. The overall style is simple and illustrative.

Capítulo 5. Resultados y observaciones

En el presente capítulo se muestra el alcance de medición de las estaciones de monitoreo en los años 2018 y 2021, con la finalidad de comparar este alcance ya que en el 2018 solo se contaba con 6 estaciones y para el 2021 ya se añadieron dos estaciones más dentro de la ZMVT.

También con los datos generados por la RAMA, se presentan las concentraciones de Contaminantes Criterio, en un **promedio de 24 horas del día 15** de los meses más representativos de cada estación del año, **enero (invierno), abril (primavera), julio (verano) y octubre (otoño)**, los cuales se consideraron para analizar las concentraciones mensuales, posteriormente **por cada año** del 2018 a 2021 se realizó una gráfica por estaciones del año (**primavera, verano, otoño e invierno**), finalmente se retomaron los niveles de los Contaminantes Criterio en conjunto con los datos de dirección y velocidad del viento, los cuales fueron representados con la misma temporalidad que los contaminantes pero con rosas del viento, para observar cómo influye en la dispersión de estos.

5.1 Alcance de medición de las estaciones de monitoreo

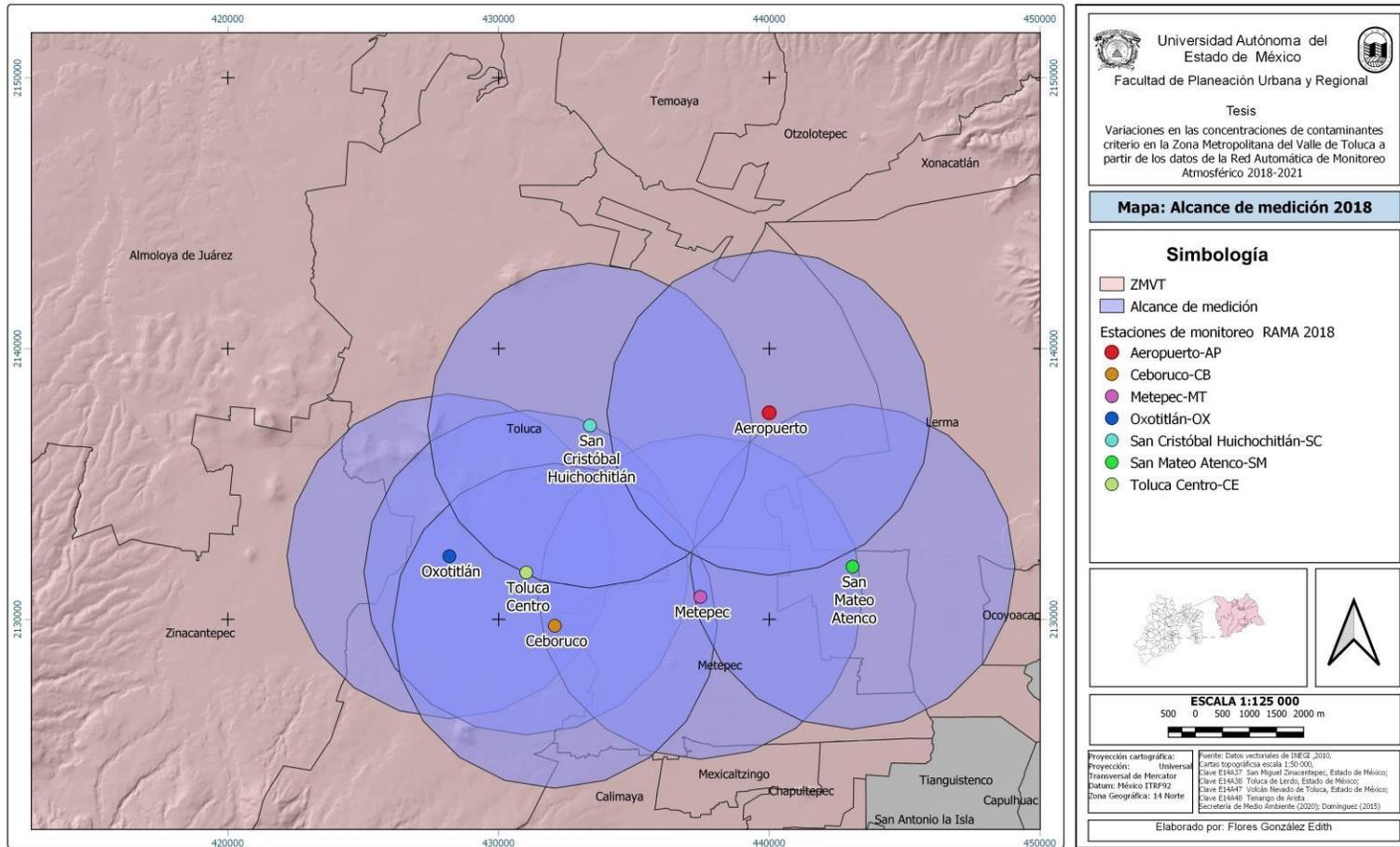
De acuerdo con Domínguez (2015), las estaciones de monitoreo tienen un alcance de medición de máximo 5 km, como se observa en el siguiente mapa algunas estaciones pueden abarcar más allá de su municipio y en otros casos este alcance se superpone.

En el mapa: de la Figura 5.1, se puede observar que las 7 estaciones que se encontraban en funcionamiento solo cubrían la parte centro y este de la ZMVT, cubriendo parte de los municipios de Toluca, Zinacantepec, Metepec y Lerma, y por su tamaño la estación de San Mateo Atenco cubre en su totalidad al municipio.

Por otro lado, en el mapa de la Figura 5.2, se cuentan con 8 estaciones y su radio de medición cubre parte de los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Temoaya, Xonacatlán, Otzolotepec, Calimaya, Metepec y Toluca.

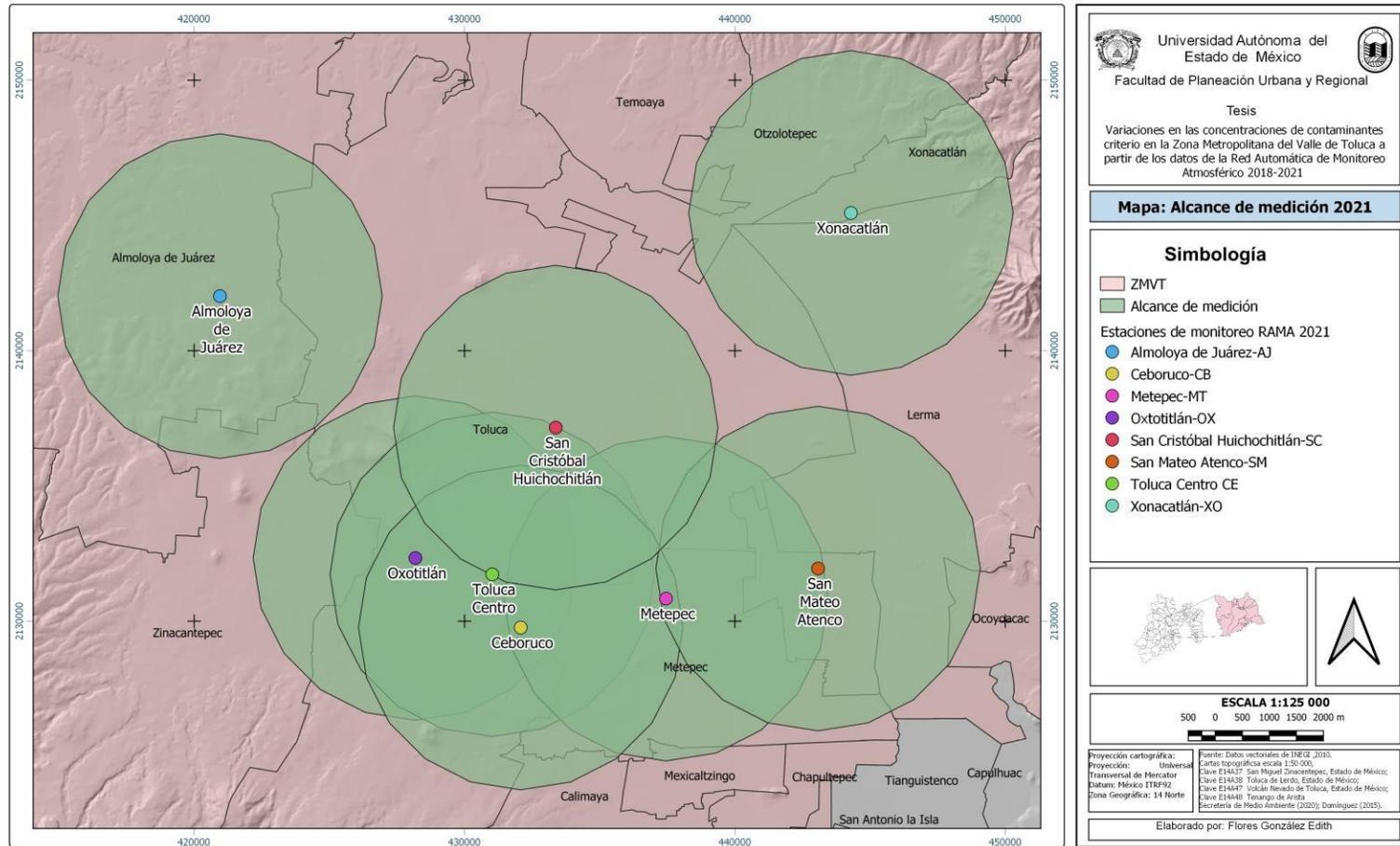
El radio de medición en ambos mapas mostrados en la Figura 5.1 y Figura 5.2, en el caso de Toluca solo cubren la parte centro de este municipio a pesar de que cuenta con 4 estaciones dentro del municipio, además de que la estación de Metepec también tiene alcance de medición en Toluca.

Figura 5. 1 Mapa de alcance de medición de las estaciones de monitoreo 2018



Fuente: elaboración propia con base en (Domínguez, 2015; INEGI, 2010; Secretaría del Medio Ambiente, 2020b)

Figura 5. 2 Mapa de alcance de medición de las estaciones de monitoreo 2021



Fuente: elaboración propia con base en (Domínguez, 2015; INEGI, 2010; Secretaría del Medio Ambiente, 2020b)

5.2 Concentraciones de los Contaminantes Criterio en la ZMVT 2018-2021

La RAMA, registra las concentraciones cada contaminante por hora los 365 días del año en ppm (partes por millón) o $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgramo por metro cubico)⁵, sin embargo, en algunos días se puede observar que algunos días no contaban con datos, esto puede atribuirse al mantenimiento que se les brinda a los equipos de medición de cada estación de monitoreo atmosférico.

Con los datos generados se elaboraron tres tipos de gráficas en las cuales se representan las concentraciones de los Contaminantes Criterio del año 2018 a 2021 con seis y ocho estaciones de monitoreo atmosférico (EMA) respectivamente.

- El primer tipo de gráfica es de barras debido a que se representa el promedio **por día** de cada mes estudiado, es decir el 15 de enero, abril y julio por cada EMA (estación de monitoreo atmosférico) y poder observar las diferentes concentraciones del mismo día en cada mes.
- El segundo son las concentraciones promedio **por mes** de cada Contaminante Criterio y se encuentran representados por líneas para que se logre observar la variabilidad entre las concentraciones promedio que reporta cada estación de monitoreo atmosférico a lo largo del mes en los diferentes años estudiados.
- El tercero es de igual manera en barras para observar el promedio **por año** de cada contaminante por estación del año y conocer en cuál de estas los niveles de contaminación son menores o mayores por cada estación de monitoreo atmosférico.

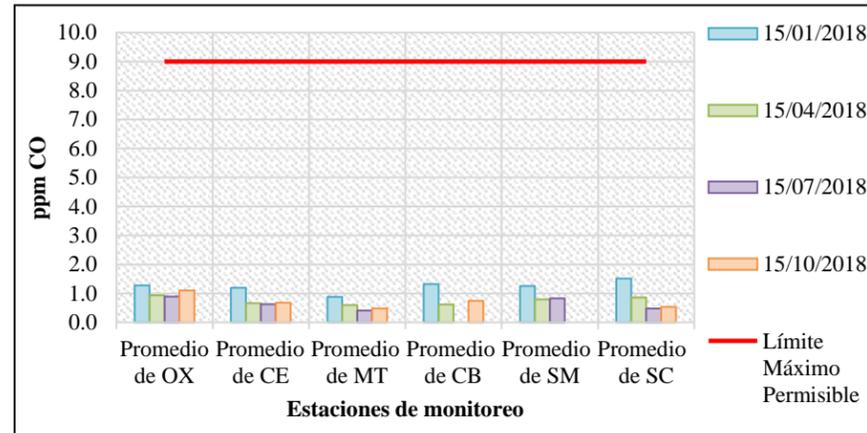
De igual manera en cada una de estas gráficas se colocó una línea roja que representa el Límite Máximo Permisible (LMP) que están establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas y que varía dependiendo el contaminante.

⁵ Sus equivalencias y significado se muestran en el glosario al inicio del presente trabajo

5.2.1 Concentraciones de monóxido de carbono CO 2018-2021

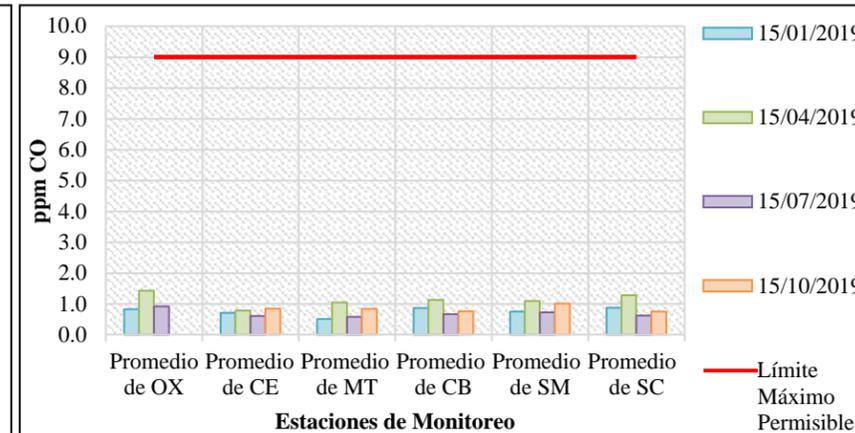
5.2.1.1 Concentraciones por día de monóxido de carbono CO

Gráfica 5.2.1. 1 Promedio por día de CO por EMA 2018



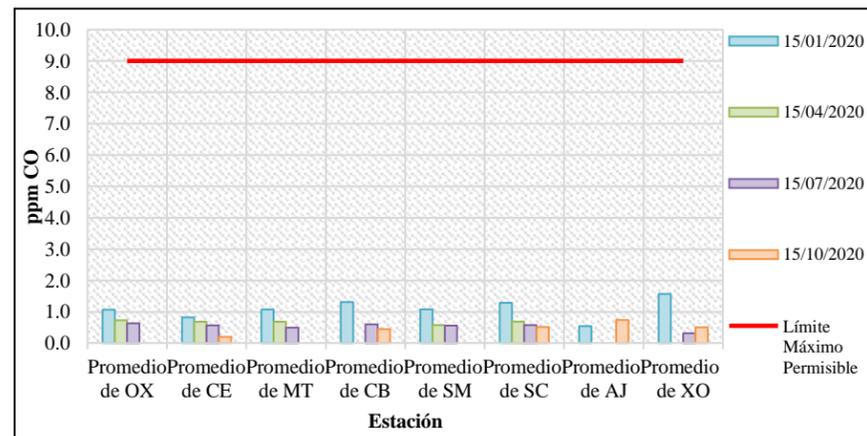
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018e).

Gráfica 5.2.1. 2 Promedio por día de CO por EMA 2019



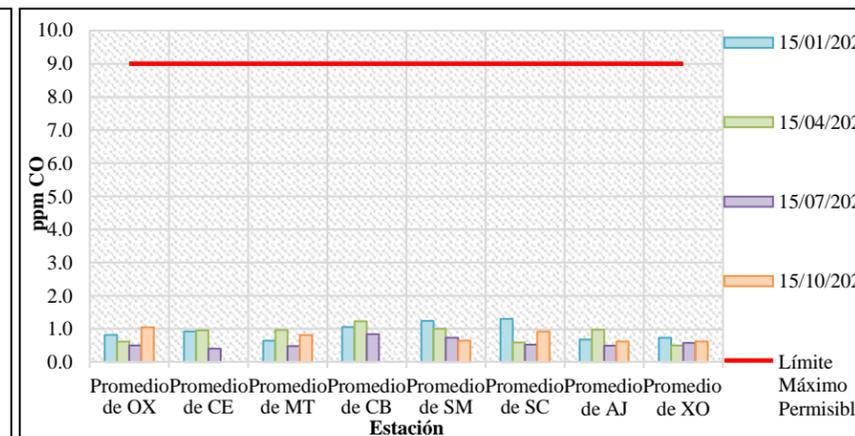
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019e).

Gráfica 5.2.1. 3 Promedio por día de CO por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020e).

Gráfica 5.2.1. 4 Promedio por día de CO por EMA 2021



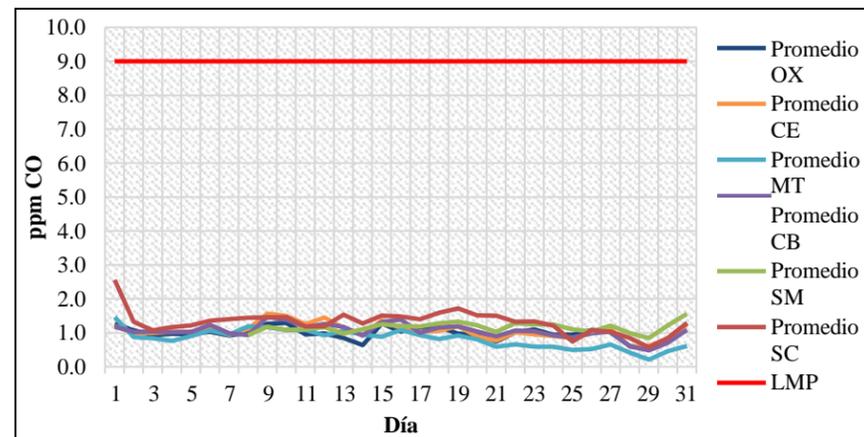
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021e).

Acorde con las concentraciones de monóxido de carbono (CO) del día 15 de los meses de estudio, observa que en el 2018 (Gráfica 5.2.1.1) se muestra que los niveles del contaminante están entre los 0.4 y 1.5 ppm, siendo el 15 de enero los que tienen las concentraciones más altas y julio las más bajas, por otro lado, en el 2019 (Gráfica 5.2.1.2) en los días promediados hay una disminución y el máximo es de 1.4 ppm, durante abril en Oxtotitlán (OX).

En 2020 no todas las EMA registraron datos (Gráfica 5.2.1.3), sin embargo, de la misma manera que en enero de 2018 el contaminante está sobre 1.0 ppm, en 2021 (Gráfica 5.2.1.4) se presentó la misma situación del primer mes del año con un máximo de 1.3 en San Cristóbal (SC), aun así, en este año se presentaron de los niveles más bajos en conjunto con el 2020.

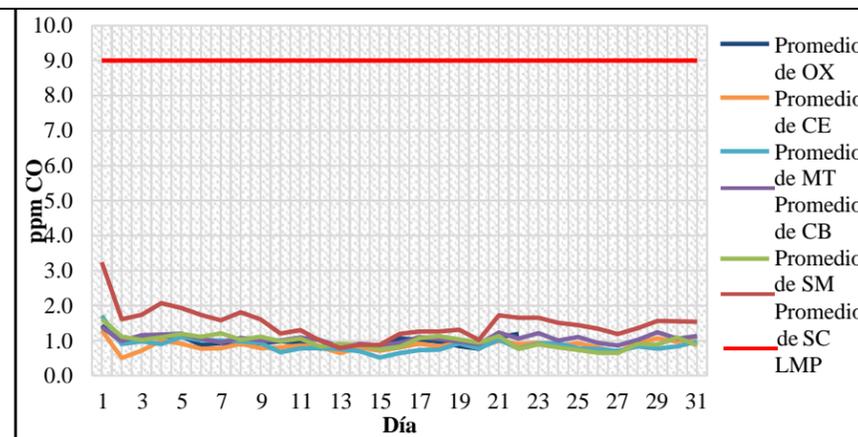
5.2.1.2 Concentraciones en enero de monóxido de carbono CO

Gráfica 5.2.1. 5 Promedio en enero de CO por EMA 2018



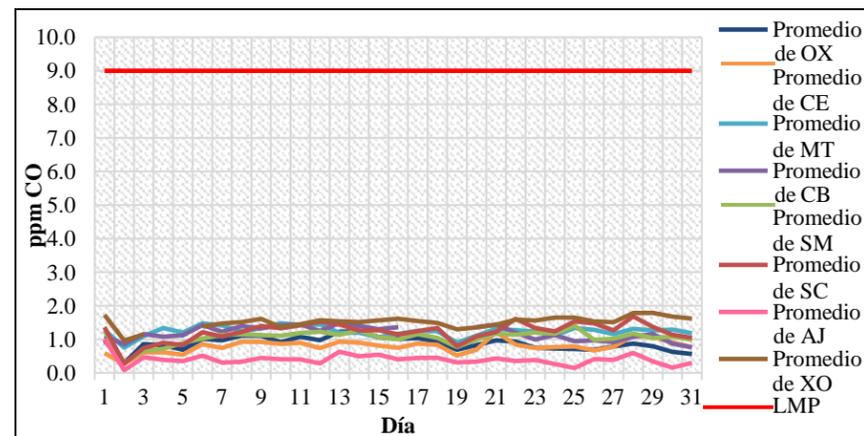
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018e).

Gráfica 5.2.1. 6 Promedio en enero de CO por EMA 2019



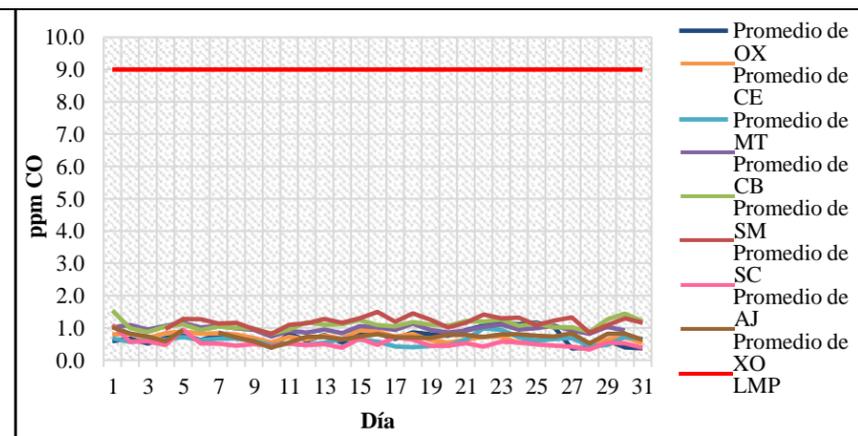
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019e).

Gráfica 5.2.1. 7 Promedio en enero de CO por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020e).

Gráfica 5.2.1.8 Promedio en enero de CO por EMA 2021



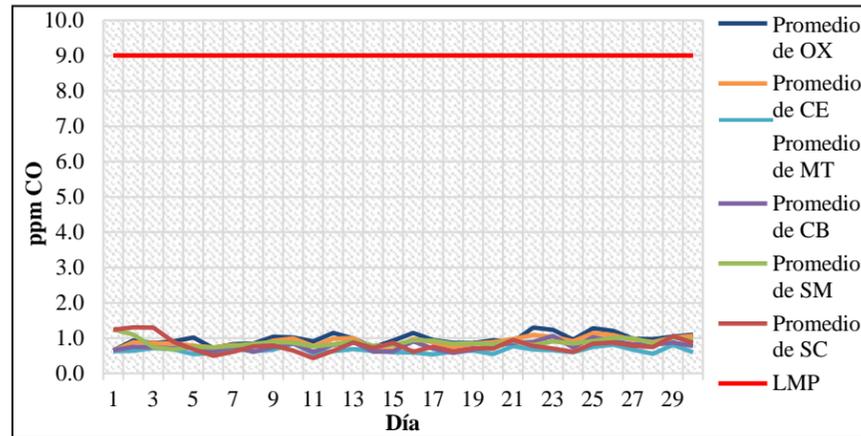
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021e).

En enero de 2018 San Cristóbal (SC) supero las 2 ppm en los primeros días del mes, y el resto se mantuvo sobre 1 ppm, y Metepec (MT) registró los niveles más bajos con respecto al resto de EMA, el resto de ellas se mantuvieron entre 1 y 1.5 ppm, para el día 30 todas presentaron un ligero aumento el cuál se puede observar en la Gráfica 5.2.1.5.

Enero de 2019 (Gráfica 5.2.1.6) San Cristóbal (SC) tuvo más de 3 ppm, y durante el resto del mes se redujeron los niveles de monóxido de carbono (CO), Centro (CE) por su parte fue la EMA que mostro solo 0.5 ppm. Durante enero del 2020, todas las estaciones se mantuvieron por debajo de 2 ppm de monóxido de carbono a excepción de la estación San Cristóbal, que reportó más del 1.5 ppm, la estación Almoloya de Juárez (AJ), fue la que durante la mayoría del mes se mantuvo por debajo de 1 ppm teniendo los registros más bajos con respecto a otras estaciones (Gráfica 5.2.1.7). De igual manera en 2021 las concentraciones del contaminante fueron bajas y ninguna estación rebasó el 1.5 ppm (Gráfica 5.2.1.8).

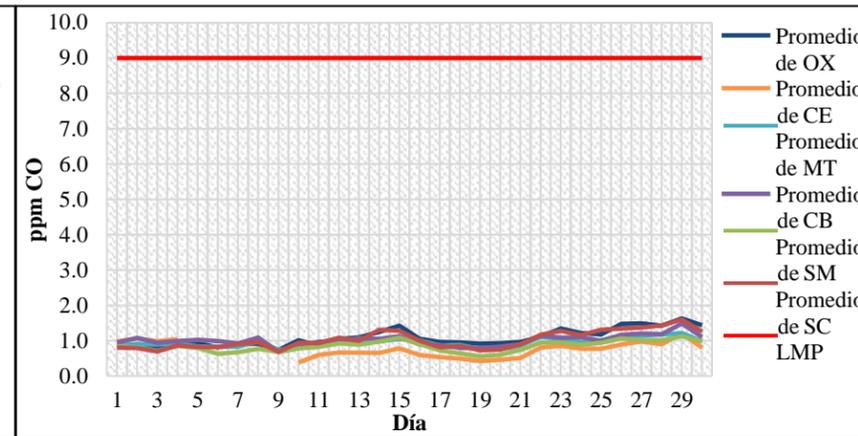
5.4.1.3 Concentraciones en abril de monóxido de carbono CO

Gráfica 5.2.1. 9 Promedio en abril de CO por EMA 2018



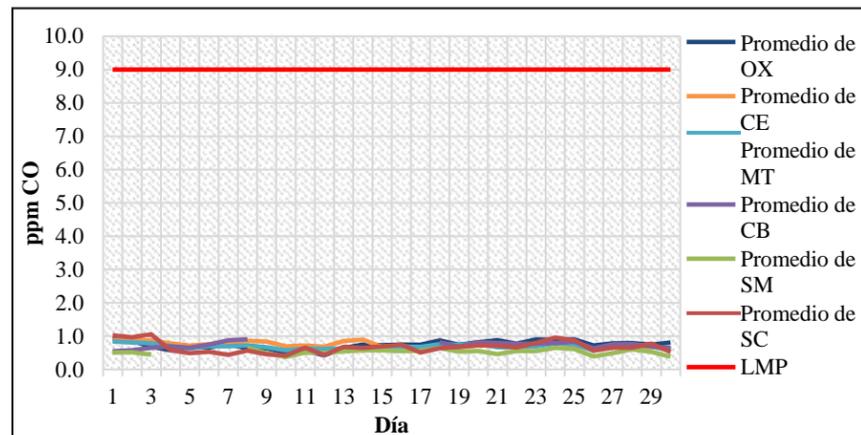
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018e).

Gráfica 5.2.1. 10 Promedio en abril de CO por EMA 2019



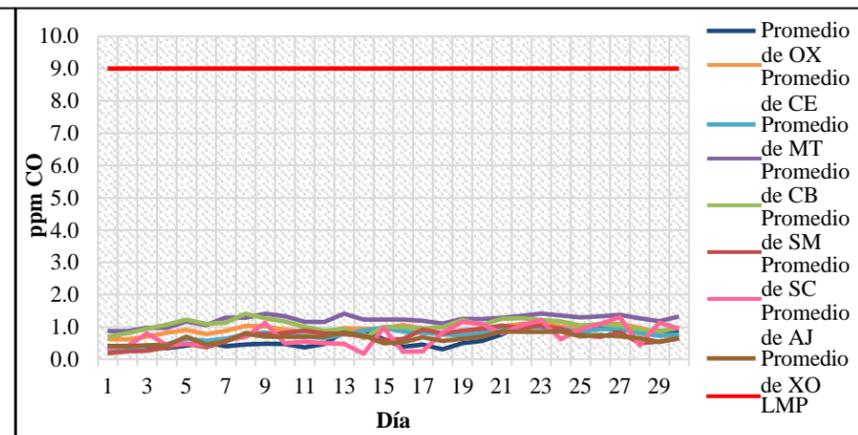
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019e).

Gráfica 5.2.1. 11 Promedio en abril de CO por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020e).

Gráfica 5.2.1. 12 Promedio en abril de CO por EMA 2021



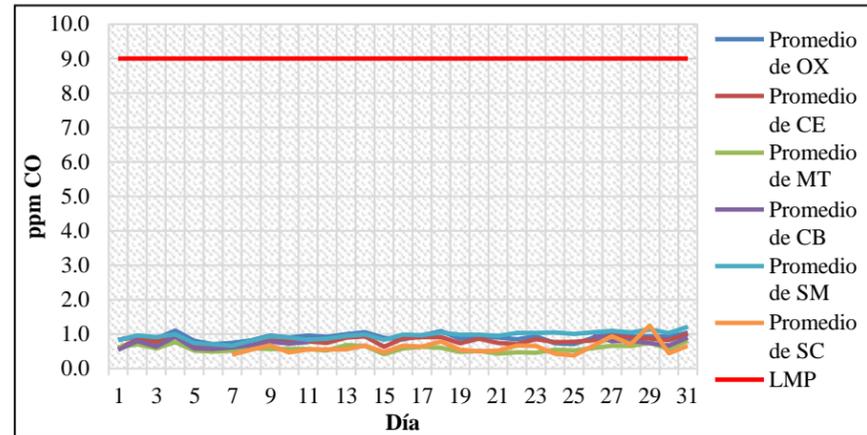
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021e).

En abril durante los cuatro años en ningún día se superaron 2 ppm, manteniéndose dentro del LMP, en donde en 2018 (Gráfica 5.2.1.9) se pudo observar que la estación de San Cristóbal (SC) tuvo más variaciones, pero se mantuvo entre 1.29 ppm y 0.43 ppm. En el 2019 (Gráfica 5.2.1.10) la estación Centro (CE) tiene datos vacíos ya que los primeros días del mes no registró las concentraciones del contaminante, aun así, a partir del día 10 mostró los niveles más bajos de monóxido de carbono (CO) a pesar de que el contaminante al final de mes en todas las EMA aumenta; en 2020 se ve una considerable disminución en varias de las estaciones como los es en San Mateo (SC) con 0.46 ppm aunque en varios días no reveló datos (Gráfica 5.2.1.11).

Finalmente, en 2021 (Gráfica 5.2.1.12) se observa que varias de las EMA conservó concentraciones constantes a excepción de Almoloya de Juárez (AJ) que se registró altas y bajas entre 0.16 y 1.15, en este año Ceboruco (CB) obtuvo los niveles más altos de CO con 1.4 ppm

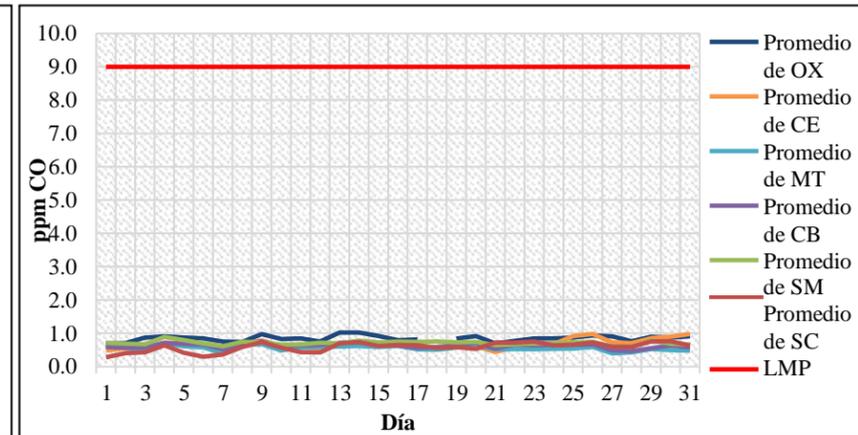
5.2.1.4 Concentraciones en julio de monóxido de carbono CO

Gráfica 5.2.1. 13 Promedio en julio de CO por EMA 2018



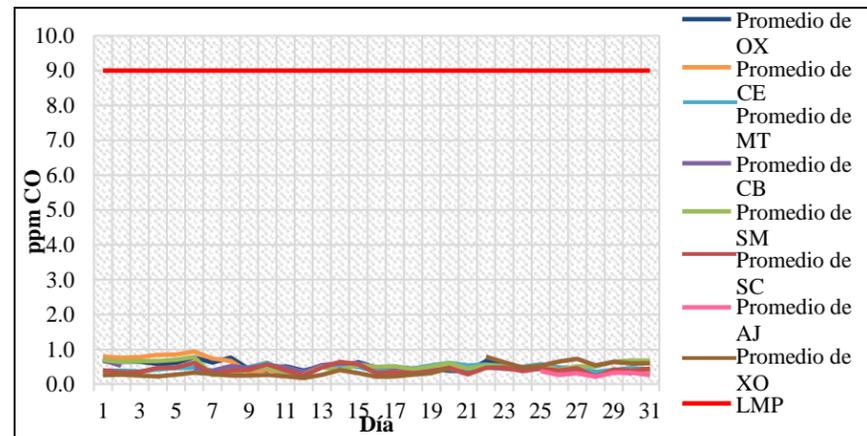
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018e).

Gráfica 5.2.1. 14 Promedio en julio de CO por EMA 2019



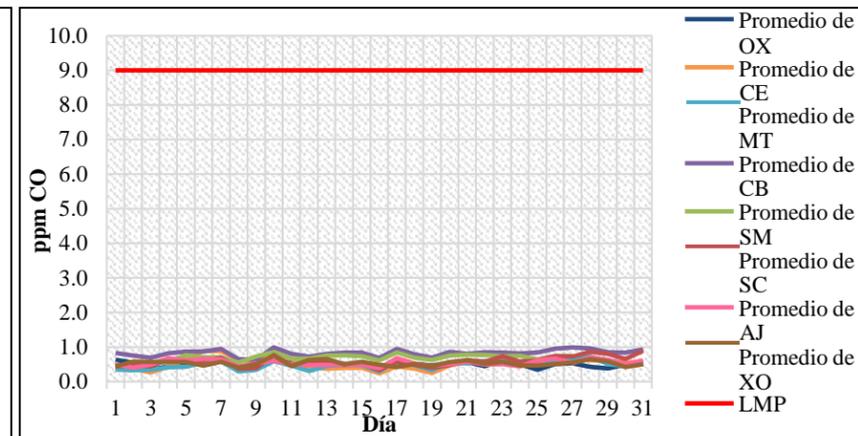
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019e).

Gráfica 5.2.1. 15 Promedio en julio de CO por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020e).

Gráfica 5.2.1. 16 Promedio en julio de CO por EMA 2021



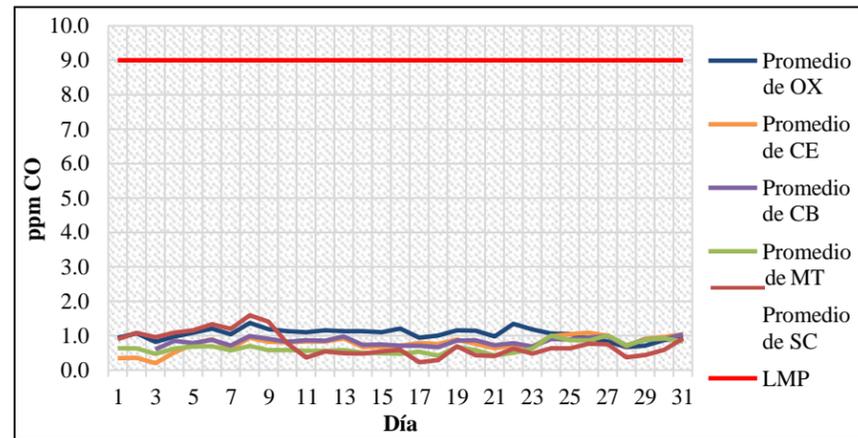
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021e).

En julio del 2018, de acuerdo con la Gráfica 5.2.1.13, en los primeros días del mes la estación San Cristóbal (SC) y la estación de San Mateo (SM) registraron sus concentraciones prácticamente iguales durante todo julio, la igual que en el mes de abril las concentraciones de monóxido de carbono (CO) se mantuvieron por debajo de las 2 ppm. En 2019 (Gráfica 5.2.1.14) San Cristóbal (SC) y Metepec (MT) conservaron los valores entre 0.28 y 0.74 ppm, los más bajos en esa temporada.

Para 2020, ninguna de las ocho EMA rebasó 1 ppm y Xonacatlán (XO) fue la que se mantuvo por debajo de las concentraciones del resto de estaciones (Gráfica 5.2.15), en 2021 sucedió algo similar y el monóxido de carbono (CO) se encontraba entre 0.4 y 0.6 ppm manteniéndose dentro del LMP (Gráfica 5.2.1.16).

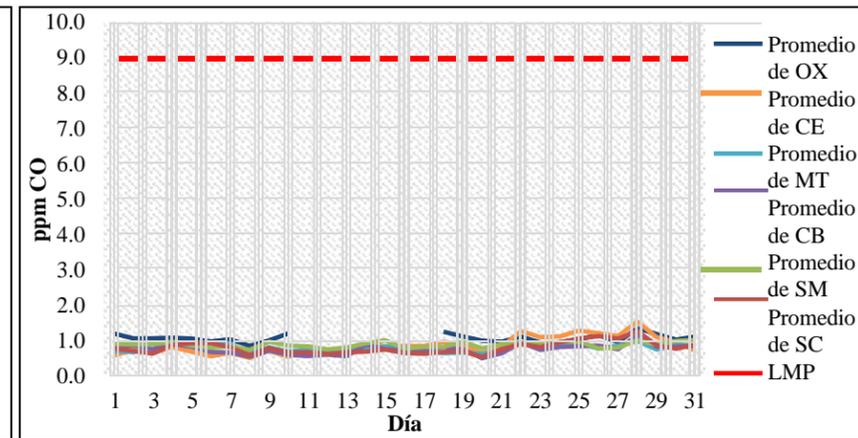
5.2.1.5 Concentraciones en octubre de monóxido de carbono CO

Gráfica 5.2.1. 17 Promedio anual de CO por EMA 2018



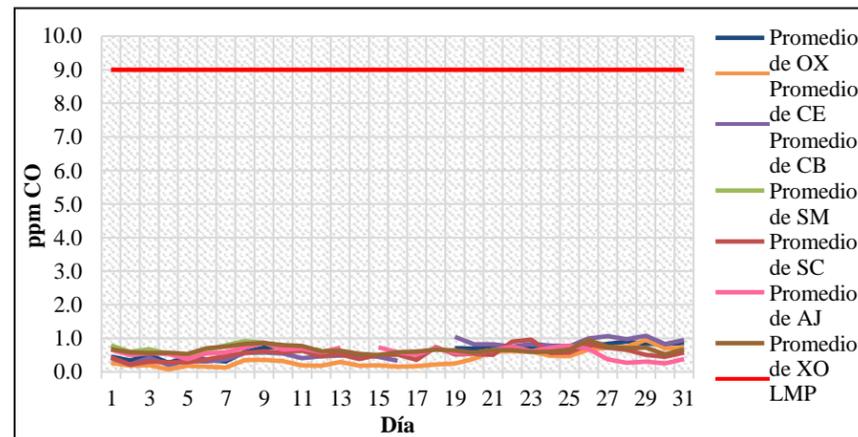
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018e).

Gráfica 5.2.1. 18 Promedio anual de CO por EMA 2019



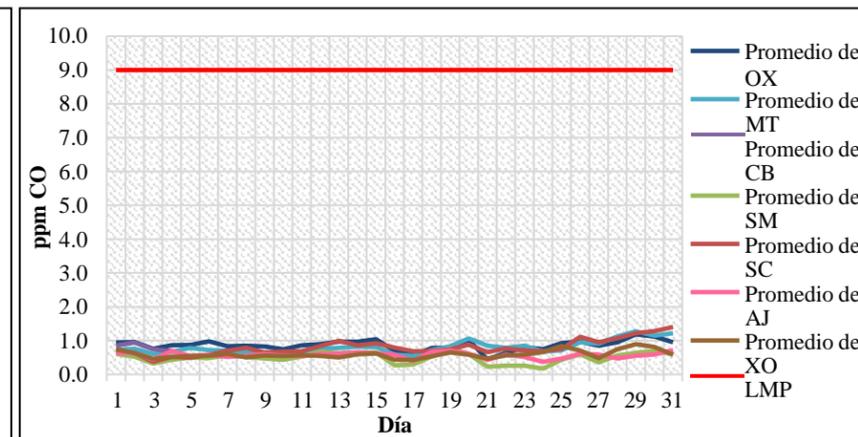
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019e).

Gráfica 5.2.1. 19 Promedio en octubre de CO por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020e).

Gráfica 5.2.1. 20 Promedio en octubre de CO por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021e).

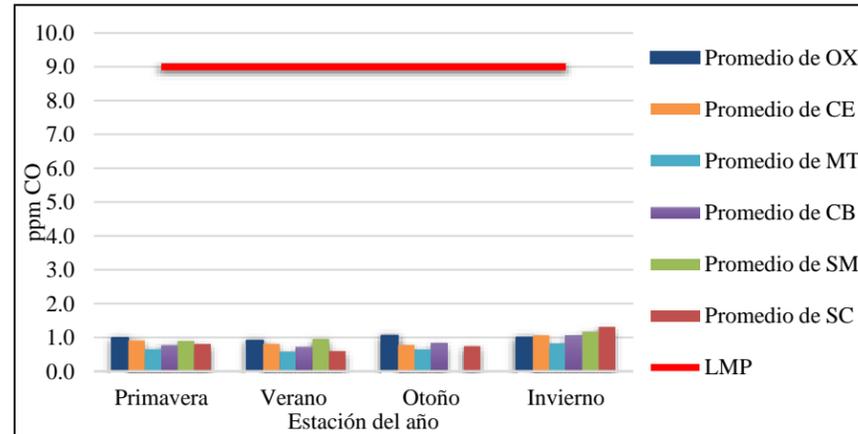
Durante el otoño específicamente en octubre solo 5 estaciones registraron datos, y las concentraciones fueron más elevadas que durante julio, en los primeros días del mes en especial la estación Oxtotitlán (OX) en el 2018 con 1.35 ppm en comparación con San Cristóbal (SC) con 0.23 ppm el más bajo durante el mes (Gráfica 5.2.1.17).

En octubre de 2019 varios días no mostraron datos como se puede ver en la Gráfica 5.2.1.18, a pesar de ello en la mayoría el monóxido de carbono (CO) estuvo entre 1.53 y 0.54 ppm, que comparado con julio de 2018 son más elevadas.

Para 2020 a pesar de que todas las EMA recabaron datos, hay vacíos en algunos días, Centro (CE) se muestra los niveles más bajos entre 0.12 y 0.72 ppm de acuerdo con la Gráfica 5.2.1.19. En 2021 (Gráfica 5.2.1.20) la mayoría de las estaciones se encontraban entre 0.5 y 1 ppm a pesar de que San Mateo (SM) presentó niveles bajos a final de mes todas las EMA tuvieron un aumento, aunque no fue significativo.

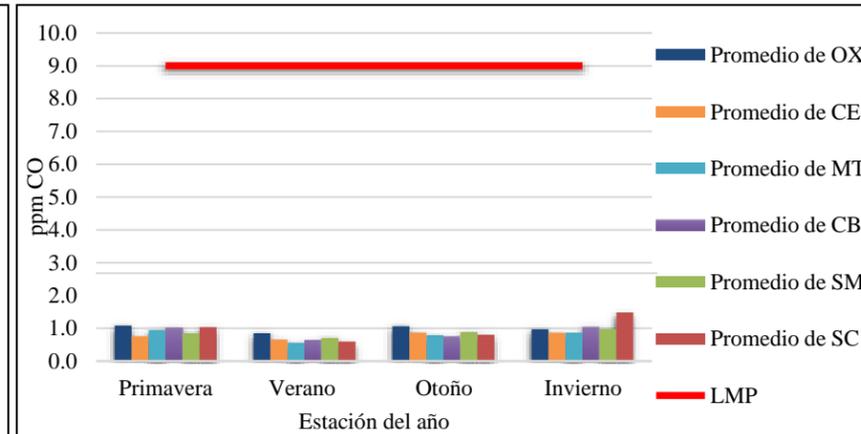
5.2.1.6 Concentraciones por estación del año de monóxido de carbono CO 2018-2021

Gráfica 5.2.1. 21 Promedio en octubre de CO por EMA 2018



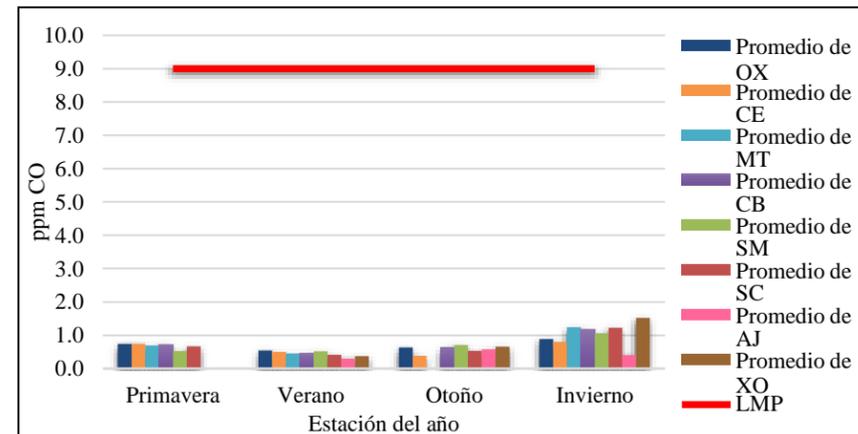
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018e).

Gráfica 5.2.1. 22 Promedio en octubre de CO por EMA 2019



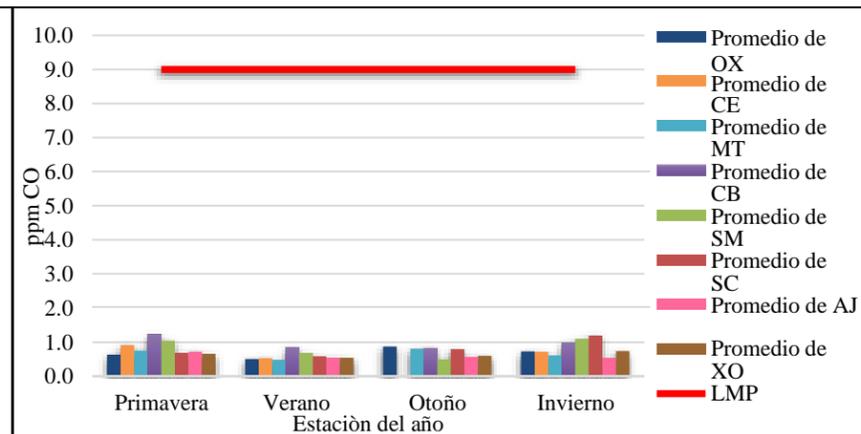
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019e).

Gráfica 5.2.1. 23 Promedio anual de CO por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020e).

Gráfica 5.2.1. 24 Promedio anual de CO por EMA 2021



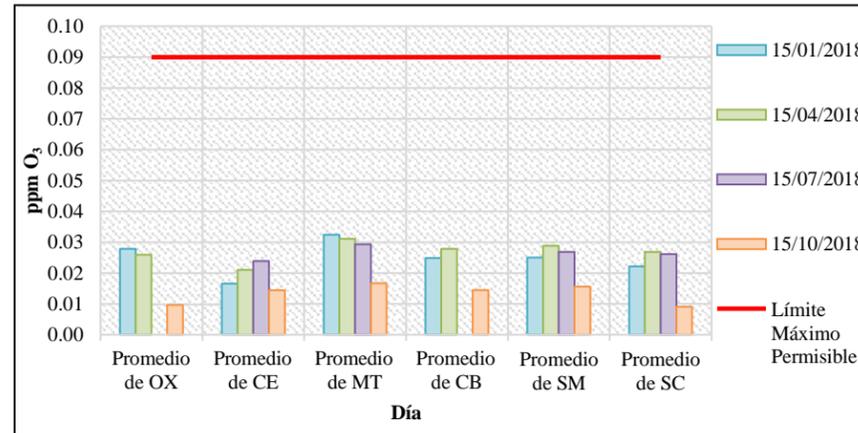
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021e).

Como se observa en las gráficas en ninguno de los meses y años observados se superaron los LMP, a pesar de ello en invierno se registran los niveles más elevados, siendo en verano y otoño los más bajos. Así en 2020 y 2021 los años con las concentraciones más bajas en comparación con los otros dos años.

5.2.2 Concentraciones de ozono O₃ 2018-2021

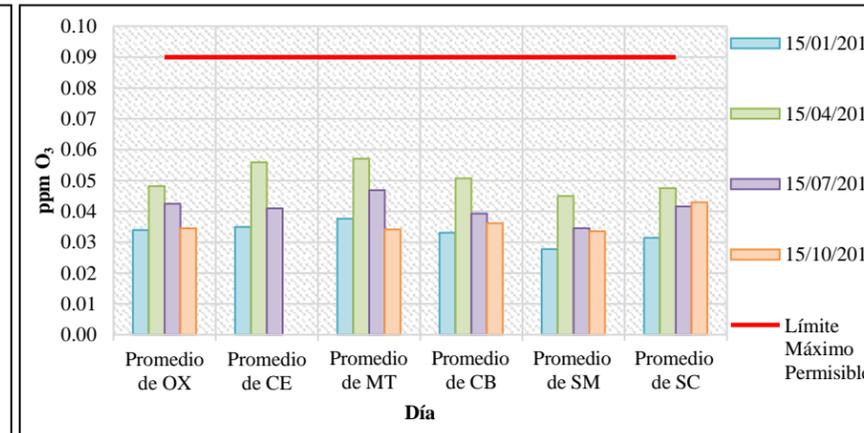
5.2.2.1 Concentraciones por día de ozono O₃

Gráfica 5.2.2. 1 Promedio por día de O₃ por EMA 2018



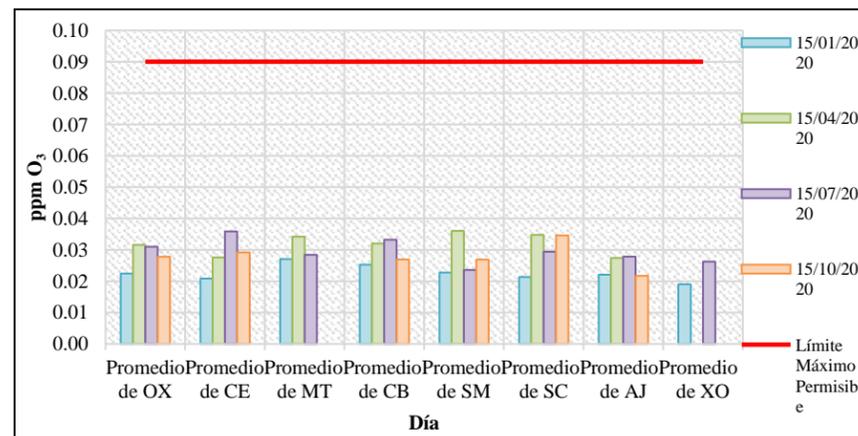
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018f).

Gráfica 5.2.2.2 Promedio por día de O₃ por EMA 2019



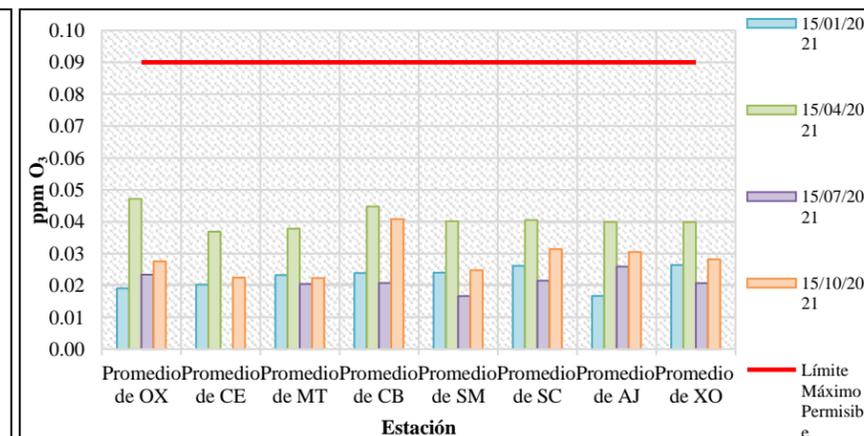
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Gráfica 5.2.2. 3 Promedio por día de O₃ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020f).

Gráfica 5.2.2. 4 Promedio por día de O₃ por EMA 2021



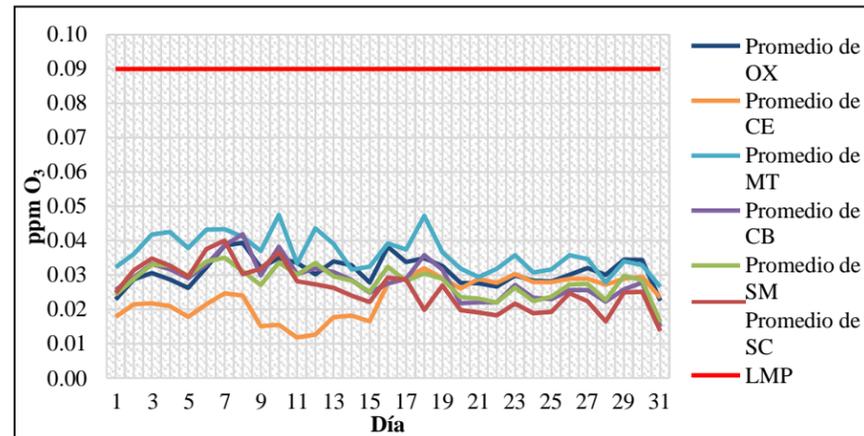
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021f).

El día 15 de los meses analizados en 2018 (Gráfica 5.2.2.1), en todas las EMA se encontraban de 0.01 a 0.03 ppm, así como en ninguna se rebaso el LMP, aun cuando en el 15 de julio dos estaciones no registraron datos, estas EMA fueron Oxtotitlán (OX) y Ceboruco (CB). En 2019 el ozono (O₃) aumento en el día 15 llegando hasta 0.057 ppm más de la mitad del LMP, y el mínimo se encontraba en 0.028 ppm (Gráfica 5.2.2.2). En 2020 es evidente una reducción en estas concentraciones pues no superaron las 0.036 ppm siendo el 15 de abril en todas las estaciones que muestran los niveles más altos, y Xonacatlán (XO) el que solo registrará dos fechas tal y como se observa en la Gráfica 5.2.2.3.

Durante 2021 (Gráfica 5.2.2.4) se puede observar un claro aumento de ozono (O₃) al igual que en 2020 el 15 de abril es el más alto con más de 0.04 ppm, y el mínimo fue de 0.019 en la estación Oxtotitlán (OX).

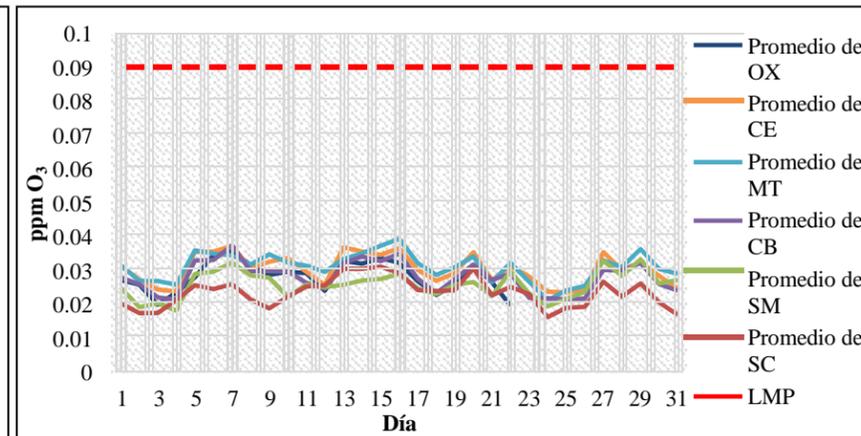
5.2.2.2 Concentraciones en enero de ozono O₃

Gráfica 5.2.2. 5 Promedio en enero de O₃ por EMA 2018



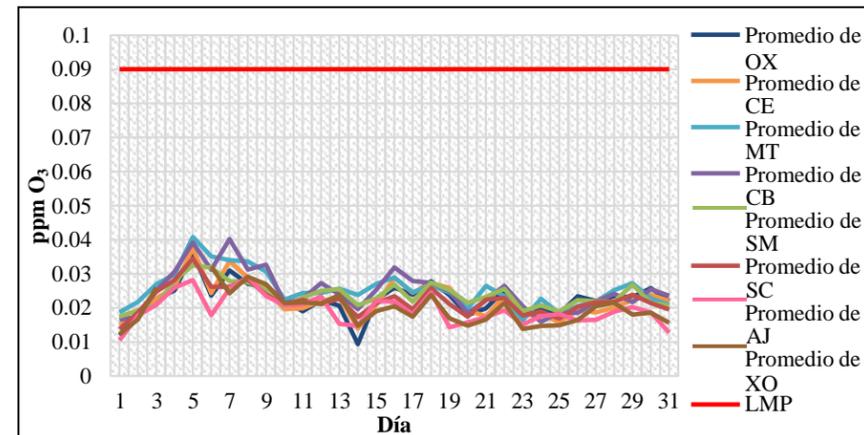
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018f).

Gráfica 5.2.2. 6 Promedio en enero de O₃ por EMA 2019



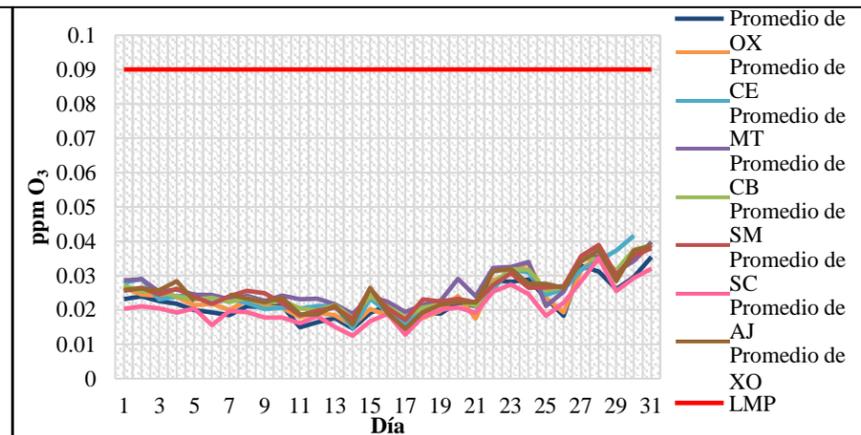
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Gráfica 5.2.2. 7 Promedio en enero de O₃ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020f).

Gráfica 5.2.2. 8 Promedio en enero de O₃ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021f).

En enero de 2018 (Gráfica 5.2.2.5) todas las estaciones presentaron datos manteniéndose dentro del LMP, aunque la estación de San Mateo (SM) fue la que registró las concentraciones más elevadas en el mes entre 0.03 y 0.05 ppm, por su parte Centro (CE) se encontraba por debajo de 0.02 ppm en los primeros días del mes, de la misma manera que San Cristóbal (SC) pero este último a fin de mes.

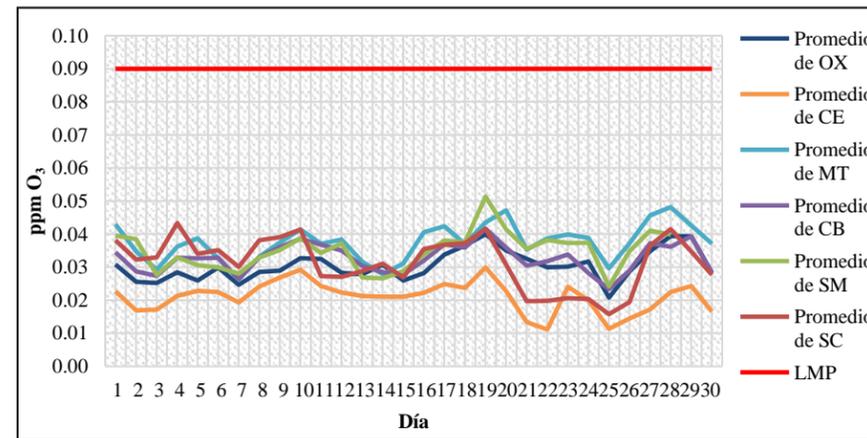
Durante enero de 2019 hubo variaciones en todos los días del mes y San Cristóbal (SC), nuevamente fue la EMA que tuvo los datos más bajos de O₃ de 0.019 a 0.03 ppm, Metepec (MT) registró 0.035 ppm el máximo en todo el mes (Gráfica 5.2.2.6).

En 2021 el nivel más alto de ozono (O₃) fue de 0.04 ppm un pico en el día 5 en donde la mayoría de las EMA mostraron una alza, sin embargo, el resto del mes, aunque con variaciones no sobrepasó las 0.03 ppm, (Gráfica 5.2.2.7).

Aunque en 2021 (Gráfica 5.2.2.8) los niveles de O₃ la mayoría del mes se mantienen por debajo de 0.03 ppm en los últimos días se puede observar un incremento registrado por todas las EMA, sobre todo en Metepec (MT) con 0.041 ppm.

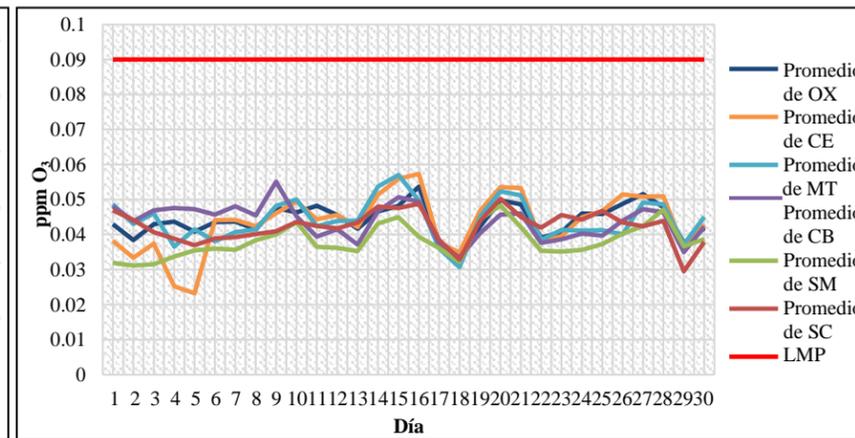
5.2.2.3 Concentraciones en abril de ozono O₃

Gráfica 5.2.2. 9 Promedio en abril de O₃ por EMA 2018



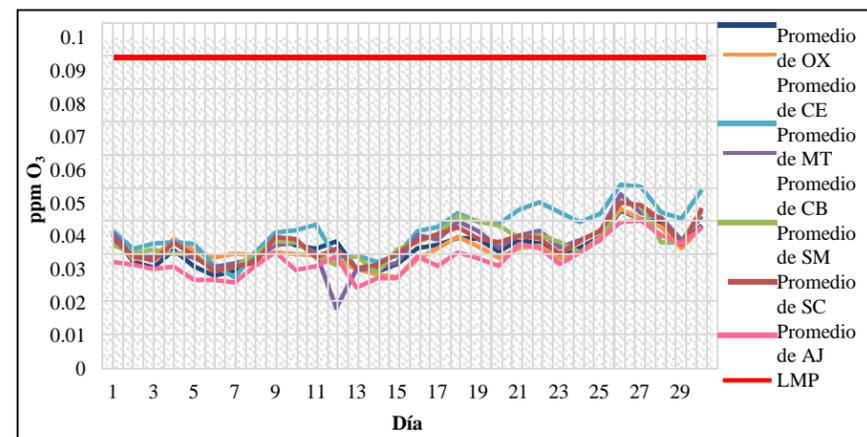
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018f).

Gráfica 5.2.2. 10 Promedio en abril de O₃ por EMA 2019



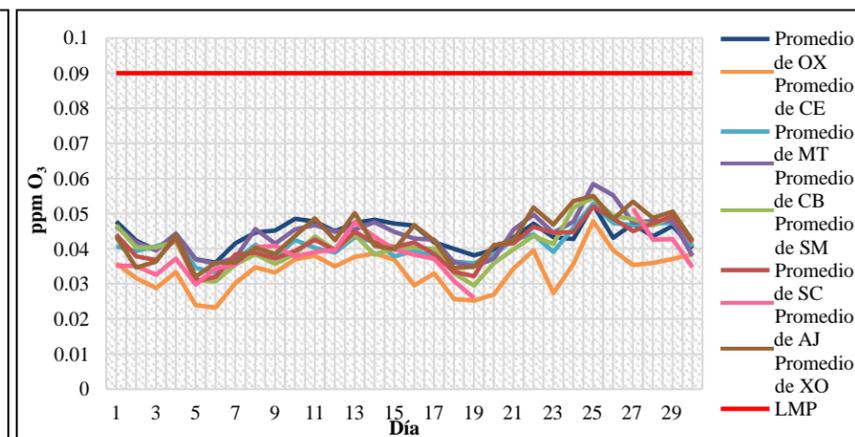
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Gráfica 5.2.2. 11 Promedio en abril de O₃ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020f).

Gráfica 5.2.2. 12 Promedio en abril de O₃ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021f).

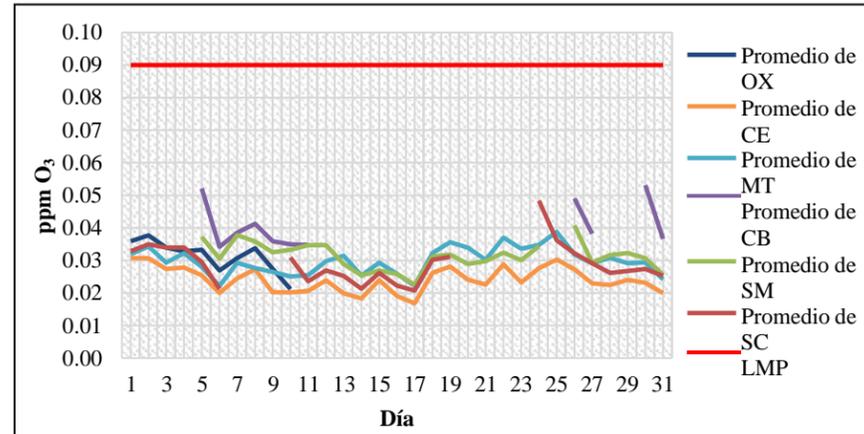
Durante abril de 2018, las concentraciones fueron más dispersas, la estación Centro (CE) presento las más bajas con 0.01 a 0.03 ppm mientras que San Mateo (SM) y Metepec (MT), las más altas superando 0.04 ppm, aunque se mantuvieron por debajo del LMP, en todo el mes y al final de este muestran una disminución (Gráfica 5.2.2.9).

También en 2019 se puede observar una gran variedad en los datos durante todo el mes (Gráfica 5.2.2.10), a mediados de abril se ve como hay un punto bajo en los niveles de ozono (O₃) de 0.03 ppm, el resto de los días el contaminante está por encima de 0.04 ppm superando a abril de 2018.

En comparación con enero de 2020 (Gráfica 5.2.2.11), en abril de este mismo año no hay una disminución en el ozono (O₃), hay un aumento considerable en el que se supera las 0.05 ppm por la estación de Metepec (MT), en 2021 el punto más alto de ozono (O₃) fue registrado por la EMA Ceboruco (CB), el resto del mes se presentaron concentraciones entre 0.026 y 0.05 ppm, tal como se muestra en la Gráfica 5.2.2.12).

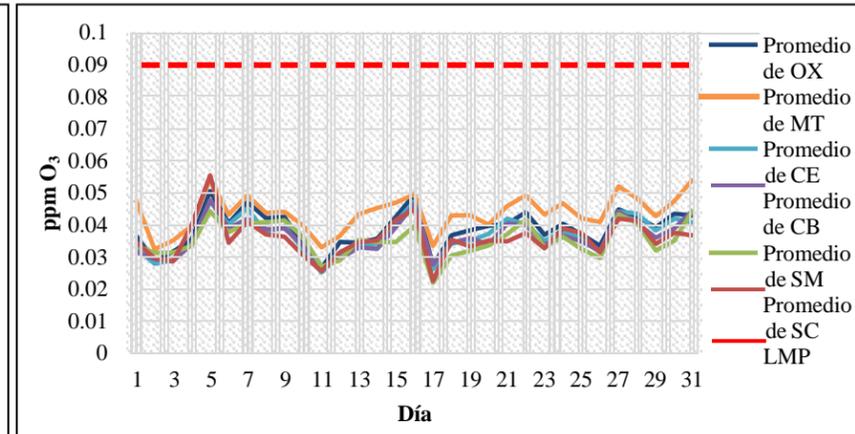
5.2.2.4 Concentraciones en julio de ozono O₃

Gráfica 5.2.2. 13 Promedio en julio de O₃ por EMA 2018



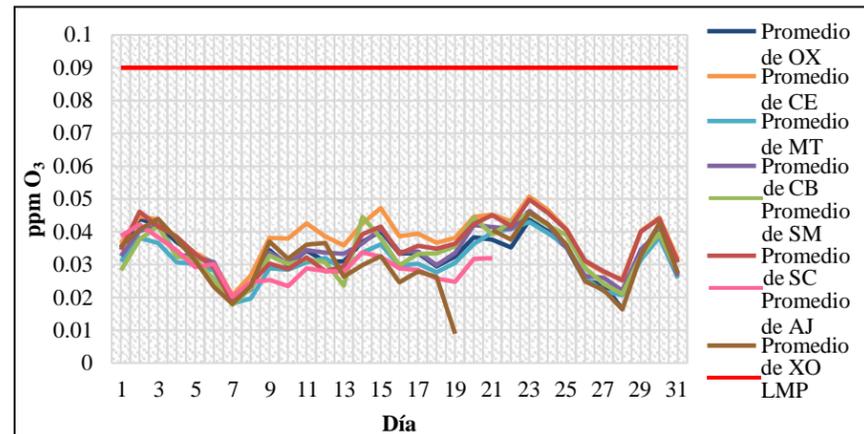
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018f).

Gráfica 5.2.2. 14 Promedio en julio de O₃ por EMA 2019



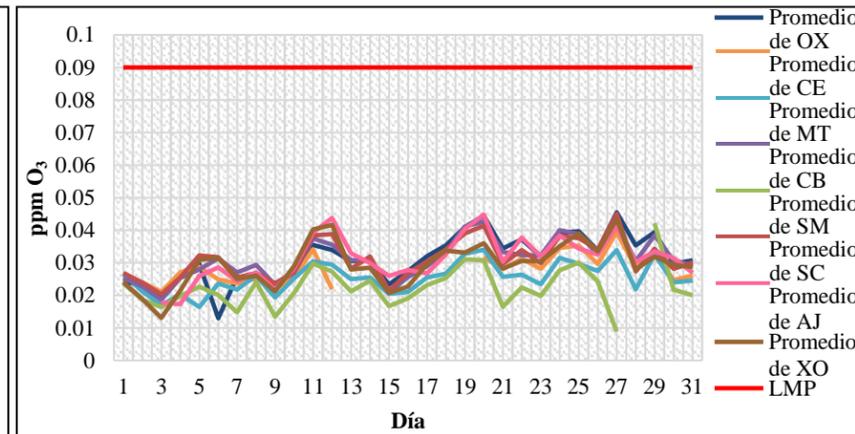
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Gráfica 5.2.2. 15 Promedio en julio de O₃ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020f).

Gráfica 5.2.2. 16 Promedio en julio de O₃ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021f).

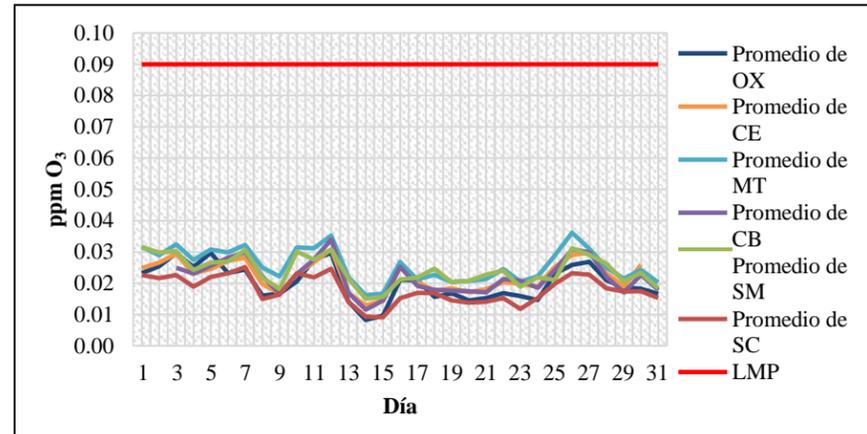
En julio 2018 la estación Ceboruco (CB), no registro datos en la mayoría de los días del mes (Gráfica 5.2.2.13), al igual que las estaciones Oxtotitlán (OX) San Cristóbal (SC) y San Mateo (SM), también se presentaron concentraciones por encima de los 0.05 ppm y la única EMA con un asentamiento constante de datos fue Centro (CE), la cual no superó los 0.03 ppm. Caso contrario en el 2019, pues esta última estación se mostró los niveles más altos de ozono (O₃) con 0.054 ppm, y aunque también existieron variaciones en este mes todas las estaciones rebasaron más de 0.02 ppm (Gráfica 5.2.2.14).

Xonacatlán (XO) en julio de 2020 a mitad de mes presento un descenso en las concentraciones de O₃ con 0.008 ppm el más bajo del mes (Gráfica 5.2.2.15), por otro lado, Centro (CE) y San Cristóbal (SC) englobaron niveles similares del contaminante en los últimos 10 días y así fueron los que superaron los 0.05 ppm de ozono (O₃).

Julio de 2021 mostró una leve reducción en los valores de O₃ pues estos no sobrepasaron los 0.05 ppm, en este caso San Mate (SM) fue la EMA que se encontró entre 0.007 ppm y 0.027 ppm lo más bajo durante el mes (Gráfica 5.2.2.16).

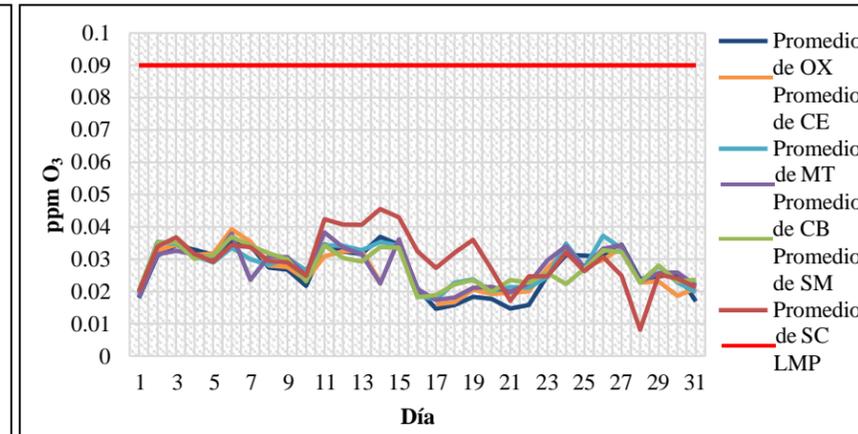
5.2.2.5 Concentraciones en octubre de ozono O₃

Gráfica 5.2.2. 17 Promedio en octubre de O₃ por EMA 2018



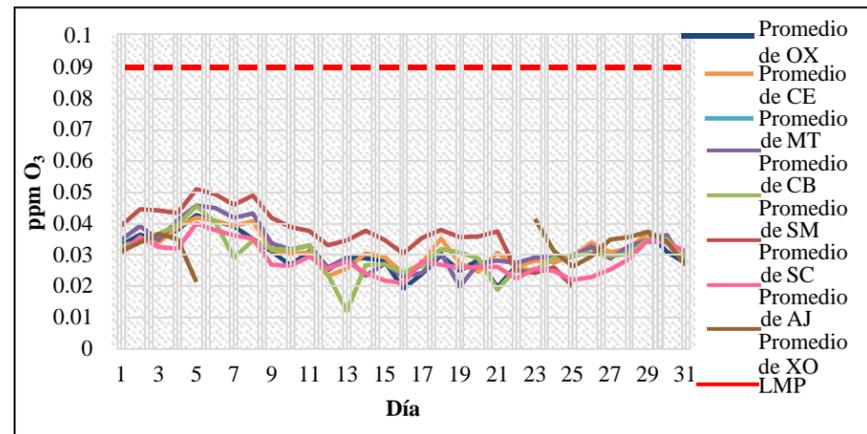
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018f).

Gráfica 5.2.2. 18 Promedio en octubre de O₃ por EMA 2019



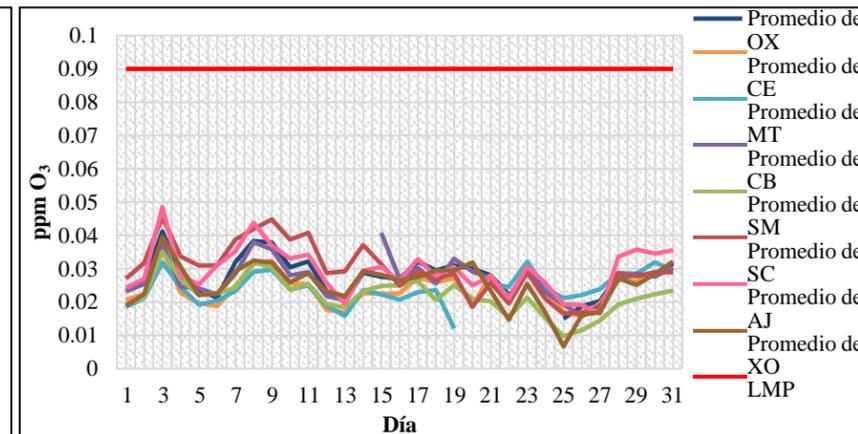
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Gráfica 5.2.2. 19 Promedio en octubre de O₃ por EMA 2019



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020f).

Gráfica 5.2.2. 20 Promedio en octubre de O₃ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021f).

De acuerdo con la Gráfica 5.2.2.17 los niveles de ozono (O₃) disminuyeron con respecto a los otros meses, así como una baja considerable de 13 al 15 de octubre de 2018, manteniéndose por debajo de 0.02 ppm, en todas las estaciones y un pico de más de 0.035 ppm en Metepec (MT) y uno a la baja con 0.012 ppm de San Cristóbal (SC).

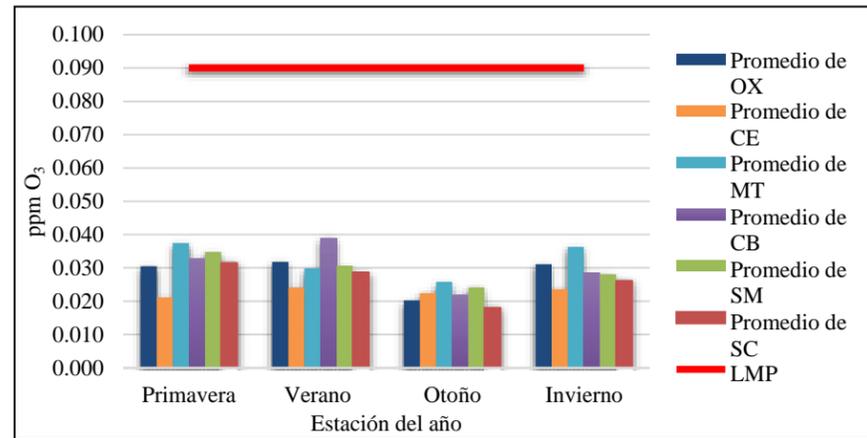
La variabilidad de octubre de 2019 es visible en todo el mes (Gráfica 5.2.2.18), por ejemplo, San Cristóbal (SC), muestra el punto más alto de ozono (O₃) con 0.045 ppm y también el más bajo 0.008 ppm, al final del mes el resto de las estaciones presenta una baja en las concentraciones del contaminante.

En octubre de 2020 varios días no presentan datos, como en la estación de Xonacatlán (XO), y de San Cristóbal (SC) que a pesar de ello tuvo los valores más altos de todo el mes, mientras que San Mateo (SM) los más bajos con 0.011 ppm (Gráfica 5.2.2.19).

Aunque al inicio octubre de 2021 se observa un punto alto con más de 0.04 ppm por las estaciones de Almoloya de Juárez (AJ) y San Cristóbal (SC) en la Gráfica 5.2.2.20, las concentraciones disminuyeron el resto del mes por debajo de 0.03 ppm, pero no todas las estaciones registraron datos como Ceboruco (CB), Metepec (MT) y Oxtotitlán (OX).

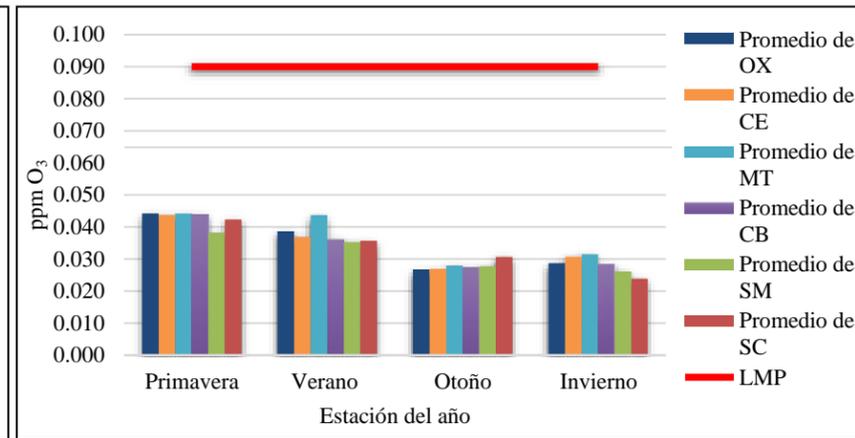
5.2.2.6 Concentraciones por estación del año de ozono O₃ 2018-2021

Gráfica 5.2.2. 21 Promedio anual de O₃ por EMA 2018



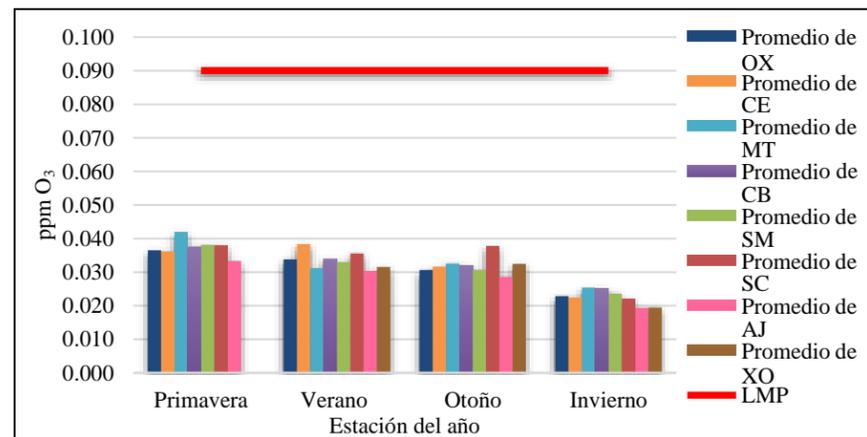
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018f).

Gráfica 5.2.2. 22 Promedio anual de O₃ por EMA 2019



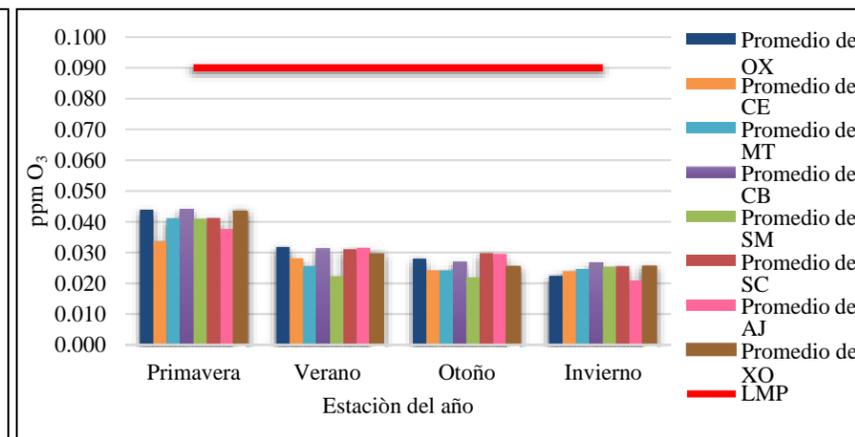
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Gráfica 5.2.2. 23 Promedio anual de O₃ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020f).

Gráfica 5.2.2. 24 Promedio anual de O₃ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021f).

En el 2018 se puede observar (Gráfica 5.2.2.21) que durante primavera, verano e invierno se presentaron las concentraciones más elevadas principalmente en Metepec (MT), Ceboruco (CB), San Cristóbal (SC) y San Mateo (SM), todas estas sobre los 0.03 ppm, en otoño los niveles de ozono (O₃) son menores con tan solo 0.018 ppm.

Para el 2019, se pudo observar en la Gráfica 5.2.2.22 que primavera y verano fueron las estaciones del año que registraron los datos más altos en la mayoría de las EMA pasando por más de 0.04 ppm sobre todo en Metepec (MT), por otro lado, en otoño e invierno las concentraciones se mantuvieron en o por debajo de 0.03 ppm.

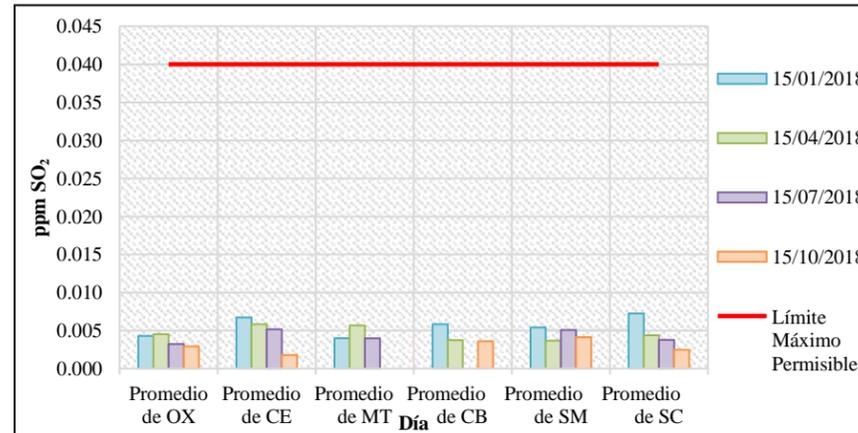
Primavera, verano, y otoño de 2020 tuvieron los datos más altos, aunque solo una estación tuvo más de 0.04 ppm (Metepec (MT)), el resto se encontraba entre 0.033 y 0.037 ppm, en invierno las estaciones se encontraban entre 0.019 y 0.025 ppm siendo Xonacatlán (XO) y Almoloya de Juárez (AJ), las EMA con los niveles más bajos (Gráfica 5.2.2.23).

Finalmente, en 2021 verano, otoño e invierno se encontraban entre 0.022 y 0.03 ppm y primavera supero las 0.03 ppm en todas las EMA (Gráfica 5.2.2.24).

5.2.3 Concentraciones de bióxido de azufre SO₂ 2018-2021

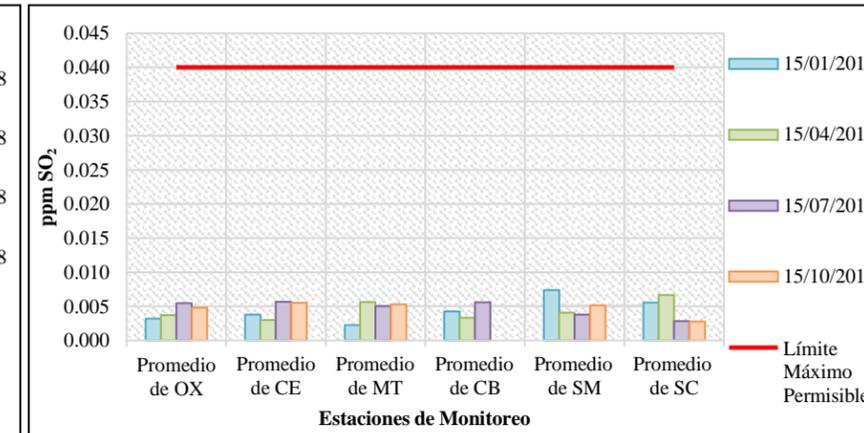
5.2.3.1 Concentraciones por día de bióxido de azufre SO₂

Gráfica 5.2.3. 1 Promedio por día de SO₂ por EMA 2018



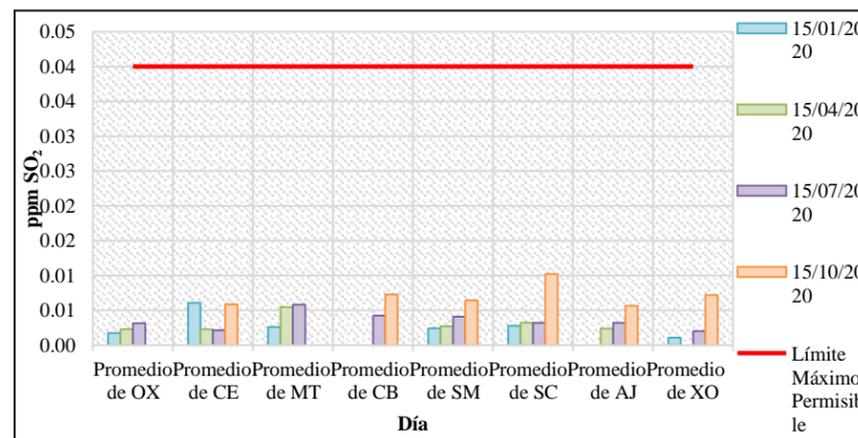
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018a).

Gráfica 5.2.3. 2 Promedio por día de SO₂ por EMA 2019



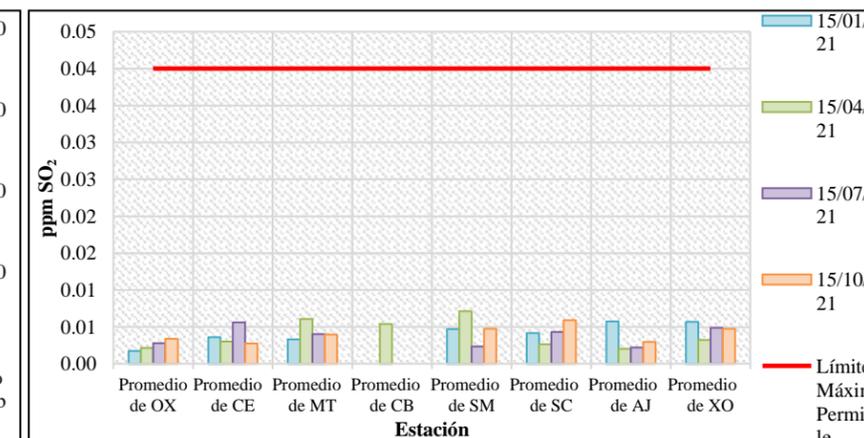
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019a).

Gráfica 5.2.3. 3 Promedio por día de SO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020a).

Gráfica 5.2.3. 4 Promedio por día de SO₂ por EMA 2021



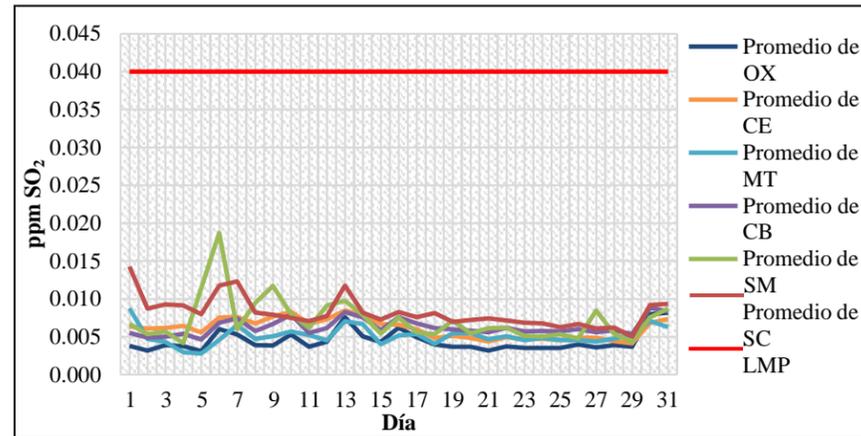
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021a).

De acuerdo con los datos recabados, las concentraciones de bióxido de azufre (SO₂) durante los días 15 de cada mes, se encontraban por debajo de 0.010 ppm, dentro de un rango de 0.002 a 0.007 ppm en todas las estaciones de monitoreo en donde el día 15 de octubre del 2018 (Gráfica 5.2.3.1). En 2019 los niveles de bióxido de azufre (SO₂) se encontraban entre 0.003 y 0.007, más alto que el año anterior, en donde Oxtotitlán (OX), Ceboruco (CB) y San Mateo (SM), las que presentaban los valores más altos (Gráfica 5.2.3.2).

Durante el 15 de octubre de 2015 (Gráfica 5.2.3.4) el SO₂ aumento hasta llegar a 0.010 en San Cristóbal (SC), y en el resto de las EMA se mantuvo de 0.005 a 0.007 en la misma fecha, aunque en Oxtotitlán (OX), Metepec (MT), Ceboruco (CB), Almoloya de Juárez (AJ) y Xonacatlán (XO) no mostraron registros completos de los datos. Para el 2021 Ceboruco (CB) solo mostró datos en el 15 de abril de 0.005 ppm, el resto de las estaciones se mantuvo entre 0.002 y 0.007 ppm precisamente en el mes de abril, aun así, ese año no rebaso el 0.008 ppm (Gráfica 5.2.3.4).

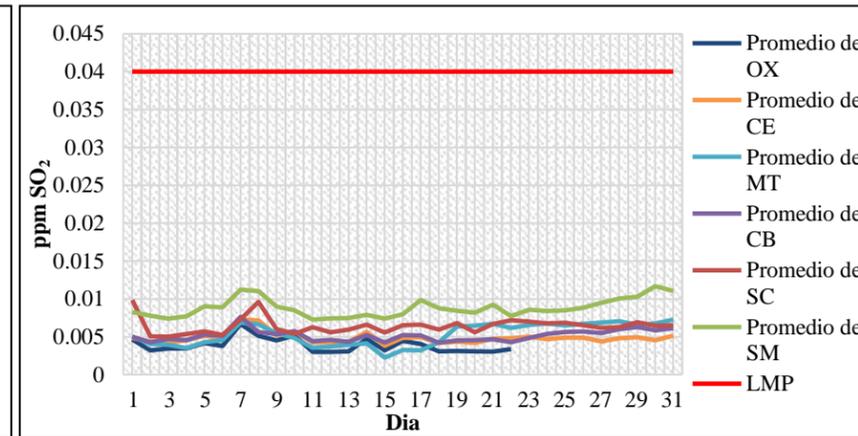
5.2.3.2 Concentraciones en enero de bióxido de azufre SO₂

Gráfica 5.2.3. 5 Promedio en enero de SO₂ por EMA 2018



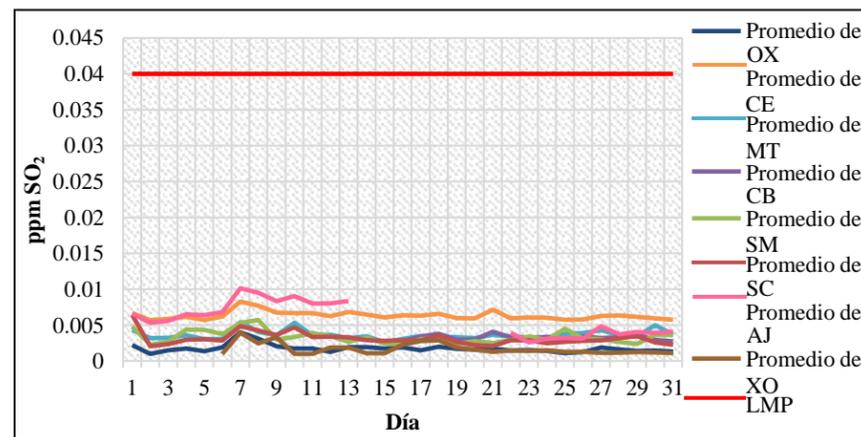
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018a).

Gráfica 5.2.3. 6 Promedio en enero de SO₂ por EMA 2019



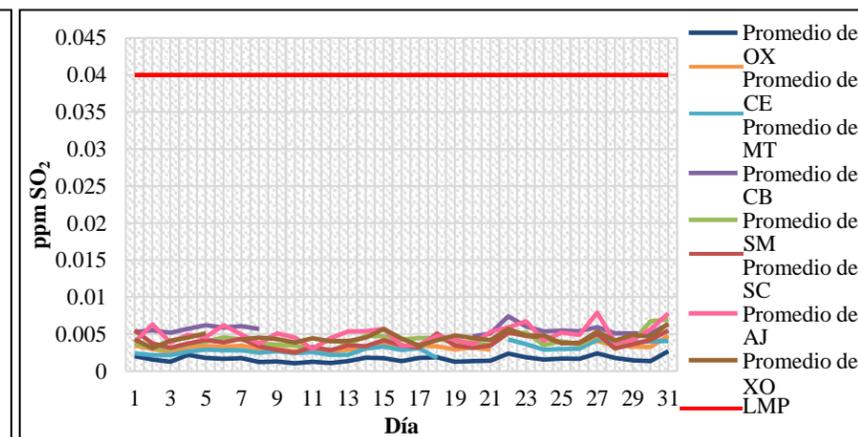
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019a).

Gráfica 5.2.3. 7 Promedio en enero de SO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020a).

Gráfica 5.2.3. 8 Promedio en enero de SO₂ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021a).

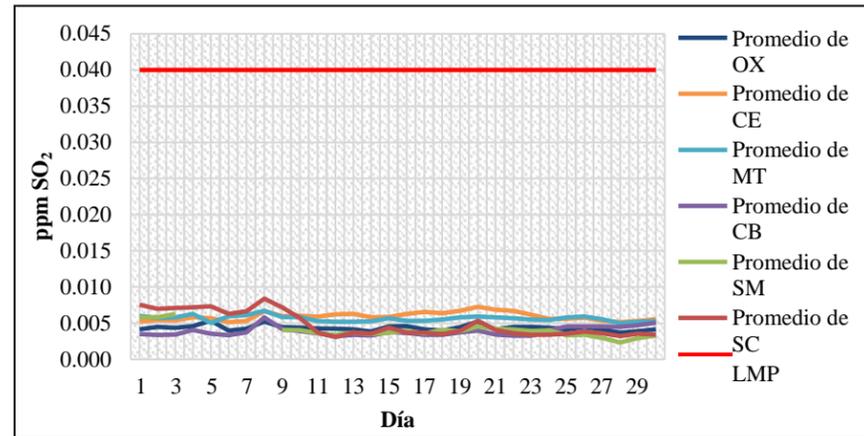
Al inicio de enero de 2018 (Gráfica 5.2.3.5) las concentraciones eran elevadas por encima de 0.010 ppm en la estación de San Mateo (SM), sin embargo, a partir de la segunda mitad del mes los niveles de bióxido de azufre (SO₂) se mantienen similares en las seis estaciones, por su parte Oxtotitlán (OX) mostró los registros más bajos llegando hasta 0.005 ppm en conjunto con Metepec (MT), al final se mes se puede observar un ligero aumento en todas las EMA. Durante 2019, fue San Mateo (SM) la estación con los datos más altos, sin embargo, estos fueron más bajos en comparación con enero de 2018, y aunque Oxtotitlán (OX) nuevamente presento los datos más bajos no hubo registros durante todo el mes (Gráfica 5.2.36).

Aunque en 2020 ya se encontraban en funcionamiento las ocho EMA como se observa en la Gráfica 5.2.3.7, las nuevas Almoloya de Juárez (AJ) y Xonacatlán (XO), no presentaron datos en varios días del mes, el resto de las estaciones mostró una disminución en los niveles de bióxido de azufre (SO₂) y Oxtotitlán (OX), Metepec (MT), Ceboruco (CB), San Mateo (SM) y San Cristóbal (SC) las cuales mostraron datos menores a 0.005 ppm.

Oxtotitlán (OX) nuevamente registro los niveles más bajos del contaminante, tanto que casi llego a 0 ppm, pues su dato más alto fue de 0.002 ppm, el resto como Centro (CE), Xonacatlán (XO), y Almoloya de Juárez (AJ), se encontraban debajo de 0.005 ppm en enero de 2021 (Gráfica 5.2.3.8).

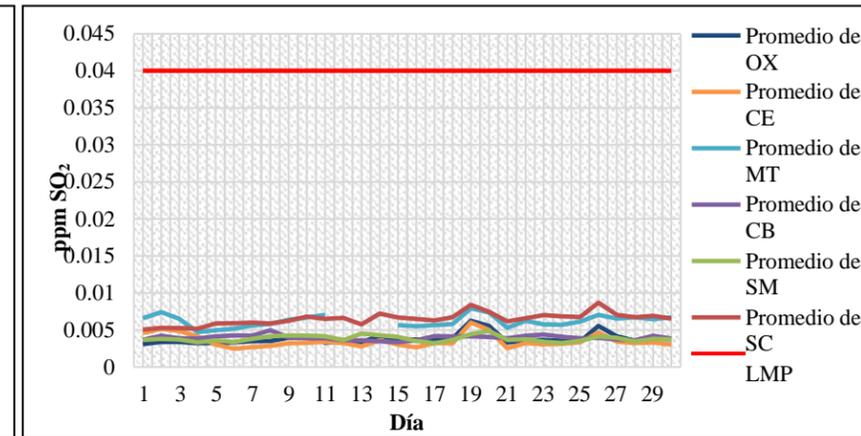
5.2.3.3 Concentraciones en abril de bióxido de azufre SO₂

Gráfica 5.2.3. 9 Promedio en abril de SO₂ por EMA 2018



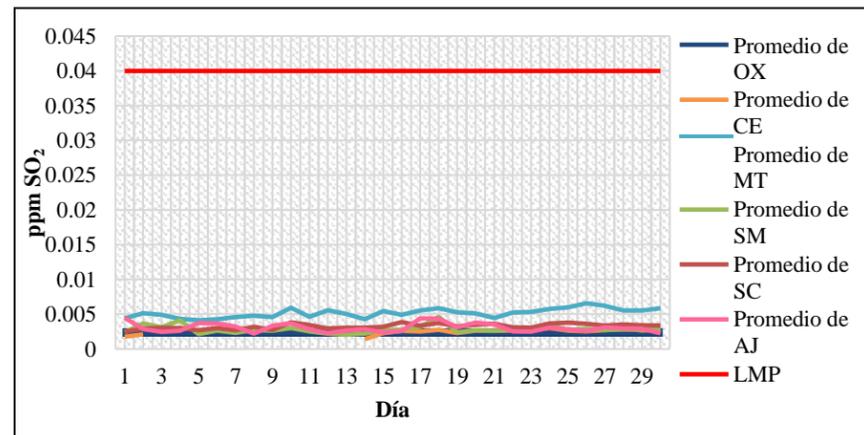
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018a).

Gráfica 5.2.3. 10 Promedio en abril de SO₂ por EMA 2019



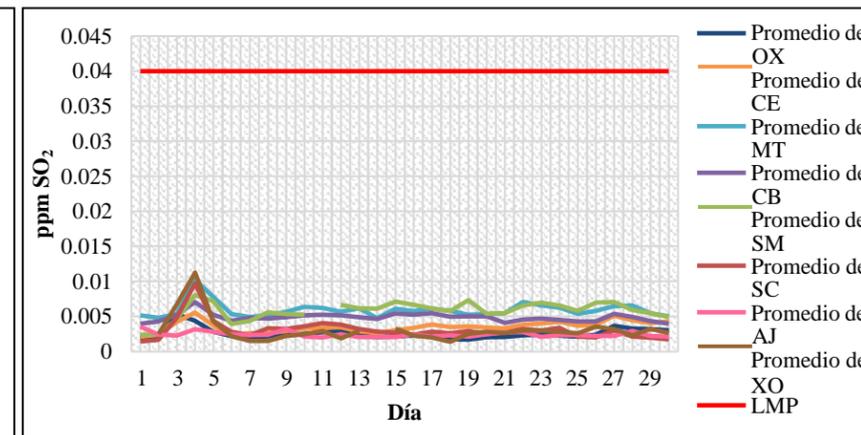
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019a).

Gráfica 5.2.3. 11 Promedio en abril de SO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020a).

Gráfica 5.2.3. 12 Promedio en abril de SO₂ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021a).

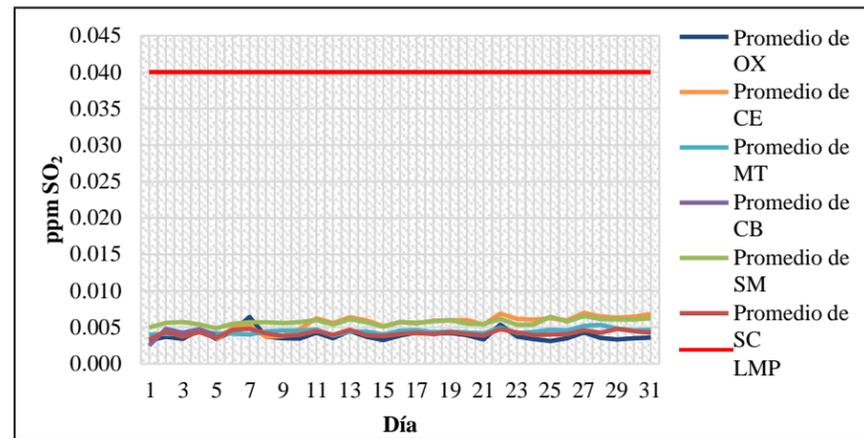
En abril de 2018 (Gráfica 5.2.3.9) los niveles de bióxido de azufre (SO₂) disminuyeron y se mantuvieron similares durante todo el mes en las seis estaciones por encima de los 0.005 ppm, también San Cristóbal (SC), aunque fue la que mostro un punto alto en los primeros días del mes, a pesar de ello mostro una baja considerable el resto del mes.

Aunque las concentraciones en abril de 2019 eran semejantes al año anterior, estas no se registraron en todo el mes en Metepec (MT), durante el mes los niveles de bióxido de azufre (SO₂) se encontraban de 0.0025 a 0.008 ppm tal y como se observa en la Gráfica 5.2.3.10.

En el caso se abril de 2020 Metepec (MT), llego a 0.0065 ppm (Gráfica 5.2.3.11), el más alto durante todo el mes y 0.0022 ppm el más bajo en Centro (CE); por último, en abril de 2021 se muestra un aumento en los niveles de bióxido de azufre (SO₂) mostrado en la Gráfica 5.2.3.12, en los primero cinco días se presentó un pico que superaba 0.01 ppm en varias de las estaciones y a pesar de que estas bajaron en el resto del mes Metepec (MT), Ceboruco (CB), San Mateo (SM) fueron las que presentaron los datos más altos en el mes.

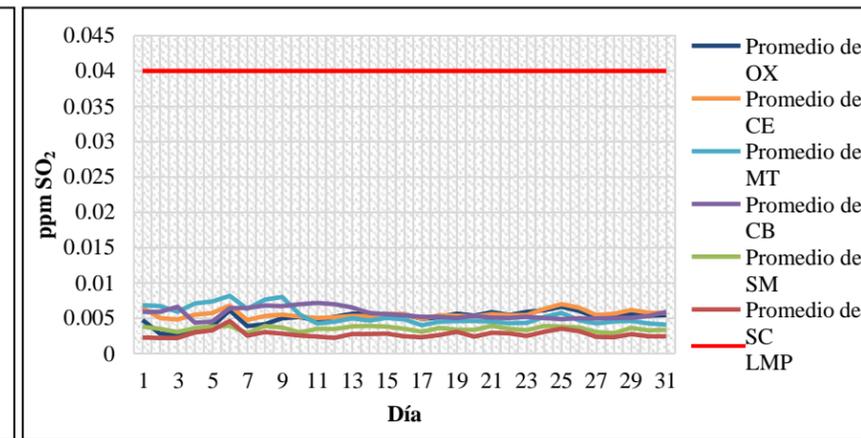
5.2.3.4 Concentraciones en julio de bióxido de azufre SO₂

Gráfica 5.2.3. 13 Promedio en julio de SO₂ por EMA 2018



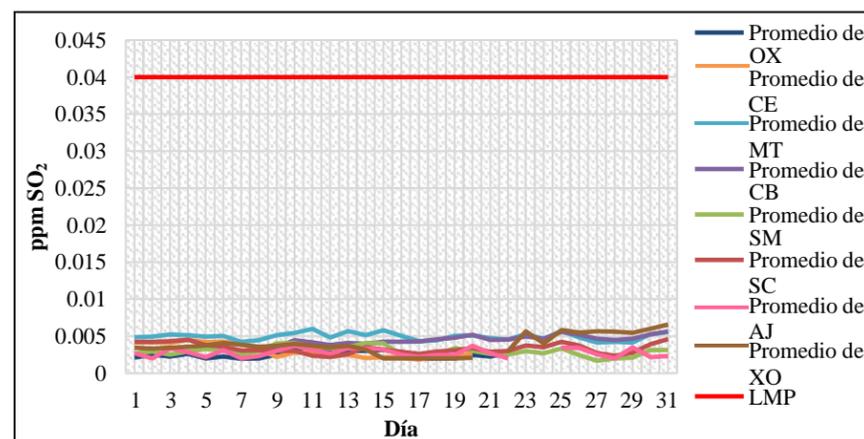
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018a).

Gráfica 5.2.3. 14 Promedio en julio de SO₂ por EMA 2019



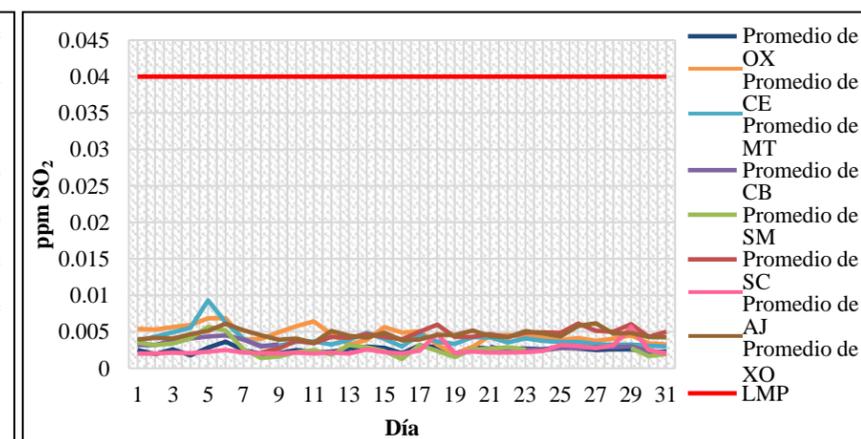
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019a).

Gráfica 5.2.3. 15 Promedio en julio de SO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020a).

Gráfica 5.2.3. 16 Promedio en julio de SO₂ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021a).

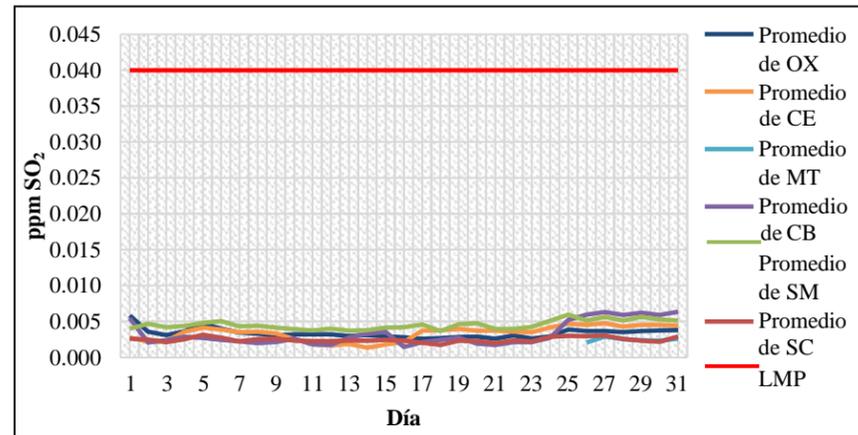
Al igual que en abril, las concentraciones del contaminante en julio de 2018 se mantuvieron muy por debajo del LMP con niveles superiores a 0.005 ppm en la mayoría de las estaciones, Centro (CE) y San Mateo (SM), se encontraban con datos muy similares y fueron las que presentaron los datos más altos del mes (Gráfica 5.2.3.13).

En 2019 (Gráfica 5.2.3.14) solo San Cristóbal (SC), se mantuvo debajo de 0.005 ppm, seguida de San Mateo (SM) con 0.0033 ppm como máximo; para 2020, se muestra una ligera disminución en los primeros diez días del mes, solo la EMA de Metepec (MT), supero los 0.005 ppm, y el resto de las estaciones al final de julio presentaron un ligero aumento el cual se pudo ver en la Gráfica 5.2.3.15.

Finalmente, en julio de 2021 (Gráfica 5.2.3.16), se pueden observar las variaciones en todos los días, aunque no de manera significativa ya que solo Metepec (MT), mostro un pico que no superó los 0.01 ppm, el resto de EMA, oscilo entre 0.002 y 0.006 ppm.

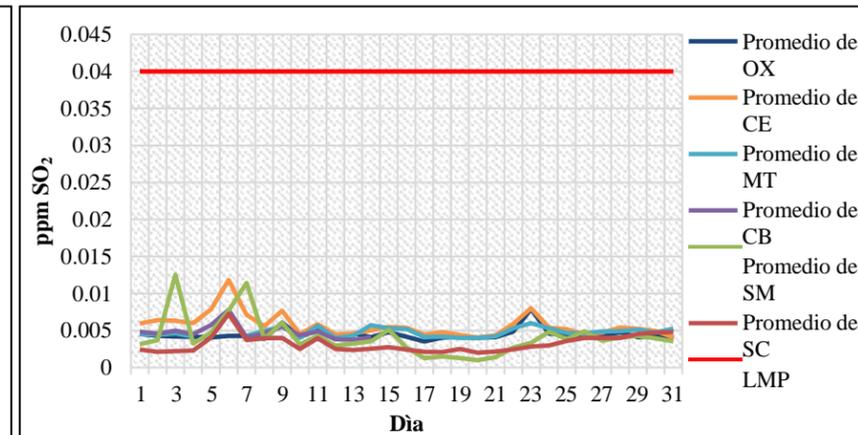
5.2.3.5 Concentraciones en octubre de bióxido de azufre SO₂

Gráfica 5.2.3. 17 Promedio en octubre de SO₂ por EMA 2018



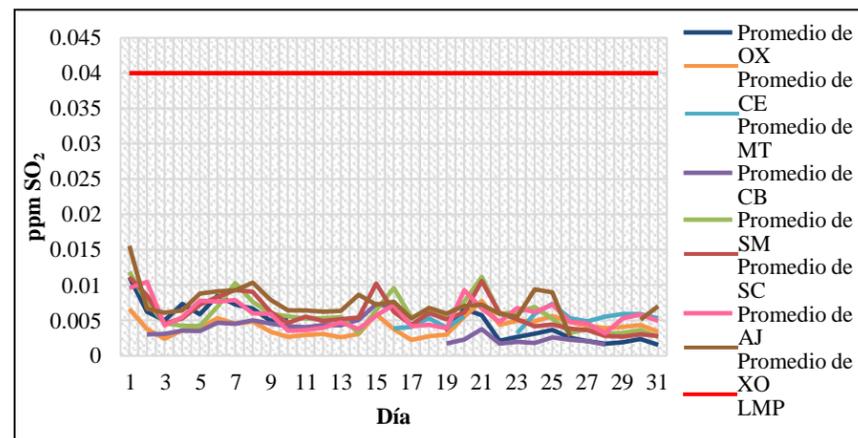
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018a).

Gráfica 5.2.3. 18 Promedio en octubre de SO₂ por EMA 2019



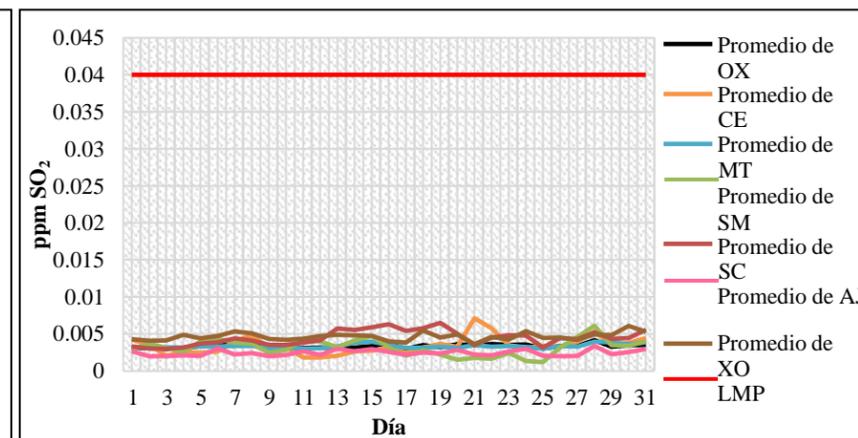
Fuente: Elaboración propia con base en (RAMA, 2019a).

Gráfica 5.2.3. 19 Promedio en octubre de SO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020a).

Gráfica 5.2.3. 20 Promedio en octubre de SO₂ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021a).

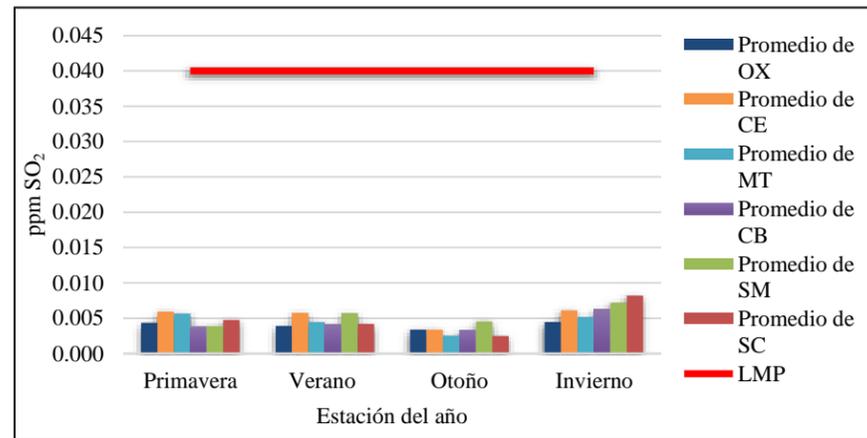
En comparación con los meses anteriores la mayor parte de octubre en 2018 (Gráfica 5.2.3.17) los valores fueron menores a 0.005 ppm, además la estación de Metepec (MT), no registro datos hasta el 26 de octubre, y el resto de las estaciones manifestaron un ligero incremento en bióxido de azufre (SO₂) En octubre de 2019, tanto Centro (CE) como San Mateo (SM) presentaron picos que estuvieron por encima de 0.01 ppm, el resto mostro datos entre 0.002 y 0.006 ppm (Gráfica 5.2.3.18).

En el transcurso de octubre de 2020, se observan variaciones en todos los días, tal es así que en los primeros días se llegó a 0.015 ppm en Xonacatlán (XO), esta estación en conjunto con San Cristóbal (SC) y San Mateo (SM) presentaron las concentraciones más altas en todo el mes, por su parte Ceboruco (CB) no registró a mediados del mes y Xonacatlán (XO) a finales (Gráfica 5.2.3.19).

A comparación de octubre de 2020 en 2021 se registró una disminución de bióxido de azufre (SO₂) (Gráfica 5.2.3.20) en todas las estaciones sobre todo en Almoloya de Juárez (AJ) y San Mateo (SM), que estuvieron entre 0.0012 ppm y 0.0025 ppm.

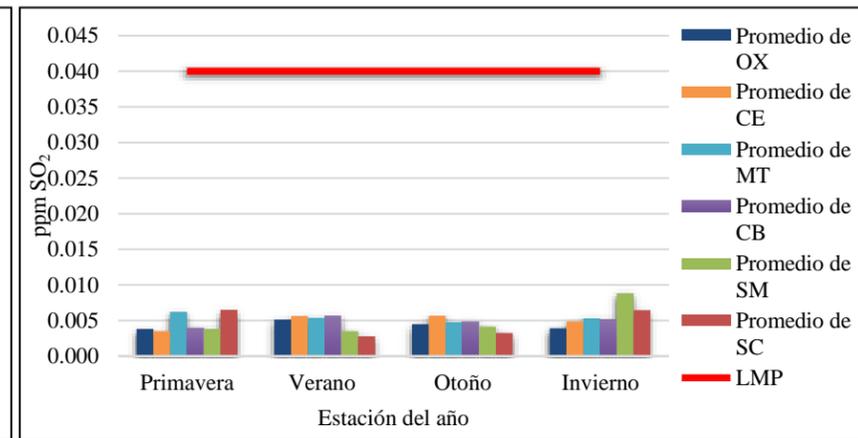
5.2.3.6 Concentraciones por estación del año de bióxido de azufre SO₂ 2018-2021

Gráfica 5.2.3. 21 Promedio anual de SO₂ por EMA 2018



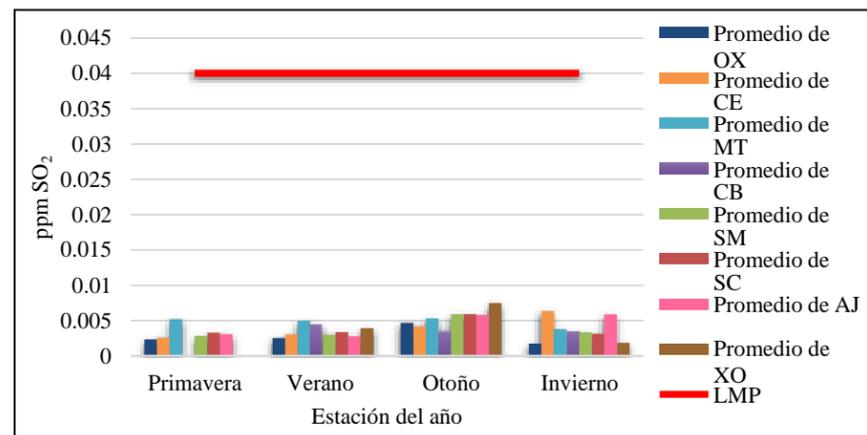
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018a).

Gráfica 5.2.3.22 Promedio anual de SO₂ por EMA 2019



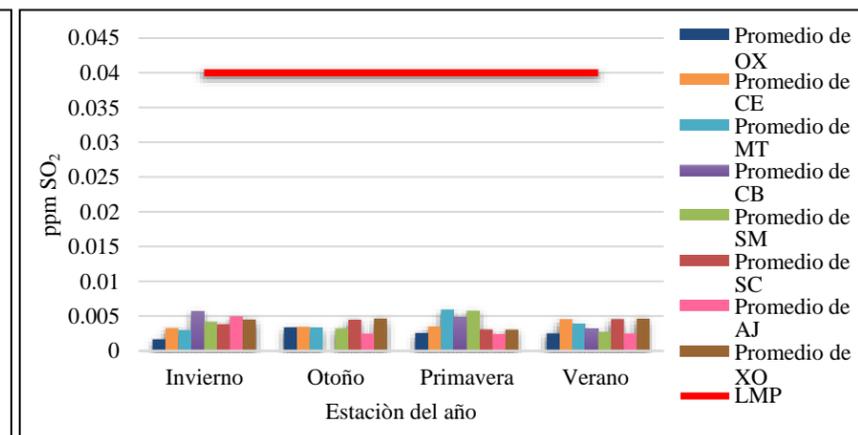
Fuente: Elaboración propia con base en (RAMA, 2019a).

Gráfica 5.2.3 23 Promedio anual de SO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020a).

Gráfica 5.2.3 24 Promedio anual de SO₂ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021a).

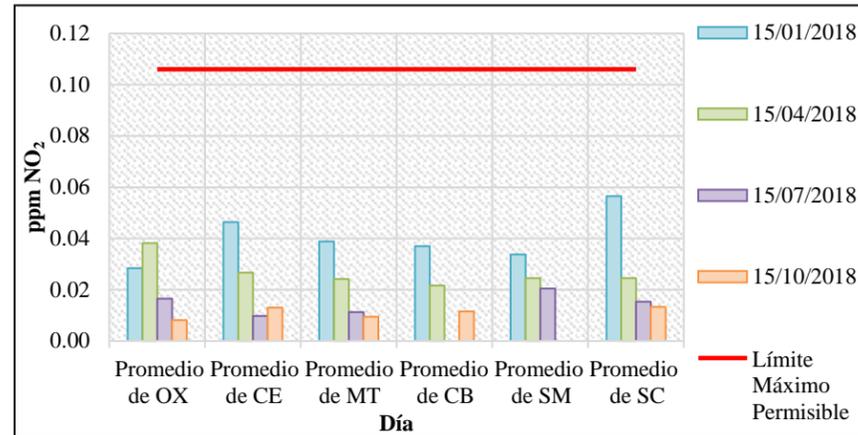
Según los datos de la RAMA en 2018 (Gráfica 5.2.3.21), durante el primavera, verano e invierno se presentaron las concentraciones más elevadas en comparación con el otoño que están por debajo de 0.0050 ppm, en cambio en 2019, se puede observar un ligero incremento de bióxido de azufre (SO₂), a pesar de ello nuevamente invierno y verano fueron las estaciones del año con un nivel más alto de SO₂ (Gráfica 5.2.3.22).

En cambio, en 2020 fue otoño en donde hubo un aumento en las concentraciones en primavera, verano e invierno fueron relativamente las más bajas en ese año como se observa en la Gráfica 5.2.3.23. Por otro lado, en 2021, los registros presentan datos muy similares (Gráfica 5.2.3.24), siendo primavera en donde solo Metepec (MT), San Mateo (SM) superaron los 0.005 ppm.

5.2.4 Concentraciones de bióxido de nitrógeno NO₂ 2018-2021

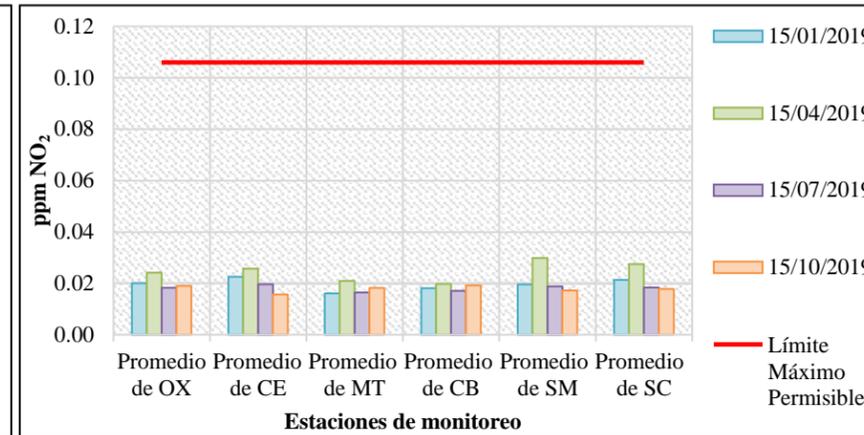
5.2.4.1 Concentraciones por día de bióxido de nitrógeno NO₂

Gráfica 5.2.4.1 Promedio por día de NO₂ por EMA 2018



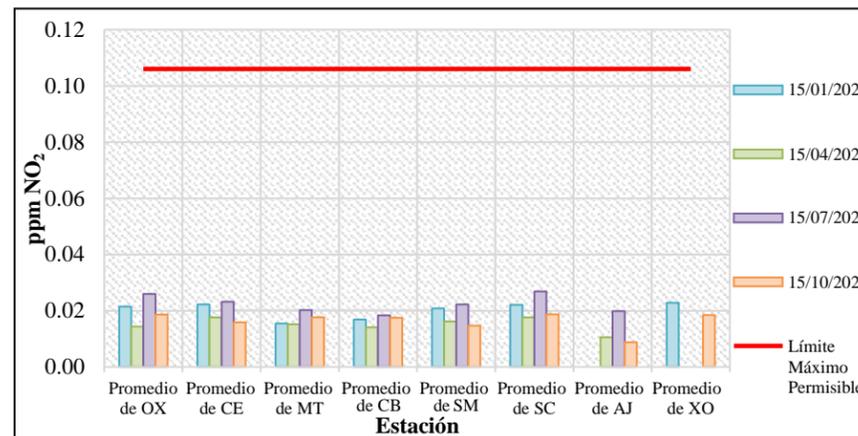
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

Gráfica 5.2.4.2 Promedio por día de NO₂ por EMA 2019



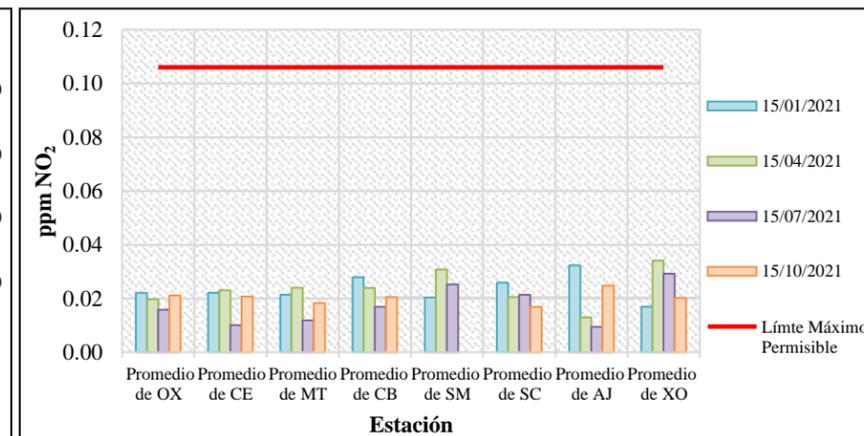
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019b).

Gráfica 5.2.4.3 Promedio por día de NO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020b).

Gráfica 5.2.4.4 Promedio por día de NO₂ por EMA 2021



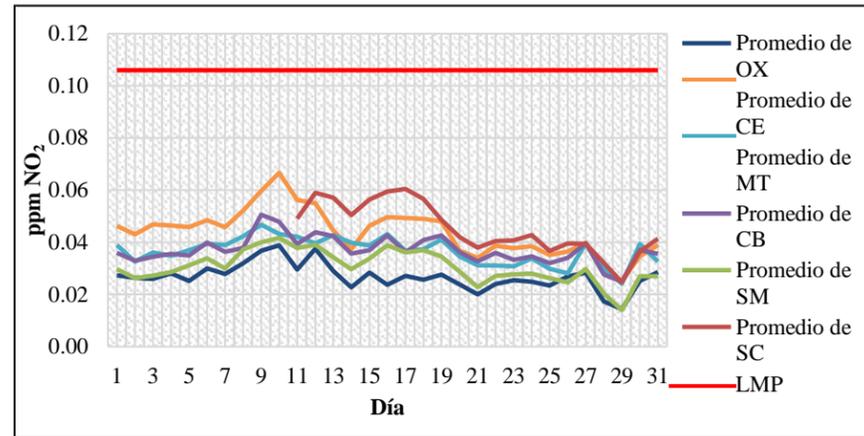
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021b).

El 15 de enero de 2018 fue cuando se presentaron las concentraciones más elevadas de los cuatro años estudiados, se superaron las 0.056 ppm, seguido del 15 de abril del mismo año con 0.038 ppm, así los días con los niveles más bajos fueron durante el 15 de abril y de octubre, por otro lado, en 2019 se observa una disminución de aproximadamente la mitad en todas las estaciones, ya que el máximo fue de 0.030 ppm en el 15 de abril, 0.016 ppm en octubre (Gráfica 5.2.4.1).

Durante 2020 (Gráfica 5.2.4.3), las EMA Almoloya de Juárez (AJ) y Xonacatlán (XO) no registraron datos por completo, sin embargo, el resto de las estaciones se mantuvo en un rango entre 0.011 ppm y 0.023 ppm, más bajo que en 2019 observado en la (Gráfica 5.2.4.2). Con respecto a 2021 hay un ligero aumento (Gráfica 5.2.4.4), pero solo en Almoloya de Juárez (AJ) y Xonacatlán (XO) que reportaron 0.032 en enero y 0.034 ppm en abril.

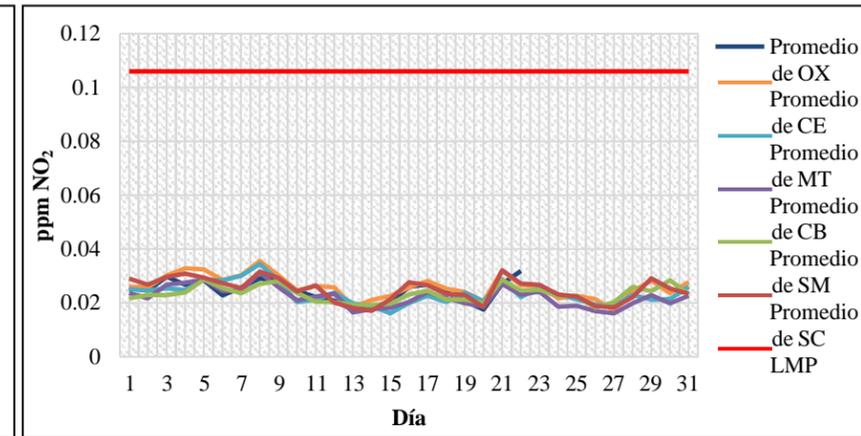
5.2.4.2 Concentraciones en enero de bióxido de nitrógeno NO₂

Gráfica 5.2.4. 5 Promedio en enero de NO₂ por EMA 2018



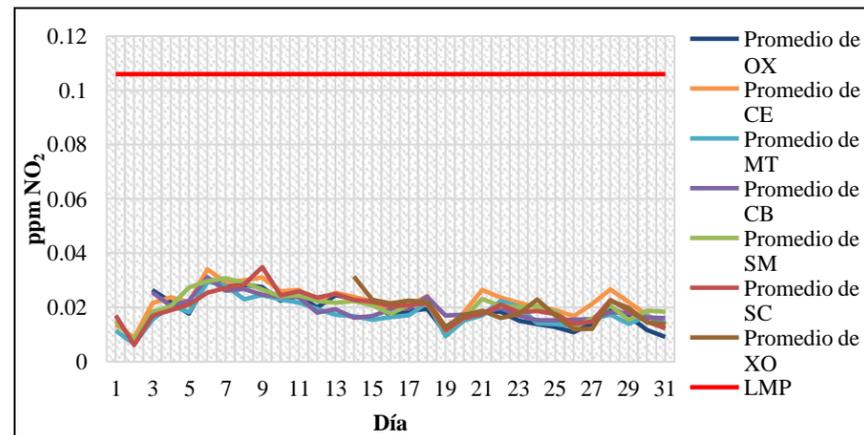
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

Gráfica 5.2.4. 6 Promedio en enero de NO₂ por EMA 2019



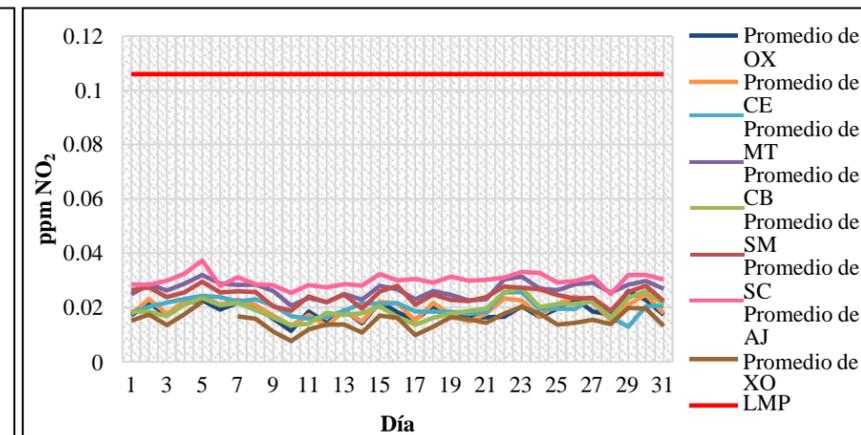
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019b).

Gráfica 5.2.4. 7 Promedio en enero de NO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020b).

Gráfica 5.2.4. 8 Promedio en enero de NO₂ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021b).

Durante el mes de enero de 2018 (Gráfica 5.2.4.5) la estación San Cristóbal (SC), registro datos a partir del día 11 además de que fue una de las cuales presento las concentraciones más elevadas en conjunto con la estación Centro (CE) con más de 0.05 ppm, así mismo el resto de las estaciones se mantuvo en un rango de 0.020 a 0.050 ppm, respetando el LMP.

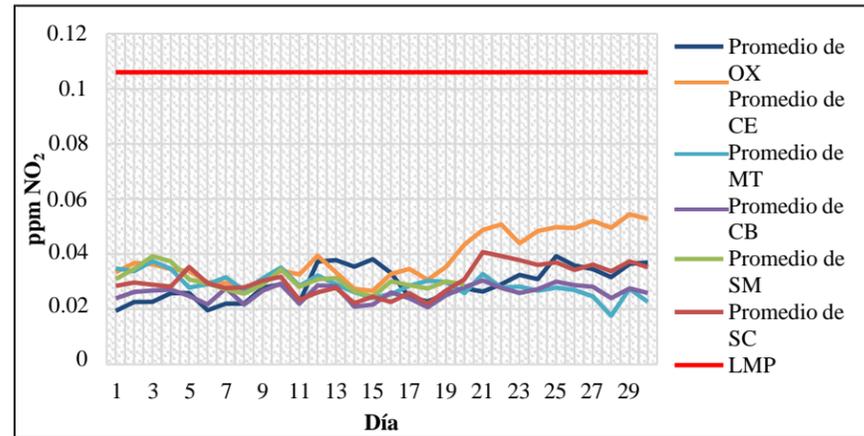
Para 2019 los niveles de bióxido de nitrógeno (NO₂) disminuyeron y se encontraban por debajo de 0.04 ppm, aunque las estaciones mostraban datos similares, Centro (CE), Metepec (MT), y San Cristóbal (SC) mostraron los picos más altos 0.034 ppm, por su parte Ceboruco (CB) y San Mateo (SM), los registros más bajos 0.018 ppm dichos registros se observan en la Gráfica 5.2.4.6.

En 2020 estas concentraciones bajaron aún más en los primeros días del mes de 0.006 a 0.027 ppm (Gráfica 5.2.4.7), con un ligero aumento en los días siguientes, pero a partir de segunda mitad del mes estas aminoraron y se encontraban entre 0.011 y 0.022 ppm.

Los registros de enero de 2021 (Gráfica 5.2.4.8) mostraron que Almoloya de Juárez (AJ) fue la EMA que tuvo las concentraciones más altas pero que no superaron los 0.04 ppm, Xonacatlán por su parte se mantuvo con los datos inferiores con un mínimo de 0.007 ppm, el resto de las estaciones estuvieron dentro de estos rangos de dichas EMA.

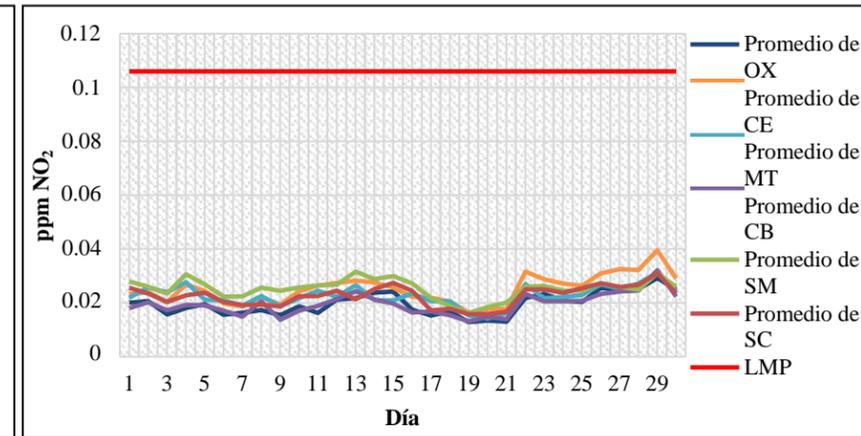
5.2.4.3 Concentraciones en abril de bióxido de nitrógeno NO₂

Gráfica 5.2.4. 9 Promedio en abril de NO₂ por EMA 2018



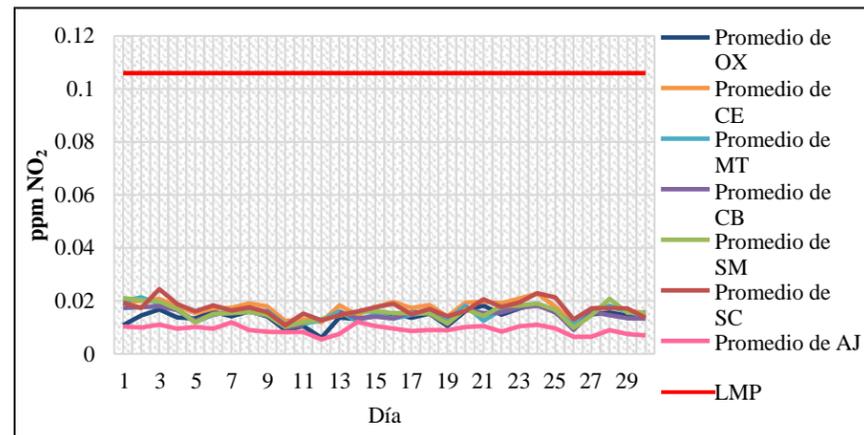
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

Gráfica 5.2.4. 10 Promedio en abril de NO₂ por EMA 2019



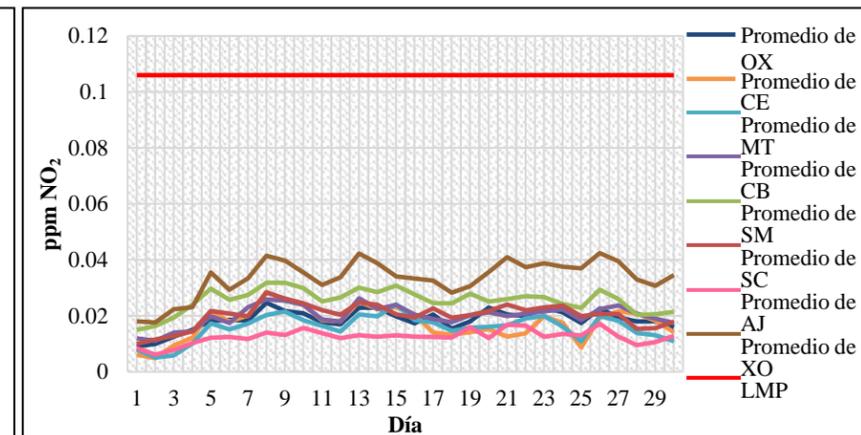
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019b).

Gráfica 5.2.4.11 Promedio en abril de NO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020b).

Gráfica 5.2.4.12 Promedio en abril de NO₂ por EMA 2021



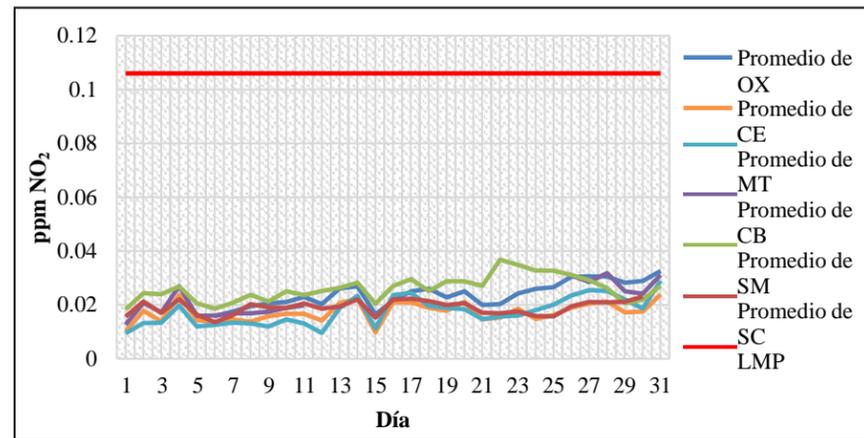
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021b).

En abril de 2018 los niveles más altos de bióxido de nitrógeno (NO₂) se presentan a partir del día 20, principalmente en la estación Centro (CE), el resto de las estaciones presentaron valores entre 0.0175 y 0.052 ppm (Gráfica 5.2.4.9), con una disminución en abril de 2019 las EMA se encontraban entre 0.013 y 0.39 ppm en la gráfica 5.4.4.10 hay un descenso de concentraciones de bióxido de nitrógeno (NO₂) del 16 al 22 de abril, sin embargo, en los últimos días del mes hay también un aumento (Gráfica 5.2.4.10).

Mientras tanto en abril de 2020 el punto máximo fue en San Cristóbal (SC) con 0.024 ppm, Almoloya de Juárez (AJ) en esta ocasión presentó las concentraciones más bajas del contaminante a mitad de mes con 0.0055 ppm (Gráfica 5.2.4.11). En abril de 2021 hubo un aumento principalmente en Xonacatlán (XO) con más de 0.04 ppm y San Mateo que también presentó varios picos que se encontraban en 0.03 y 0.035 ppm, y al igual que el año anterior Almoloya de Juárez (AJ) fue la estación con los valores mínimos en el mes (Gráfica 5.2.4.12)

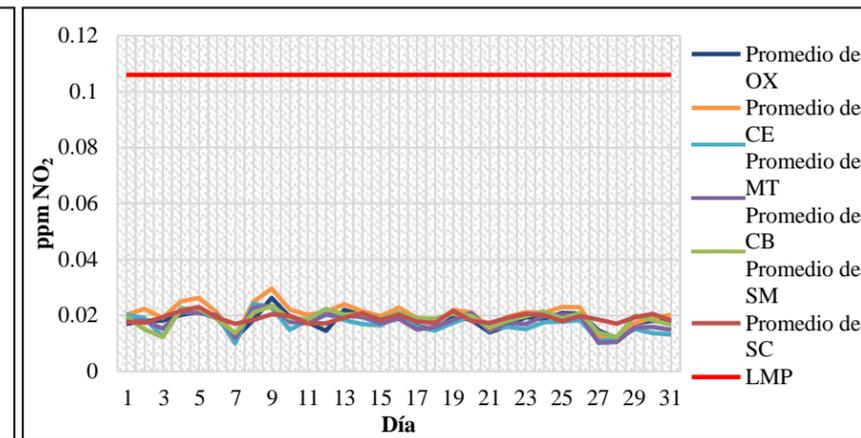
5.2.4.4 Concentraciones en julio de bióxido de nitrógeno NO₂

Gráfica 5.2.4. 13 Promedio en julio de NO₂ por EMA 2018



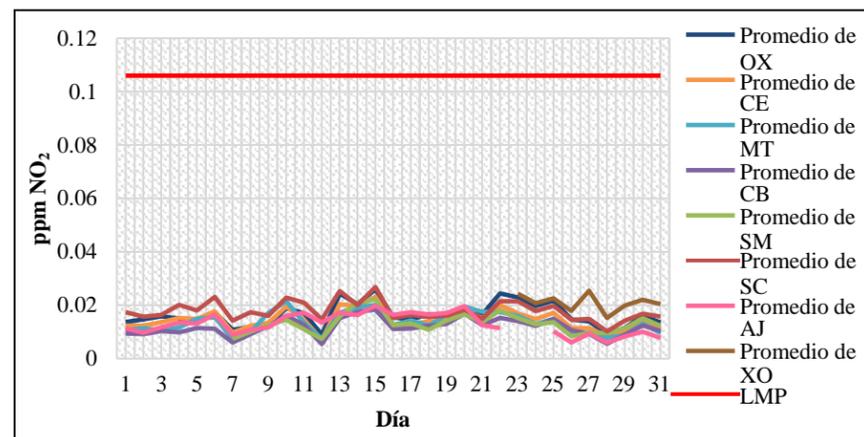
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

Gráfica 5.2.4.14 Promedio en julio de NO₂ por EMA 2019



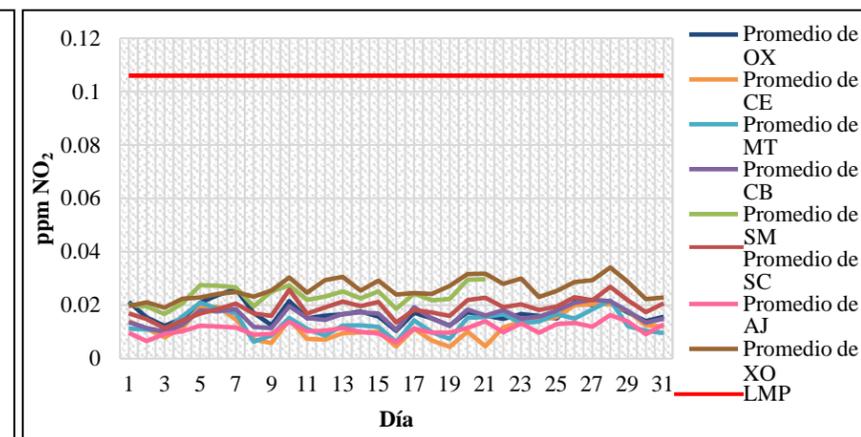
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019b).

Gráfica 5.2.4. 15 Promedio en julio de NO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020b).

Gráfica 5.2.4. 16 Promedio en julio de NO₂ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021b).

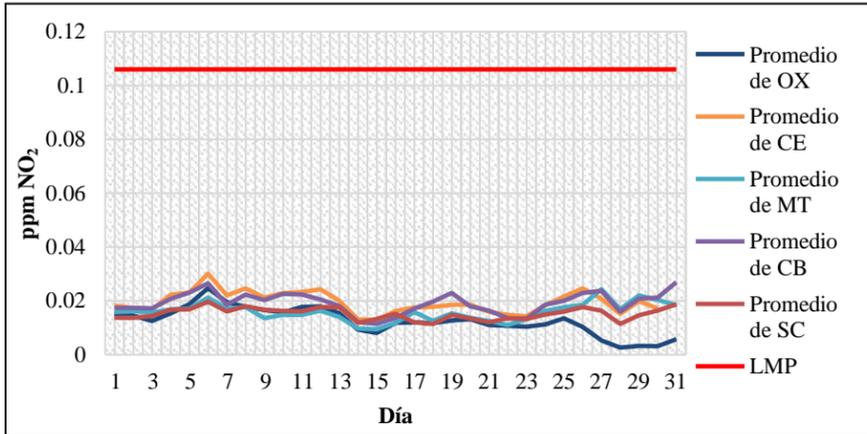
En julio de 2018 (Gráfica 5.2.4.13) las concentraciones de bióxido de nitrógeno (NO₂) fueron menores con respecto a los meses anteriores manteniéndose por debajo de los 0.04 ppm y la estación Centro (CE) fue una de las que registró los niveles más bajos (0.011 ppm) en comparación con enero y abril y San Mateo los más altos (0.036 ppm), igualmente en 2019 las concentraciones fueron más bajas y todas las EMA mantuvieron niveles de bióxido de nitrógeno (NO₂) similares entre 0.010 y 0.029 ppm (Gráfica 5.2.4.14).

Mientras que en julio de 2020 Xonacatlán (XO) y Almoloya de Juárez (AJ) muestran datos incompletos, Oxtotitlán (OX) y San Cristóbal (SC) presentan los puntos más elevados de bióxido de nitrógeno (NO₂) con 0.021 y 0.026 ppm (Gráfica 5.2.4.15).

En suma, durante 2021 (Gráfica 5.2.4.16) es San Mateo (SM) y Xonacatlán las estaciones que tienen los valores altos de bióxido de nitrógeno (NO₂), aunque esta primera solo tiene datos de 21 días, y los datos de Centro (CE) Almoloya de Juárez (AJ) circularon entre 0.004 y 0.013 ppm

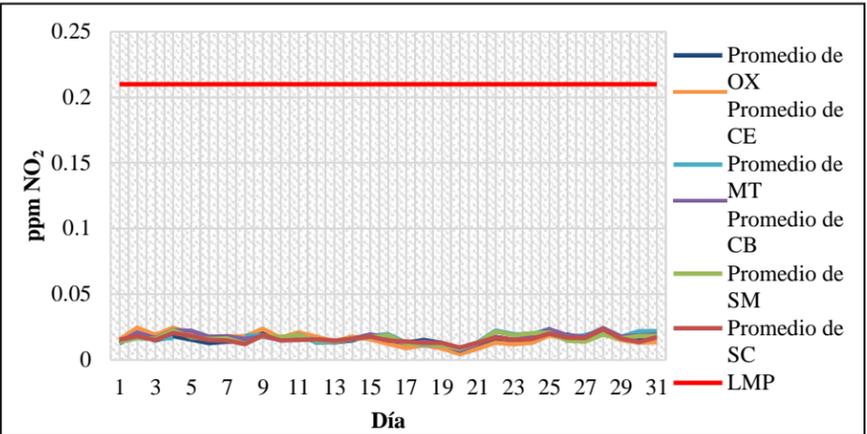
5.2.4.5 Concentraciones en octubre de bióxido de nitrógeno NO₂

Gráfica 5.2.4 17 Promedio en octubre de NO₂ por EMA 2018



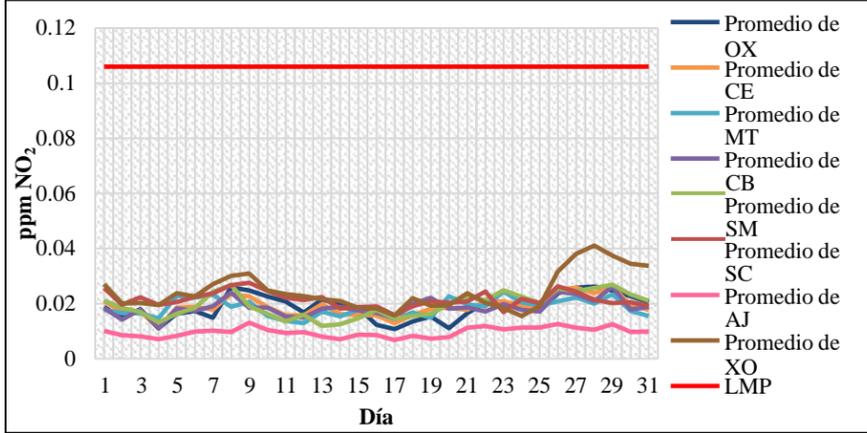
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

Gráfica 5.2.4 18 Promedio en octubre de NO₂ por EMA 2019



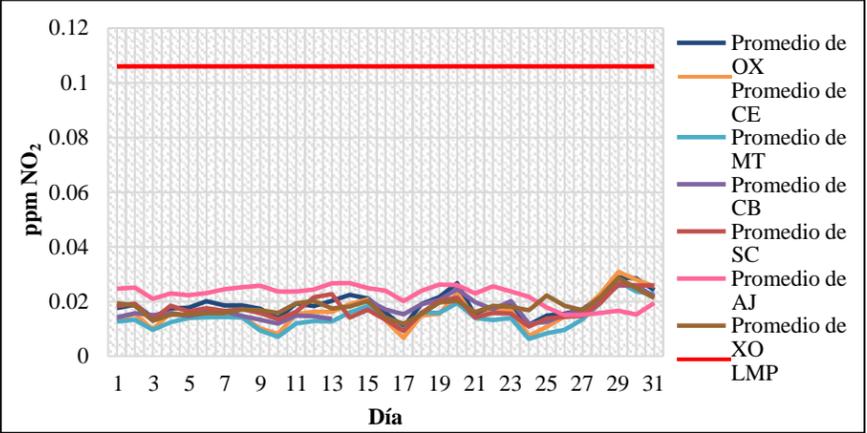
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019b).

Gráfica 5.2.4 19 Promedio en octubre de NO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020b).

Gráfica 5.2.4 20 Promedio en octubre de NO₂ por EMA 2021



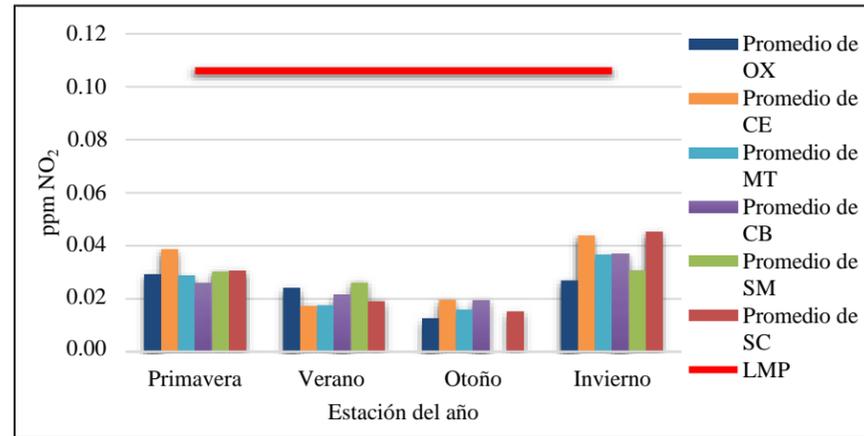
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021b).

Para octubre (Gráfica 5.2.4.17) las concentraciones fueron aún más bajas en la mayoría de las estaciones de monitoreo, aunque la estación de San Mateo (SM), no registró datos en todo el mes, Oxtotitlán (OX) al final del mes registro niveles cerca de 0 el más bajo de los meses estudiados para bióxido de nitrógeno (NO₂), además el resto de las estaciones no rebaso los 0.03 ppm.

Las seis estaciones en 2019 mostraron una reducción considerable en los registros de bióxido de nitrógeno (NO₂) pues estos no rebasaron los 0.005 ppm en todo el mes de octubre (Gráfica 5.2.4.18), en cambio en 2020 estas superan los 0.04 ppm con la EMA de Xonacatlán (XO), el resto permaneció ente 0.009 y 0.03 ppm (Gráfica 5.2.4.19). Y para 2021 los valores de bióxido de nitrógeno (NO₂) fueron bastante similares, pero en esta ocasión fue Almoloya de Juárez (AJ) la EMA con los datos más elevados (Gráfica 5.2.4.20).

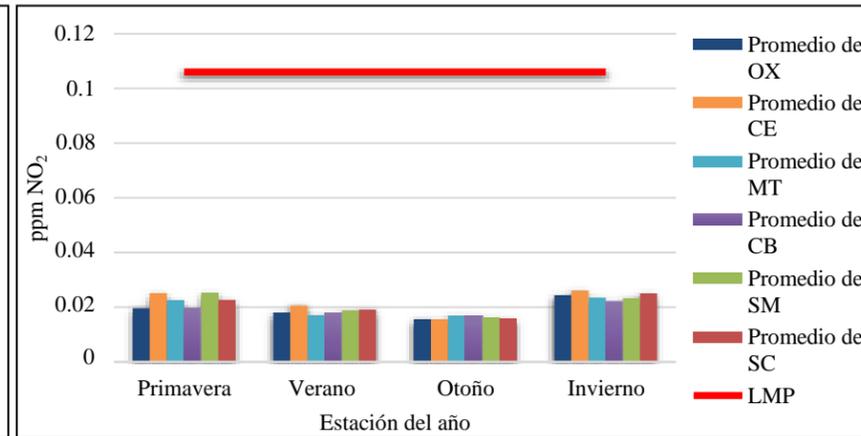
5.2.4.6 Concentraciones por estación del año de bióxido de nitrógeno NO₂ 2018-2021

Gráfica 5.2.4. 21 Promedio anual de NO₂ por EMA 2018



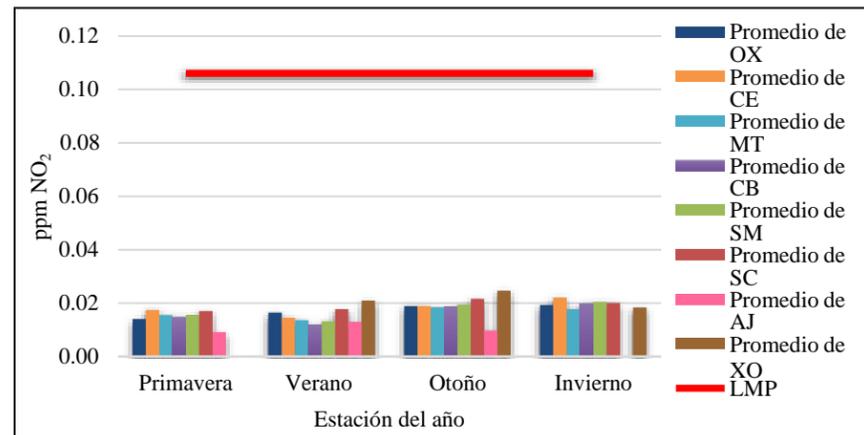
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

Gráfica 5.2.4.22 Promedio anual de NO₂ por EMA 2019



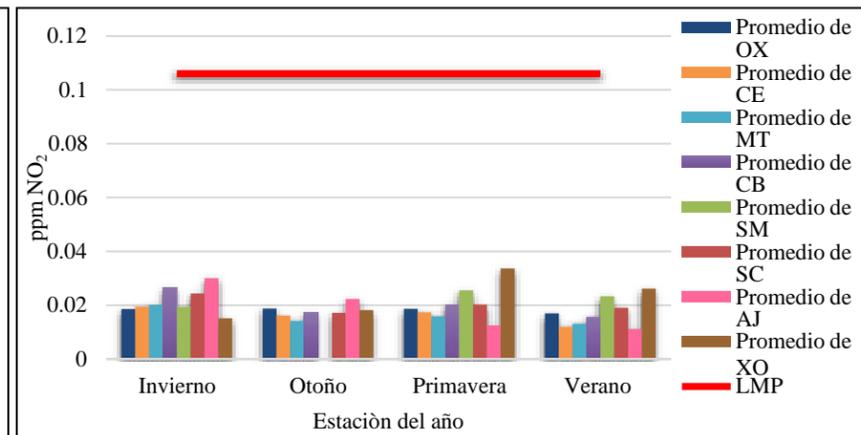
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019b).

Gráfica 5.2.4. 23 Promedio anual de NO₂ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020b).

Gráfica 5.2.4. 24 Promedio anual de NO₂ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021b).

Los niveles más altos de bióxido de nitrógeno (NO₂) se presentaron durante el invierno, por encima de 0.040 ppm, seguido de primavera y verano, así mismo en otoño se registraron los niveles más bajos, menos de 0.020 ppm durante el 2018 (Gráfica 5.2.4.21).

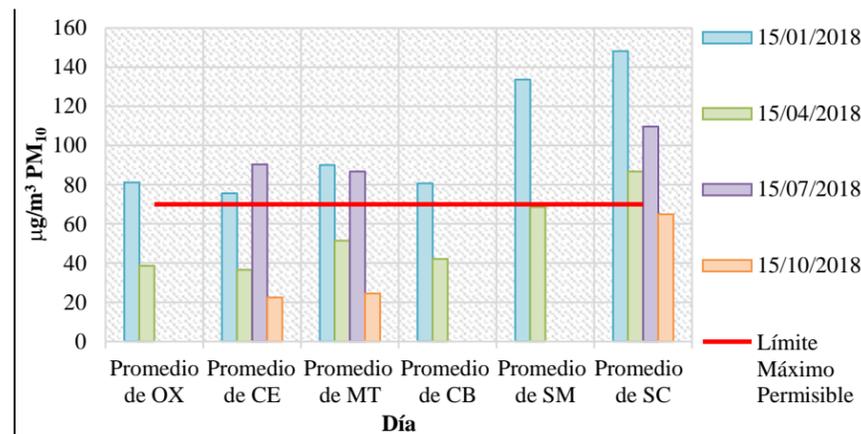
Por otro lado, en 2019 se observa una disminución en las cinco estaciones del año con respecto al 2018, a pesar de ello primavera e invierno siguen siendo las temporadas en las que el grado de bióxido de nitrógeno (NO₂) es mayor como se ve en la Gráfica 5.2.4.22.

Situación similar durante 2020 (Gráfica 5.2.4.23), con la excepción de que en otoño hay un aumento en la estación Xonacatlán (XO) y San Cristóbal (SC), primavera y verano no superan los 0.02 ppm. En tanto en 2021 se incrementaron las concentraciones de bióxido de nitrógeno (NO₂) en primavera, verano e invierno en diferentes EMA, y al igual que en 2018 y 2019 otoño es la época en donde el bióxido de nitrógeno (NO₂) se mantiene por debajo de las 0.02 ppm (Gráfica 5.2.4.24).

5.2.5 Concentraciones de material particulado PM₁₀ 2018-2021

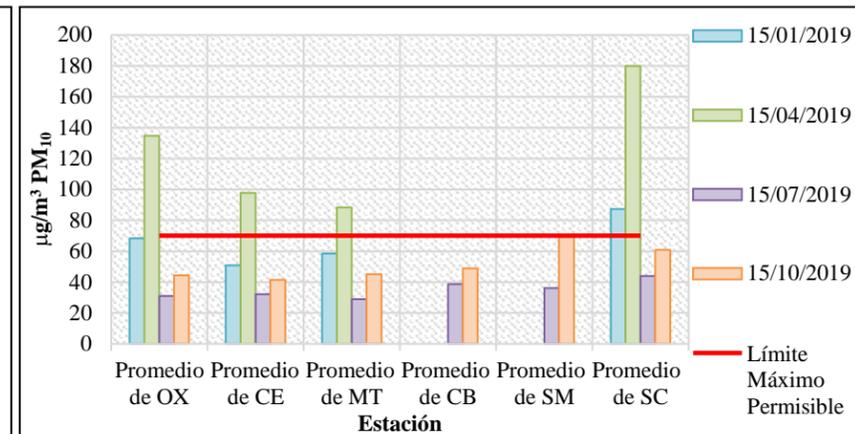
5.2.5.1 Concentraciones por día de material particulado PM₁₀

Gráfica 5.2.5. 1 Promedio por día de PM₁₀ por EMA 2018



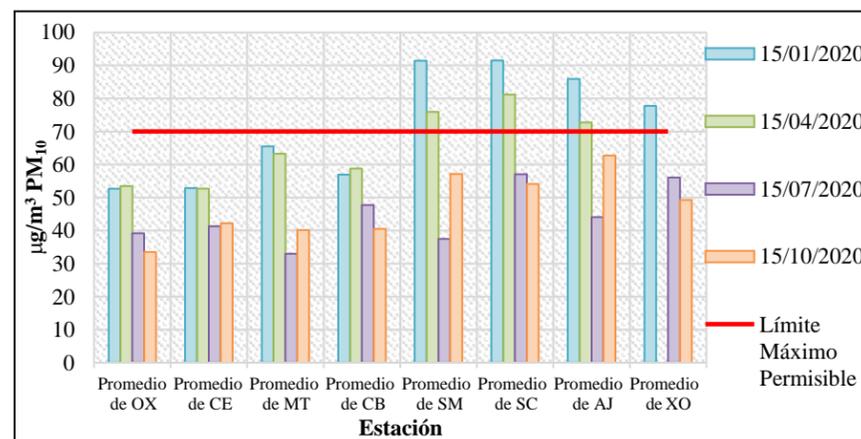
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018c).

Gráfica 5.2.5. 2 Promedio por día de PM₁₀ por EMA 2019



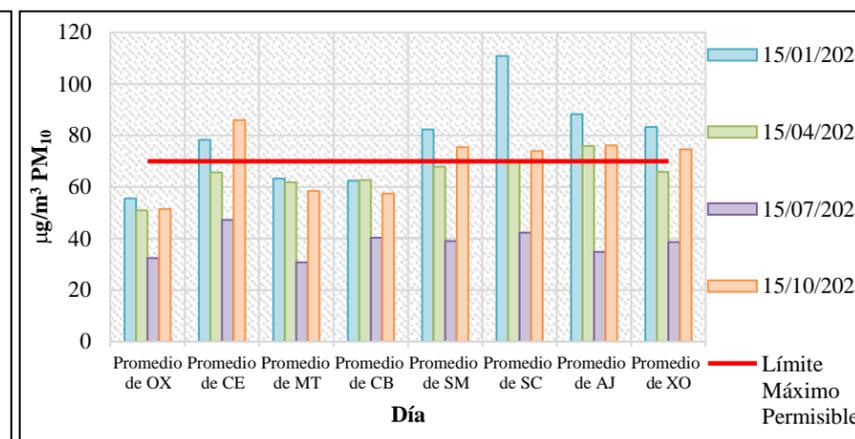
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019c).

Gráfica 5.2.5. 3 Promedio por día de PM₁₀ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

Gráfica 5.2.5. 4 Promedio por día de PM₁₀ por EMA 2021



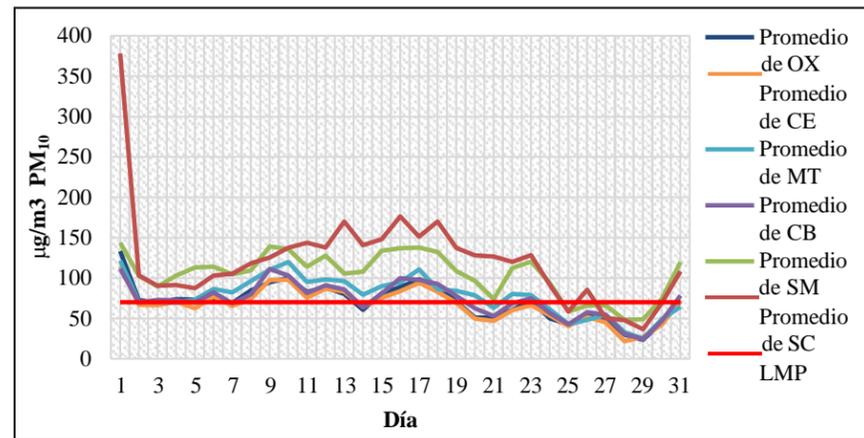
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021c).

Los días 15 que superaron el LMP en el 2018 como se observa en la Gráfica 5.2.5.1 fueron en el mes de enero, abril y julio, en el primer mes llegó hasta 148.1 µg/m³ en San Cristóbal (SC) el resto de las estaciones de igual manera lo excedieron con concentraciones por encima de los 70 µg/m³, por otro lado, en abril y julio San Mateo (SM) y San Cristóbal (SC) y Centro (CE) excedieron el LMP. Para 2019 (Gráfica 5.2.5.2), es durante el 15 de abril cuando las EMA registraron niveles de material particulado (PM₁₀) que estaban por encima del LMP entre 88 y 180 µg/m³, seguido de enero cuando solo la estación de San Cristóbal (SC) superó el LMP. En el 15 de julio y octubre se mantuvieron dentro del rango permisible.

Cuatro estaciones: San Mateo (SM), San Cristóbal (SC), Almoloya de Juárez (AJ) y Xonacatlán (XO), durante 2020 (Gráfica 5.2.5.3), tuvieron concentraciones por encima del permisible más de 77 µg/m³ de la misma manera sucedió en el 15 de abril, sin embargo, es importante recalcar que fueron más bajas que en los años anteriores. En 2021 Centro (CE), San Mateo (SM), San Cristóbal (SC), Almoloya de Juárez (AJ) y Xonacatlán (XO), tuvieron registros de 78 a 110 µg/m³ en el 15 de enero y de igual manera en octubre estas estaciones, aunque por poco superaron el LMP, con más de 73 µg/m³, para el 15 de abril solo San Cristóbal (SC) y Almoloya de Juárez (AJ) sobrepasaron el LMP (Gráfica 5.2.5.4).

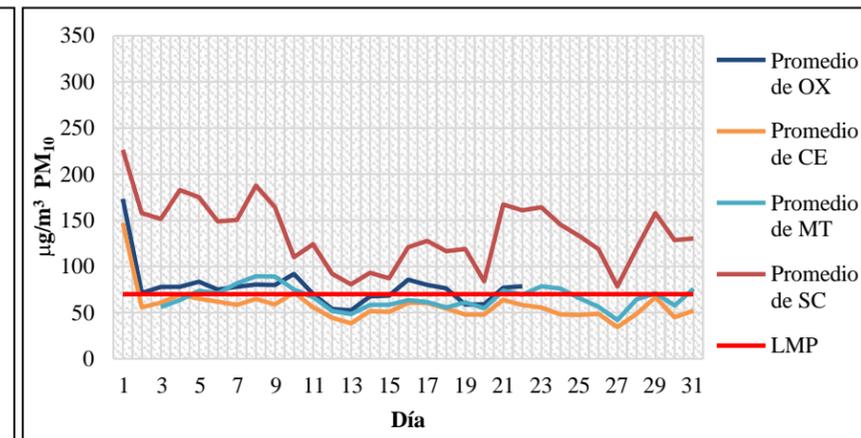
5.2.5.2 Concentraciones en enero de material particulado PM₁₀

Gráfica 5.2.5. 5 Promedio en enero de PM₁₀ por EMA 2018



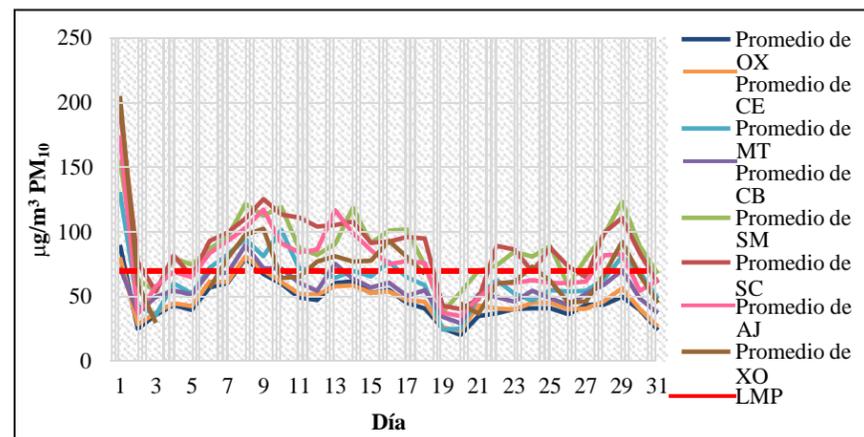
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018c).

Gráfica 5.2.5. 6 Promedio en enero de PM₁₀ por EMA 2019



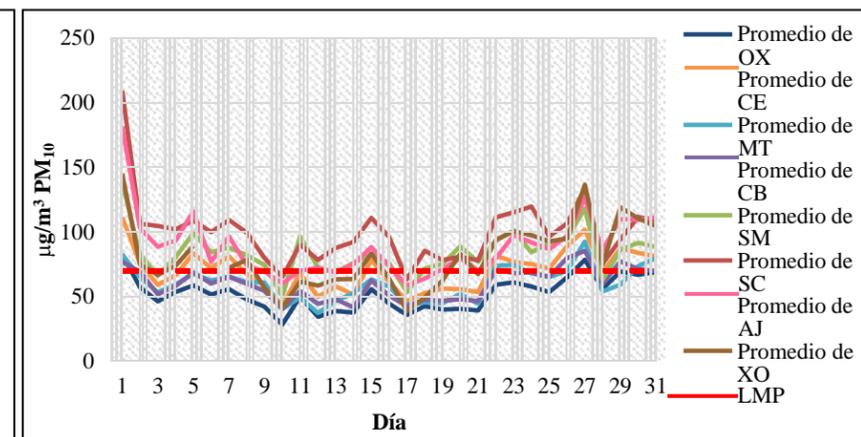
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019c).

Gráfica 5.2.5. 7 Promedio en enero de PM₁₀ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

Gráfica 5.2.5. 8 Promedio en enero de PM₁₀ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021c).

En enero 2018 las concentraciones fueron potencialmente altas en la mayoría del mes (Gráfica 5.2.5.5), sobre todo en los primeros días en donde se observa que superan los 300 µg/m³ en San Cristóbal (SC) principalmente, en los días siguientes estuvo por encima de 100 µg/m³ al igual que el resto de las estaciones, solo entre los días 28 y 29 del mes hubo un descenso en los niveles de material particulado (PM₁₀).

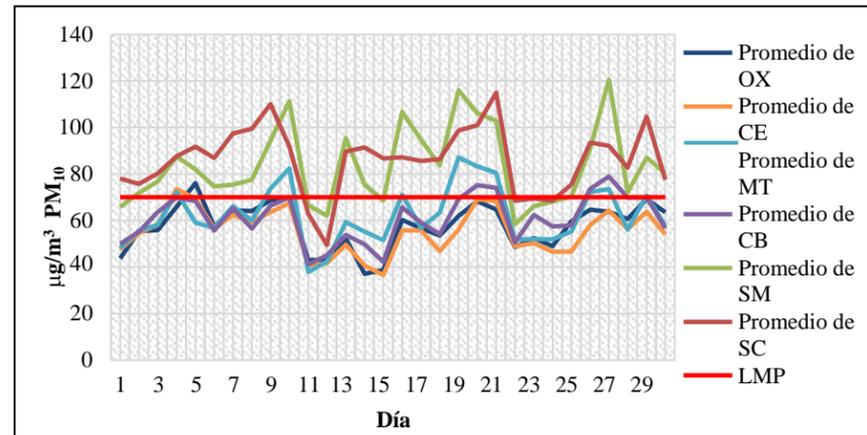
Solo cuatro estaciones reportaron datos en enero de 2019 (Gráfica 5.2.5.6) en donde San Cristóbal (SC) nuevamente estuvo en la mayoría de los días más de 100 µg/m³, Oxtotitlán (OX) llegó hasta 173 µg/m³ y solo registró datos durante 22 días, Centro (CE) 147 µg/m³ y Metepec (MT) 88.8 µg/m³, aunque estas últimas tres EMA, superaron en varios días el LMP, la mayoría del mes respetaron dicho límite.

Nuevamente en enero de 2020 los primeros días presentaron concentraciones con más de 200 µg/m³ (Gráfica 5.2.5.7) incluso un poco más bajas que en 2018 y 2019, pero el resto del mes se observa variabilidad en todas las estaciones, solo Oxtotitlán (OX), Centro (CE), Ceboruco (CB) y Metepec (MT), mantuvieron los niveles de PM₁₀ por debajo del LMP durante más de 15 días; por su parte, San Cristóbal (SC), Xonacatlán (XO) San Mateo (SM) y Almoloya de Juárez (AJ) presentaron los picos de PM₁₀ más elevados (de 79 a 123 µg/m³) superiores al LMP.

Durante 2021 (Gráfica 5.2.5.8), hay un aumento en los niveles de material particulado (PM₁₀) que se puede ver en las estaciones de Almoloya de Juárez (AJ), San Cristóbal (SC), Centro (CE) y Xonacatlán (XO), pues a pesar de mostrar descensos en las concentraciones de PM₁₀ en la mayoría de los días presentaron datos entre 85 y 136 µg/m³.

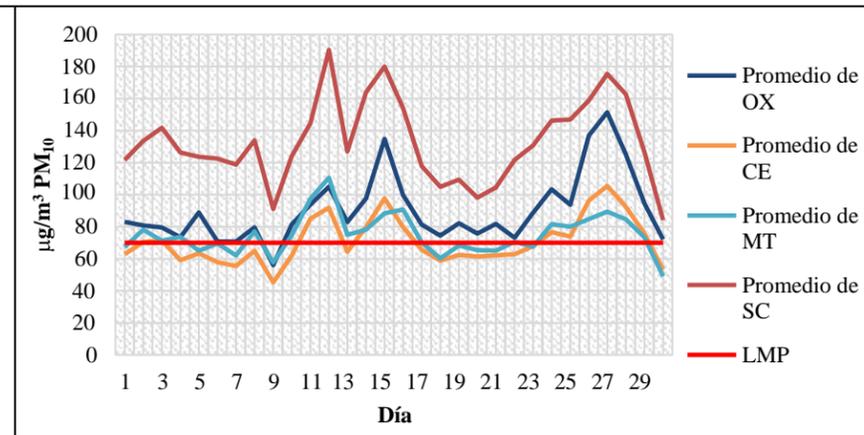
5.2.5.3 Concentraciones en abril de material particulado PM₁₀

Gráfica 5.2.5. 9 Promedio en abril de PM₁₀ por EMA 2018



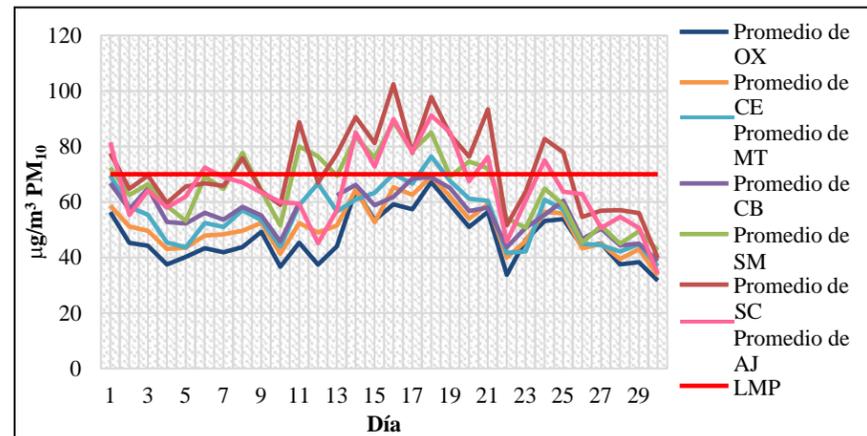
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018c).

Gráfica 5.2.5. 10 Promedio en abril de PM₁₀ por EMA 2019



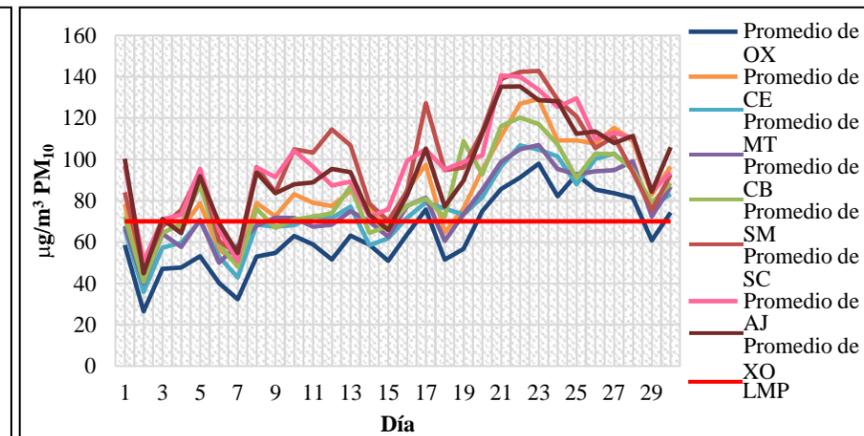
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019c).

Gráfica 5.2.5. 11 Promedio en abril de PM₁₀ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

Gráfica 5.2.5. 12 Promedio en abril de PM₁₀ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021c).

Se excedió el LMP durante abril de 2018 en la mayoría de los días en las estaciones (Gráfica 5.2.5.9), principalmente en San Cristóbal (SC) y San Mateo (SM) que muestran datos de más de 80 a 120 µg/m³, aunque el resto de las estaciones supera en algunos días el LMP se mantienen dentro de los valores permitidos.

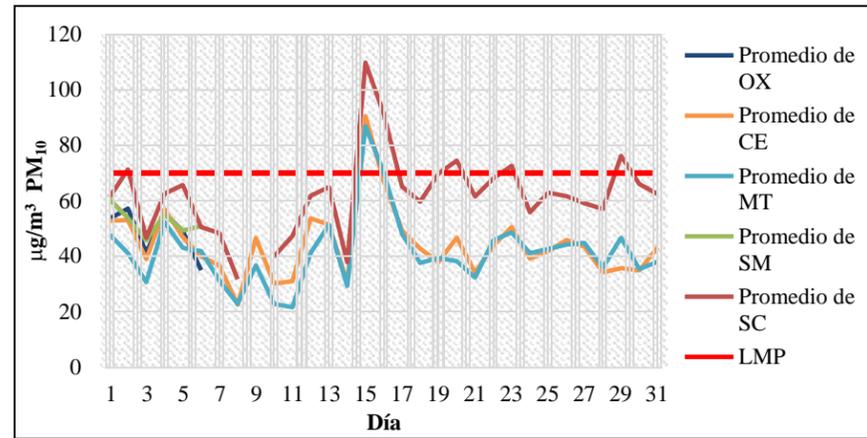
En abril de 2019 al igual que enero de 2019 solo cuatro EMA registraron datos y todas ellas superaron el LMP (Gráfica 5.2.5.10), primero Centro (CE) que, aunque en general solo presenta 10 días que exceden el límite con 85 y 105 µg/m³ seguido de Metepec (MT), fue la siguiente con solo 5 días que se encontraban dentro del permisible el resto de los días mostró valores de 78 a 110 µg/m³, posteriormente Oxtotitlán (OX) que en todo el mes rebasó el LMP y sus datos se encontraban de 88 a 151 µg/m³ finalmente San Cristóbal (SC) con las concentraciones más altas de 91 a 190 µg/m³ en todo el mes.

Hubo una disminución considerable en abril de 2020 (Gráfica 5.2.5.11) en la que solo San Cristóbal (SC), San Mateo (SM) y Almoloya de Juárez (AJ) excedieron el LMP durante más de 15 días entre los 72 y 102 µg/m³ el resto de las estaciones no superaron los 70 µg/m³ (LMP) en la mayoría de los días.

Para abril de 2021 hubo un aumento considerable en todas las estaciones (Gráfica 5.2.5.12), puesto que todas superaron el LMP en gran parte del mes a excepción de Oxtotitlán (OX) que fue la EMA que más de la mitad de abril estuvo por debajo del LMP y cuando lo superó fue la estación con los datos más bajos de 82 a 91 µg/m³, el resto en varias ocasiones superó los 100 µg/m³ entre las cuales destacan Almoloya de Juárez (AJ), San Cristóbal (SC) y Xonacatlán (XO) que alcanzaron valores de más de 130 µg/m³.

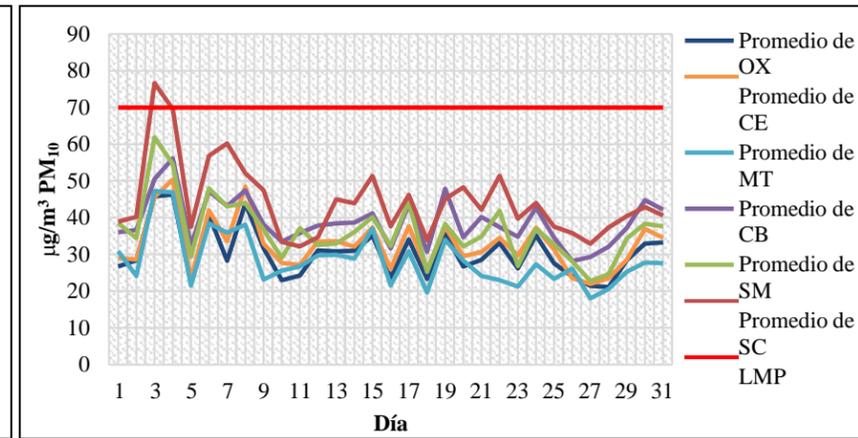
5.2.5.4 Concentraciones en julio de material particulado PM10

Gráfica 5.2.5. 13 Promedio en julio de PM₁₀ por EMA 2018



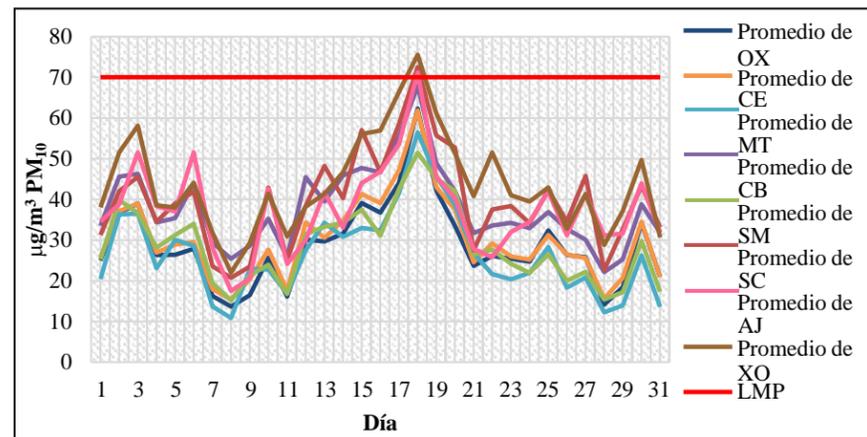
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018c).

Gráfica 5.2.5. 14 Promedio en julio de PM₁₀ por EMA 2019



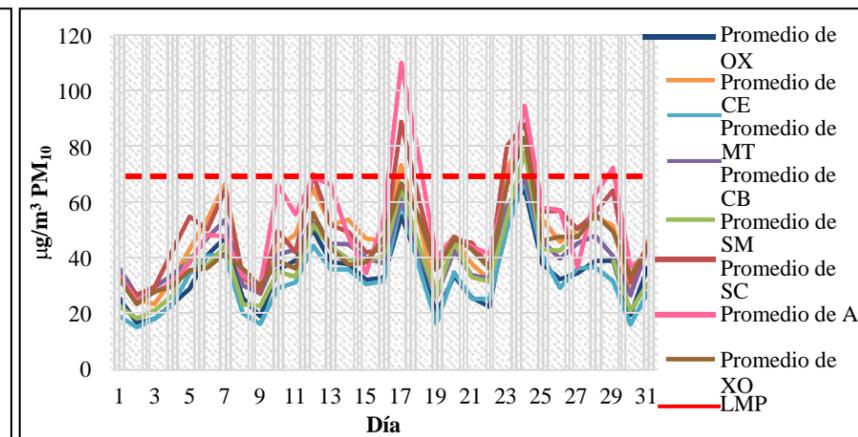
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019c).

Gráfica 5.2.5. 15 Promedio en julio de PM₁₀ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

Gráfica 5.2.5. 16 Promedio en julio de PM₁₀ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021c).

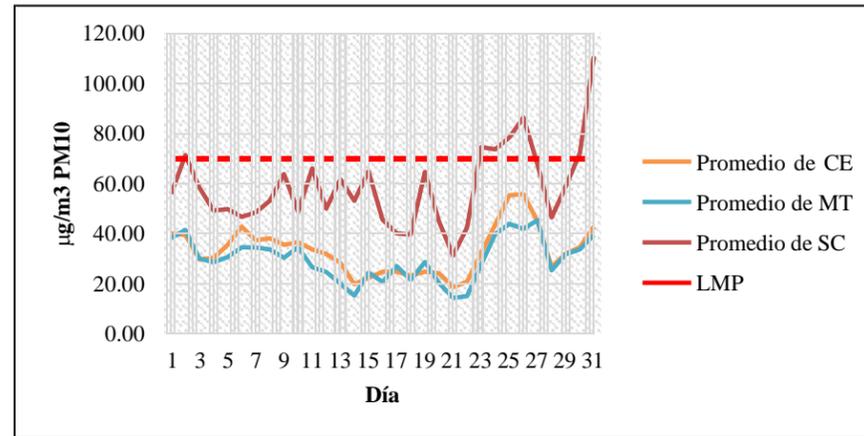
En comparación con los meses anteriores, en julio de 2018 (Gráfica 5.2.5.13) se superó el LMP 6 días del mes, en específico la estación San Cristóbal (SC), que en conjunto con Oxtotitlán (OX), San Mateo (SM) tuvieron varios días sin registrar datos, y solo Metepec (MT) y Centro (CE) reportaron durante todo el mes, y San Mateo (SM), en su mayoría fue un mes en el que se respetó el LMP, a excepción de la estación ya mencionada, incluso los niveles de contaminación son más bajos que los meses anteriores.

Por su parte julio de 2019 registro datos en donde solo la EMA de San Cristóbal (SC) rebasó el LMP un día, el resto del mes se mantuvo dentro del LMP, en todas las estaciones (Gráfica 5.2.5.14). De manera similar en 2020 el 18 de julio tres EMA superaron el LMP con menos de 75 µg/m³ dichas estaciones fueron Xonacatlán (XO), San Cristóbal (SC) y Almoloya de Juárez (AJ), a excepción de dicho día las concentraciones de material particulado (PM₁₀) se mantuvieron por debajo del LMP (Gráfica 5.2.5.15).

Caso contrario en julio de 2021 se pudo observar en la Gráfica 5.2.5.16 que por tres días las San Cristóbal (SC), Almoloya de Juárez (AJ) Xonacatlán (XO) y San Mateo (SM), tuvieron concentraciones de más de 80 µg/m³, así mismo en los otros días del mes se puede observar que hay más picos altos que, aunque no exceden el máximo permisible si son más altos en comparación con los anteriores días y años.

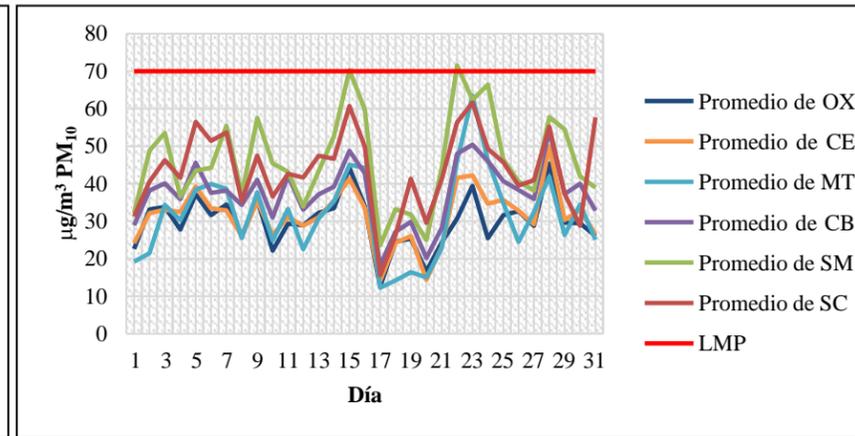
5.2.5.5 Concentraciones en octubre de material particulado PM₁₀

Gráfica 5.2.5. 17 Promedio en octubre de PM₁₀ por EMA 2018



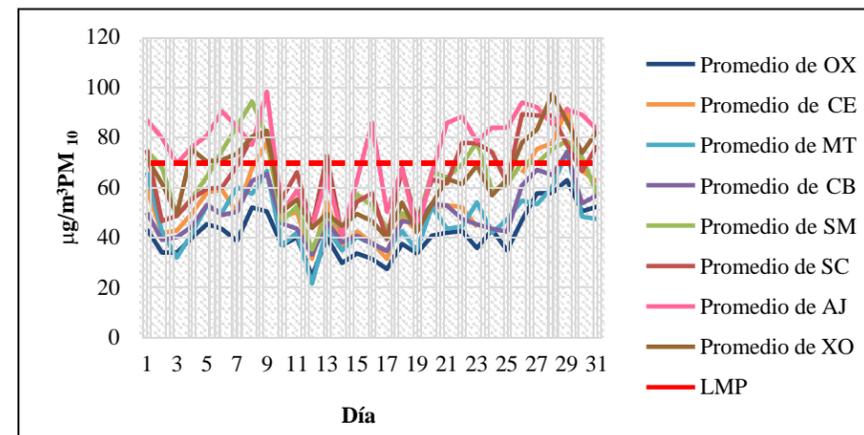
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018c).

Gráfica 5.2.5. 18 Promedio en octubre de PM₁₀ por EMA 2019



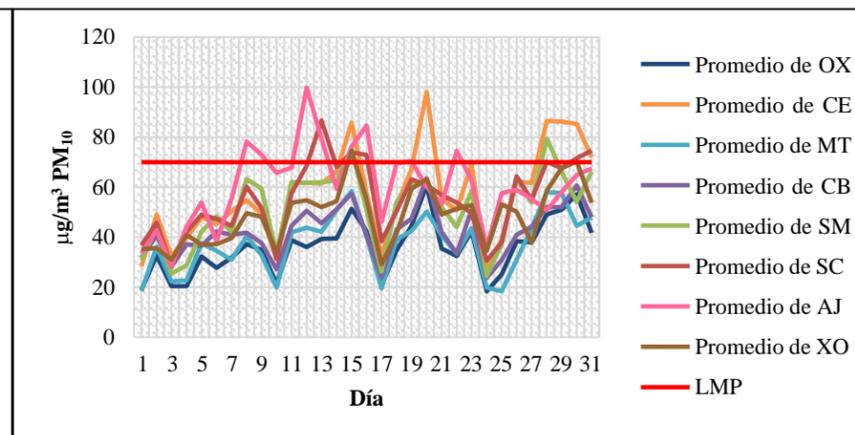
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019c).

Gráfica 5.2.5. 19 Promedio en octubre de PM₁₀ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

Gráfica 5.2.5. 20 Promedio en octubre de PM₁₀ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021c).

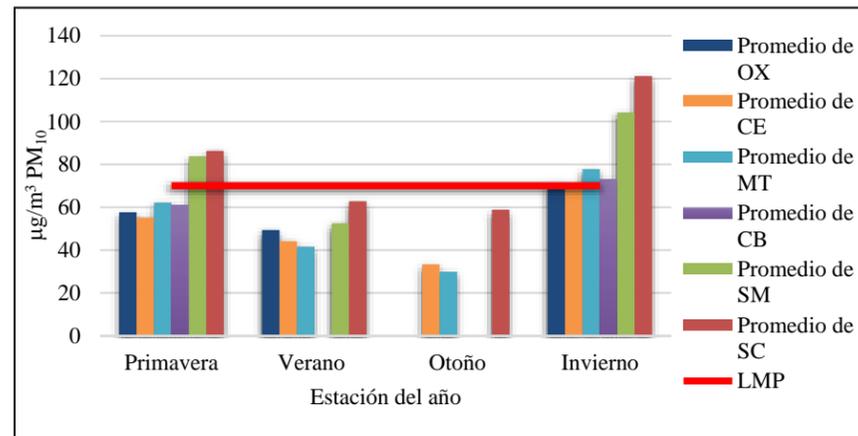
En el transcurso de octubre de 2018 solo la mitad de las estaciones registraron las concentraciones de material particulado (PM₁₀) y al igual que el mes de julio la estación San Cristóbal (SC) presentó los niveles más altos en los últimos días y la estación Metepec (MT) y Centro (CE), se mantuvieron dentro del LMP (Gráfica 5.2.5.17).

La EMA de San Mateo (SM) en octubre de 2019 (Gráfica 5.2.5.18) fue la única que supero el LMP dos veces con 71.5 µg/m³, ya en octubre de 2020 se presentan niveles más altos de material particulado (PM₁₀) (Gráfica 5.2.5.19) en Almoloya de Juárez (AJ), San Mateo (SM), San Cristóbal (SC) y Centro (CE), se mantuvieron por encima de los 80 µg/m³ hasta 98 µg/m³ rebasando el límite permisible, solo Oxtotitlán (OX) y Metepec (MT), estuvieron la mayoría del mes dentro del LMP.

Para el caso de octubre de 2021 (Gráfica 5.2.5.20), las mismas estaciones que superaron el LMP en 2020 también en 2021 excedieron los valores permisibles, aunque por menos días, presentaron datos entre 74.5 y 99.8 µg/m³.

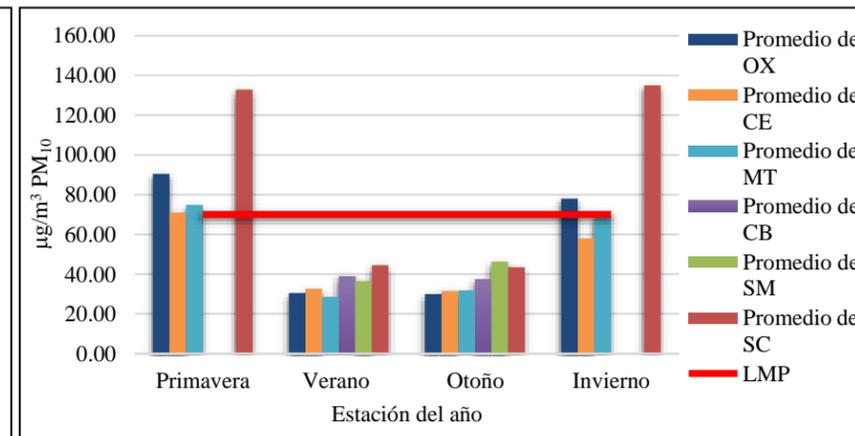
5.2.5.6 Concentraciones por estación del año de material particulado PM₁₀ 2018-2021

Gráfica 5.2.5. 21 Promedio anual de PM₁₀ por EMA 2018



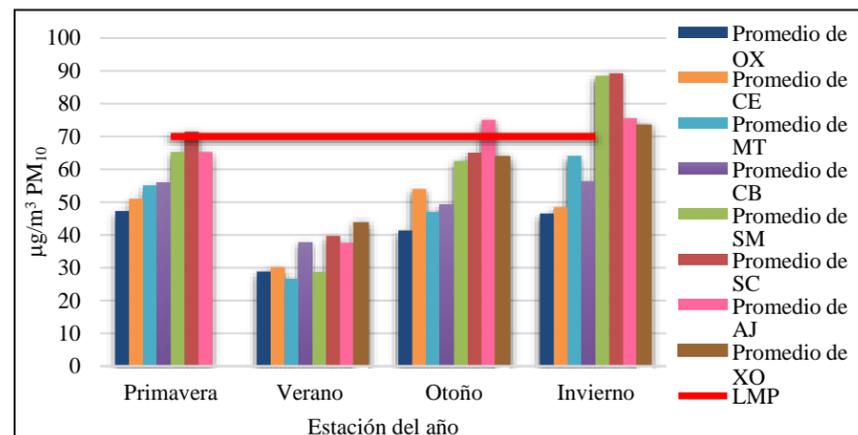
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018c).

Gráfica 5.2.5. 22 Promedio anual de PM₁₀ por EMA 2019



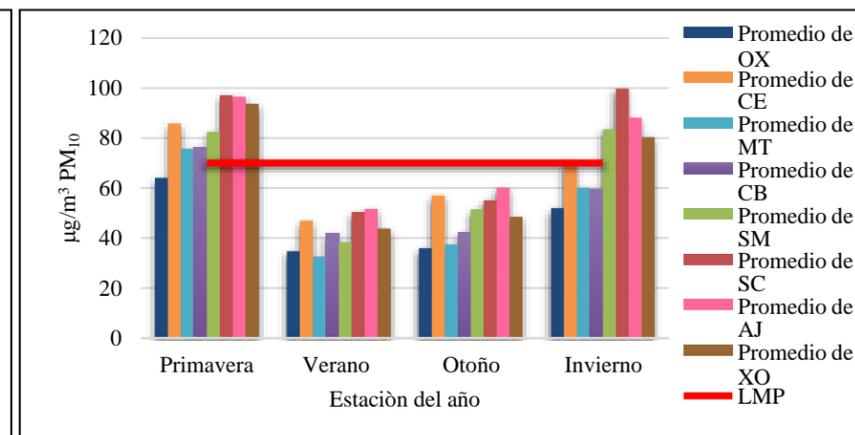
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019c).

Gráfica 5.2.5. 23 Promedio anual de PM₁₀ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

Gráfica 5.2.5. 24 Promedio anual de PM₁₀ por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021c).

El LMP en 2018 (Gráfica 5.2.5.21), fue excedido durante el primavera e invierno en las estaciones San Mateo (SM) y San Cristóbal (SC) principalmente, durante el verano solo se registraron datos en cinco estaciones y en otoño solo tres, a pesar de ello en estas estaciones del año no se superaron el LMP.

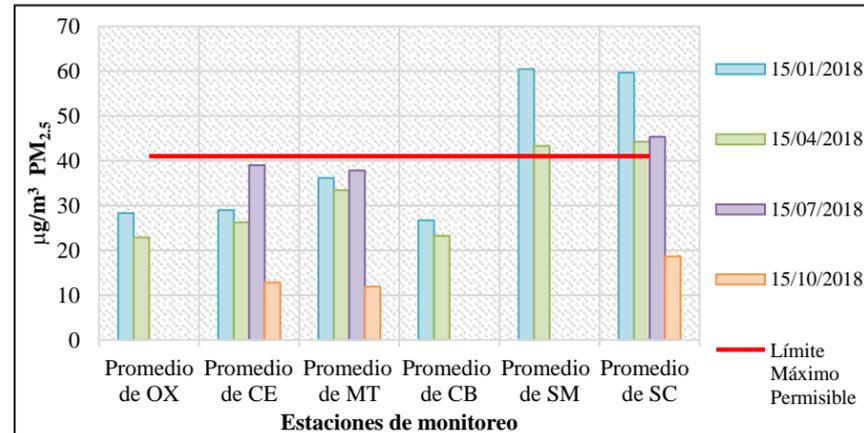
En el caso de 2019, nuevamente es en primavera e invierno cuando se sobrepasa el LMP, y en estas temporadas del año no todas las EMA registraron datos (Gráfica 5.2.5.22). Durante 2021 es primavera, otoño e invierno las estaciones en las que se exceden los valores permitidos (Gráfica 5.2.5.23) y solo en verano se mantuvieron por debajo de los 70 µg/m³ a pesar de ello son concentraciones más altas en comparación con el 2019.

Solo primavera e invierno tuvieron datos elevados por encima del LMP en 2021 (Gráfica 5.2.5.24) en la mayoría de las estaciones, en verano y otoño se respetó el LMP, pero fueron concentraciones altas en comparación con el 2019 y 2020 en este último principalmente en verano.

5.2.6 Concentraciones de material particulado PM_{2.5} 2018-2021

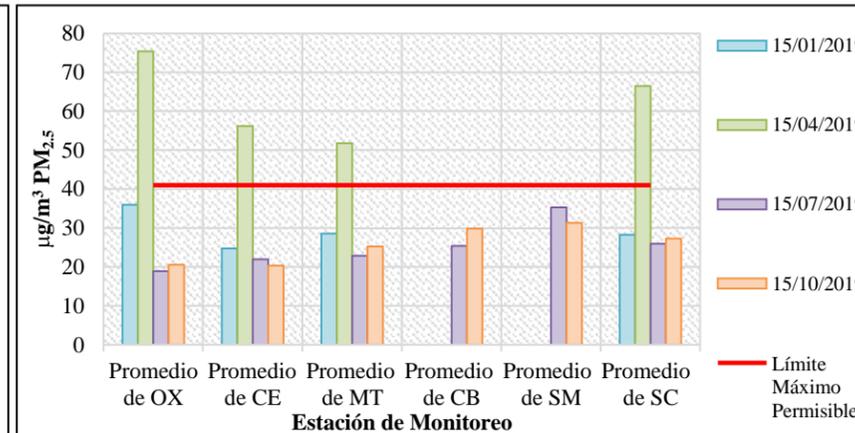
5.2.6.1 Concentraciones por día de material particulado PM_{2.5}

Gráfica 5.2.6. 1 Promedio por día de PM_{2.5} por EMA 2018



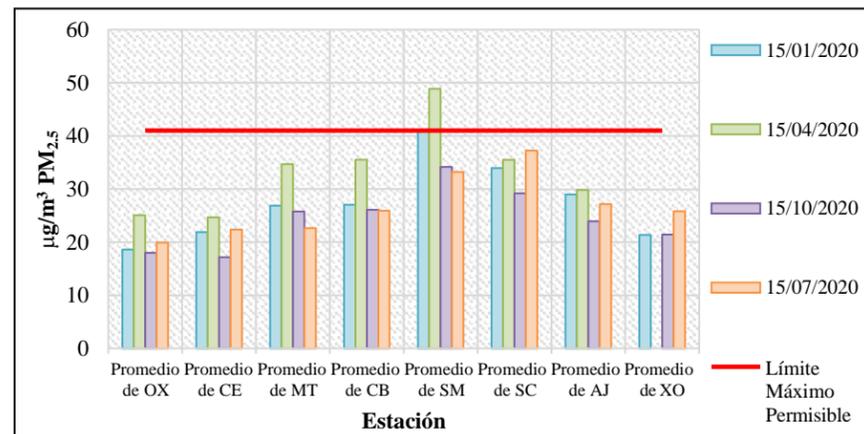
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018d).

Gráfica 5.2.6. 2 Promedio por día de PM_{2.5} por EMA 2019



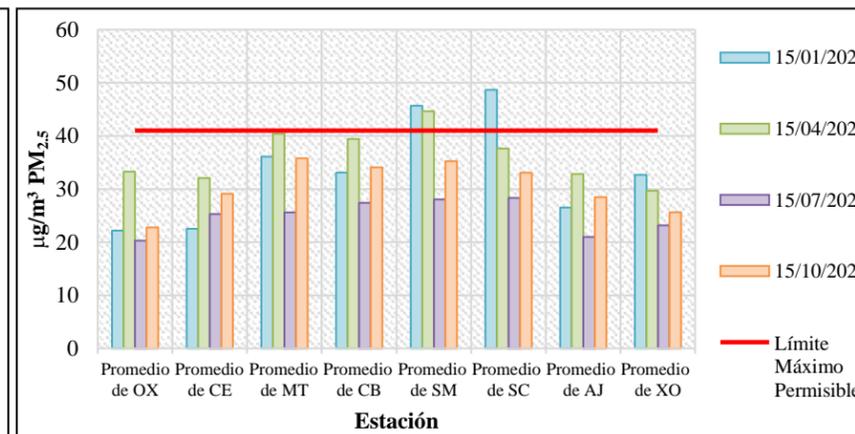
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019d).

Gráfica 5.2.6. 3 Promedio por día de PM_{2.5} por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020d).

Gráfica 5.2.6. 4 Promedio por día de PM_{2.5} por EMA 2021



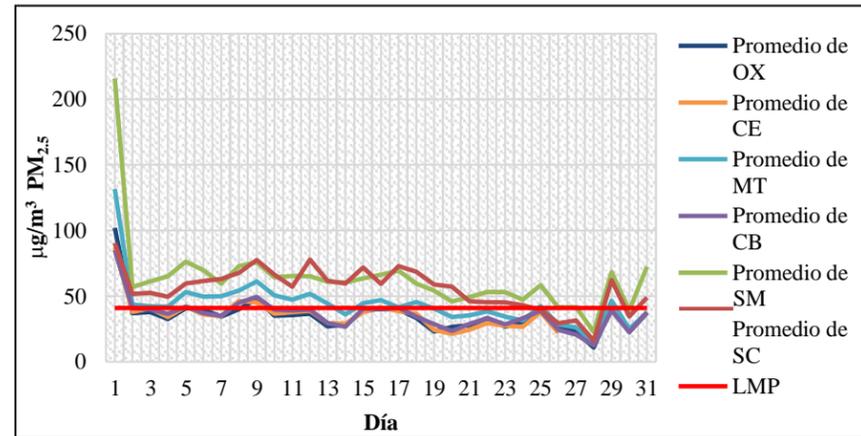
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

Como se observa en enero de 2018 (Gráfica 5.2.6.1) tres estaciones Oxtotitlán (OX), Ceberuco (CB), y San Mateo (SM) no registraron datos del día 15, así mismo en enero, abril y julio fue cuando se superó el LMP con más de 40 µg/m³ en las estaciones de San Mateo (SM) y San Cristóbal (SC). Durante el 2019 (Gráfica 5.2.6.2) se excedió el LMP, en todas las estaciones que registraron el 15 de abril con datos entre 51.8 y 75.4 40 µg/m³ en Oxtotitlán (OX) Centro (CE), Metepec (MT) y San Cristóbal (SC).

Hubo una disminución en durante 2020 (Gráfica 5.2.6.3) en la que solo la estación San Mateo (SM), tuvo 48.9 40 µg/m³ por encima del LMP el resto de las estaciones presentaron concentraciones menores entre 17 y 37 µg/m³. Por el contrario, en 2021 la estaciones muestran un ligero aumento San Mateo (SM) supero el límite dos veces en el 15 de enero con 45.7 µg/m³ y el 15 de abril con 44.6 µg/m³, San Cristóbal (SC) por su parte una vez el 15 de enero con 48.7 µg/m³ (Gráfica 5.2.6.4).

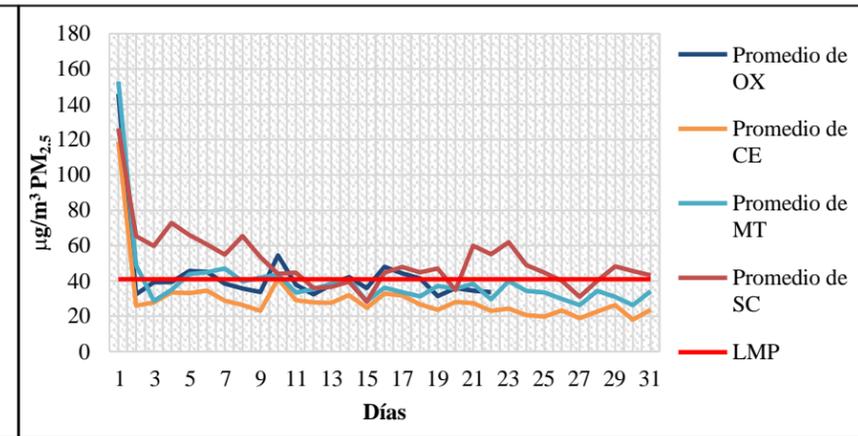
5.4.6.2 Concentraciones en enero de material particulado PM_{2.5}

Gráfica 5.2.6. 5 Promedio en enero de PM_{2.5} por EMA 2018



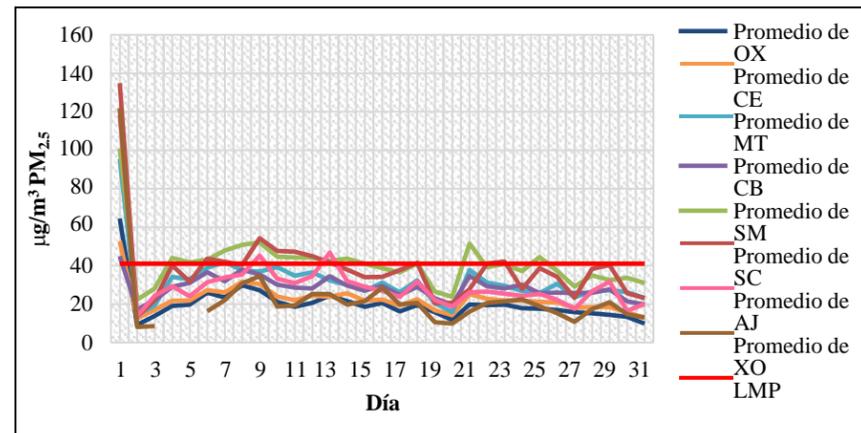
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018d).

Gráfica 5.2.6. 6 Promedio en enero de PM_{2.5} por EMA 2019



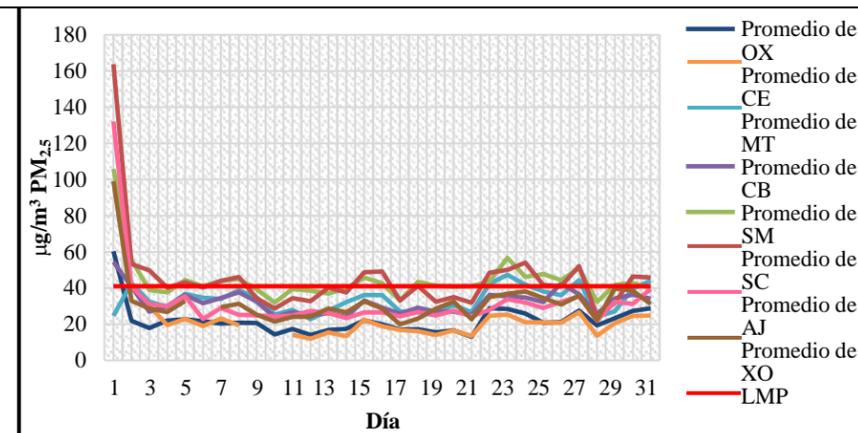
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019d).

Gráfica 5.2.6.7 Promedio en enero de PM_{2.5} por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020d).

Gráfica 5.2.6. 8 Promedio en enero de PM_{2.5} por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

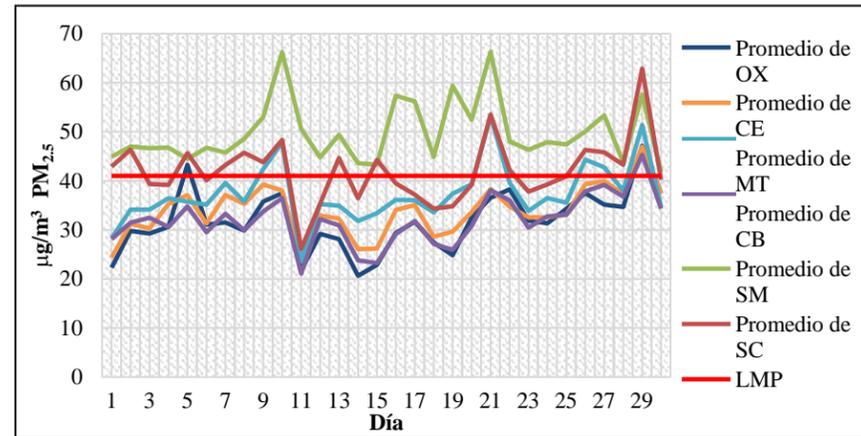
Enero de 2018 presentó concentraciones elevadas en los primeros días superando de 100 hasta 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ la estación de San Mateo (SM), San Cristóbal (SC), las cuales en la mayoría del mes superaron el LMP, aunque el resto como Centro (CE) y Oxtotitlán (OX) se mantuvieron dentro del máximo permisible en gran parte del mes (Gráfica 5.2.6.5).

Solo cuatro estaciones monitorearon las concentraciones de material particulado (PM_{2.5}) en enero de 2019 (Gráfica 5.2.6.6) al igual que en el año pasado muestran altos niveles del contaminante, sin embargo, son menores pues llegaron a 153 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el resto del mes San Cristóbal (SC) mantuvo registros por encima del LMP en conjunto con Metepec (MT) y Oxtotitlán que este ultima dejo de recabar datos los últimos diez días y Centro (CE) permaneció dentro del LMP.

Se redujeron las concentraciones de los primeros días en enero de 2020 en donde se presentaron desde 41 a 134 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en donde la EMA de San Cristóbal (SC) fue la que presento puntos altos en los días siguientes en conjunto con San Mateo (SM) (Gráfica 5.2.6.7) y las otras estaciones se mantuvieron por debajo de los 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ya en enero de 2021 hubo un tenue incremento en los niveles de material particulado (PM_{2.5}) (Gráfica 5.2.6.8) pues el máximo se presentó en los primeros días en San Cristóbal (SC) con 163 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de igual manera en 2020 esta EMA presento punto altos en lo que quedaba del mes, al igual que San Mateo (SM) y Metepec (MT).

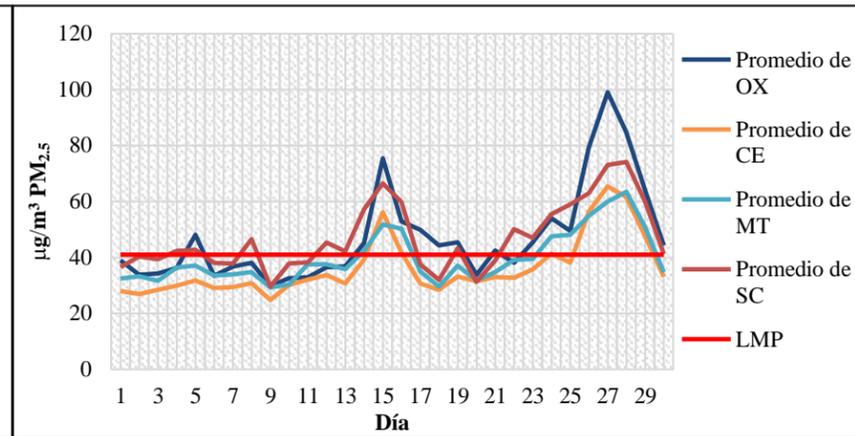
5.2.6.3 Concentraciones en abril de material particulado PM_{2.5}

Gráfica 5.2.6. 9 Promedio en abril de PM_{2.5} por EMA 2018



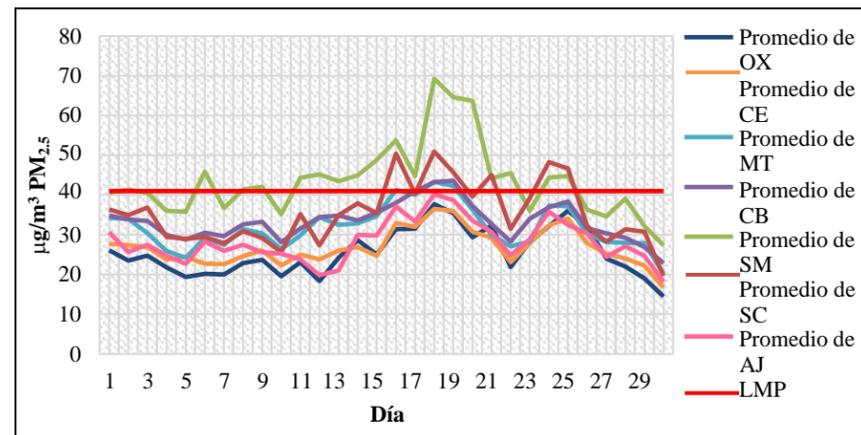
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018d).

Gráfica 5.2.6. 10 Promedio en abril de PM_{2.5} por EMA 2019



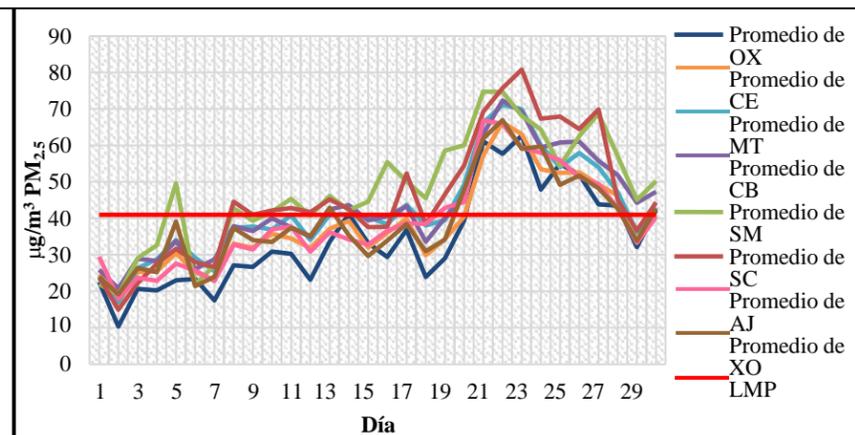
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019d).

Gráfica 5.2.6. 11 Promedio en abril de PM_{2.5} por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020d).

Gráfica 5.2.6. 12 Promedio en abril de PM_{2.5} por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

En el mes de abril de 2018 dos estaciones contantemente superaron el LMP (Gráfica 5.2.6.9), estas fueron San Mateo que alcanzó 66 µg/m³ y San Cristóbal (SC) con un máximo de 62.8 µg/m³, además a final de mes se puede observar que todas las estaciones presentaron concentraciones con más de 41 µg/m³.

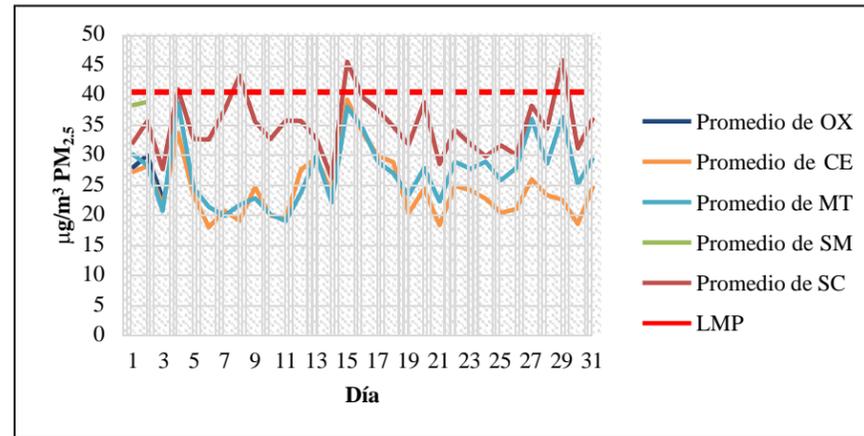
Abril de 2019 presenta registros solo de cuatro estaciones (Gráfica 5.2.6.10) con niveles elevados de material particulado (PM_{2.5}) en casi todo el mes sobre todo las estaciones de San Cristóbal (SC) con datos entre 46 y 74 µg/m³ y Oxtotitlán (OX) el cuál mostro los puntos más altos 75 y 99 µg/m³, la estación Centro (CE) y Metepec (MT) fueron las que se mantuvieron más días dentro del LMP.

Cuatro EMA fueron las que rebasaron el LMP en abril de 2020 (Gráfica 5.2.6.11), San Mateo (SM) con 45 a 69 µg/m³, San Cristóbal (SC) entre 45 y 50 µg/m³, Metepec (MT) y Ceboruco (CB) estas dos últimas con no más de 45 µg/m³, las otras estaciones se permanecieron en el LMP a excepción de Xonacatlán (XO) la cuál no reporto datos en todo el mes.

Todas las estacione en abril de 2021 extralimitaron el LMP a partir del día 20 (Gráfica 5.2.6.12), se dispararon las concentraciones de material particulado (PM_{2.5}) en un rango de 47 a 60 µg/m³ y aunque el día 29 muestran un descenso para el día 30 estas vuelven a incrementar por encima del LMP.

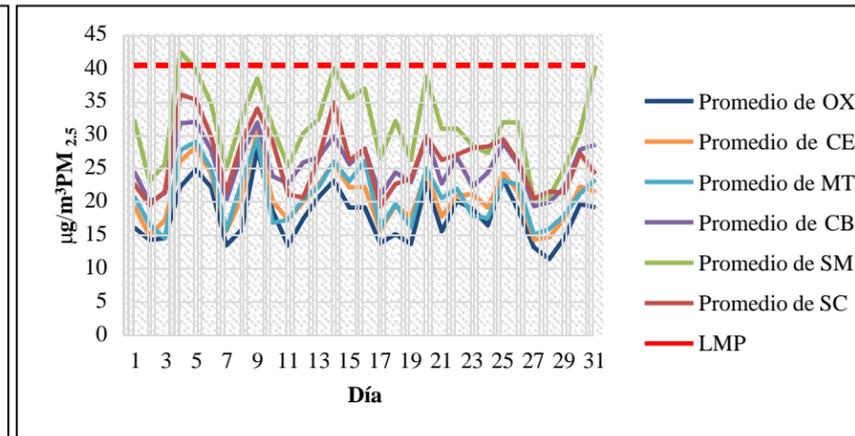
5.2.6.4 Concentraciones en julio de material particulado PM_{2.5}

Gráfica 5.2.6. 13 Promedio en julio de PM_{2.5} por EMA 2018



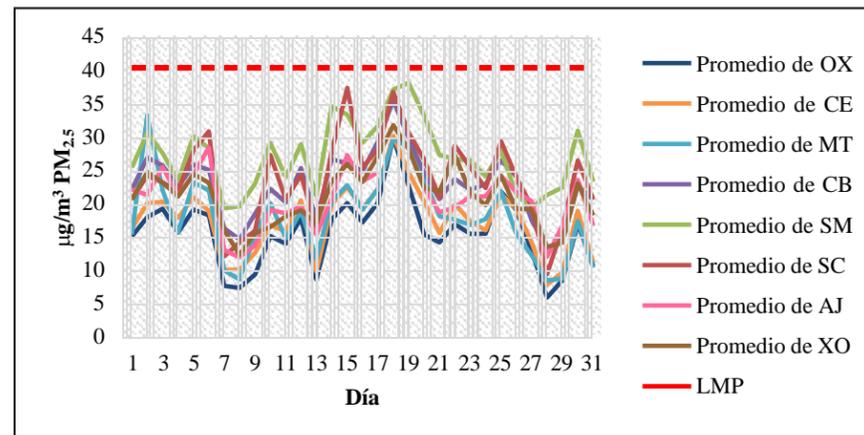
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018d).

Gráfica 5.2.6. 14 Promedio en julio de PM_{2.5} por EMA 2019



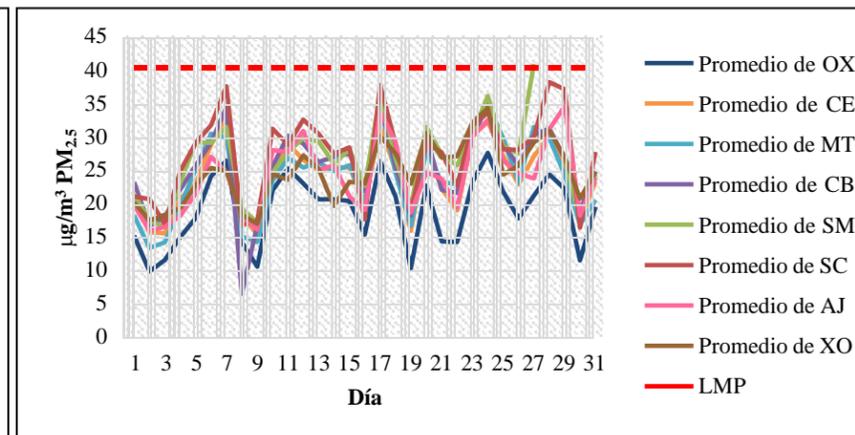
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019d).

Gráfica 5.2.6. 15 Promedio en julio de PM_{2.5} por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020d).

Gráfica 5.2.6. 16 Promedio en julio de PM_{2.5} por EMA 2021



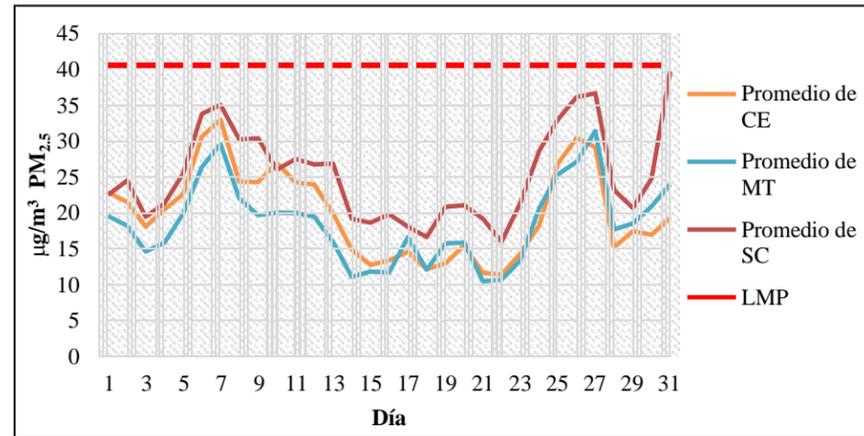
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

Para el mes de julio de 2018 (Gráfica 5.2.6.13) solo Centro (CE), Metepec (MT) y San Cristóbal (SC) registraron las concentraciones de material particulado (PM_{2.5}), la última excedió el LMP por tres días con 45 µg/m³ y el resto se mantuvo por debajo del límite; en conjunto julio de 2019 (Gráfica 5.2.6.14) solo supero el LMP un día con 42 µg/m³ en San Mateo (SM), Oxtotitlán por su parte mostró los niveles más bajos con menos de 20 µg/m³ durante varios días.

De la misma manera julio de 2020 presenta datos menores al LMP en todas las EMA (Gráfica 5.2.6.15), siendo Oxtotitlán (OX), Centro (CE) y Metepec las que exhiben los datos más bajos, en algunos casos por debajo de los 10 µg/m³. Ya para julio de 2021 aunque se observa gran variabilidad en los niveles de material particulado (PM_{2.5}) en todos los días, estos respetan el LMP y nuevamente Oxtotitlán (OX) junto con Ceberuco (CB) reportan datos mínimos entre 6.4 y 14.1 µg/m³ (Gráfica 5.2.6.16)

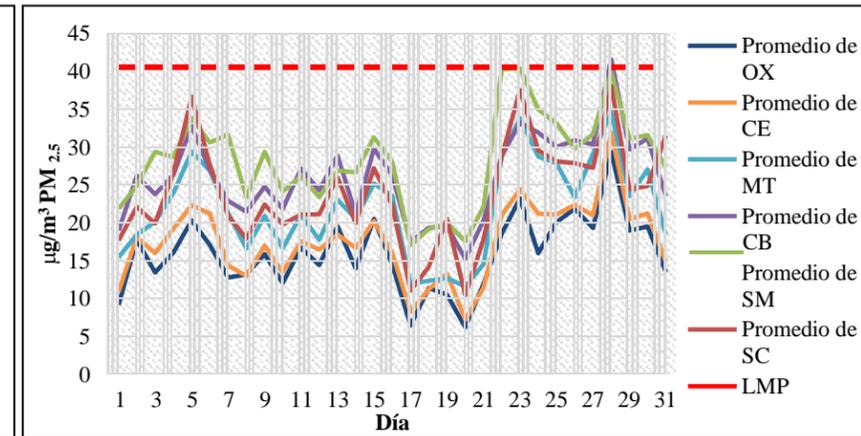
5.2.6.5 Concentraciones en octubre de material particulado PM_{2.5}

Gráfica 5.2.6. 17 Promedio en octubre de PM_{2.5} por EMA 2018



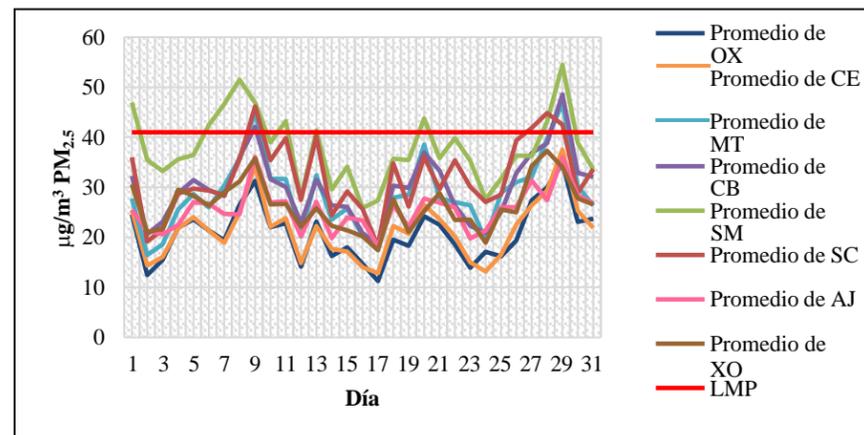
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018d).

Gráfica 5.2.6. 18 Promedio en octubre de PM_{2.5} por EMA 2019



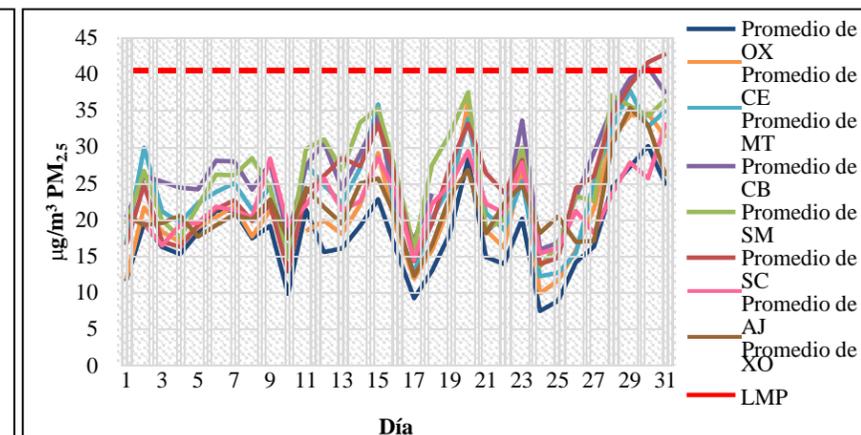
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019d).

Gráfica 5.2.6.19 Promedio en octubre de PM_{2.5} por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020d).

Gráfica 5.2.6. 20 Promedio en octubre de PM_{2.5} por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

A diferencia de los otros meses (enero y abril) en octubre de 2018 no se supera el LMP (Gráfica 5.2.6.17), aunque durante los 31 días solo se registraron datos provenientes de Centro (CE), Metepec (MT) y San Cristóbal (SC), las concentraciones se mantuvieron entre 10.5 y 38 µg/m³ y en todo el mes.

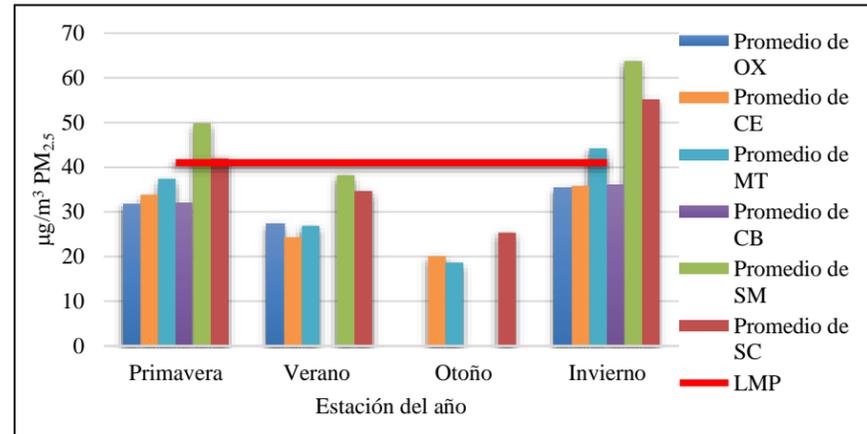
En octubre de 2019 (Gráfica 5.2.6.18), de la misma manera Oxtotitlán (OX) y Centro (CE) al igual que en julio de 2019 registraron los datos más bajos de material particulado (PM_{2.5}) en este caso de 7 a 24 µg/m³ y aunque las otras estaciones tuvieron concentraciones más altas estas no sobrepasaron el LMP.

Octubre de 2020 (Gráfica 5.2.6.19) tiene un aumento de principalmente en San Mateo (SM) que llegó hasta los 54.5 µg/m³, Ceboruco (CB) con 48.5 µg/m³ y San Cristóbal (SC) con 46 µg/m³, así mismo Oxtotitlán (OX) y Centro (CE) aunque presentan un incremento en sus registros estas se mantuvieron como las estaciones con los niveles más bajos del contaminante.

Finalmente, en octubre de 2021 hay un descenso que se refleja en las 8 EMA (Gráfica 5.2.6.20), si bien solo San Cristóbal (SC) se encontró por encima del LMP un día, las demás estaciones permanecieron con menos de 40 µg/m³ a pesar de tener concentraciones distintas cada día.

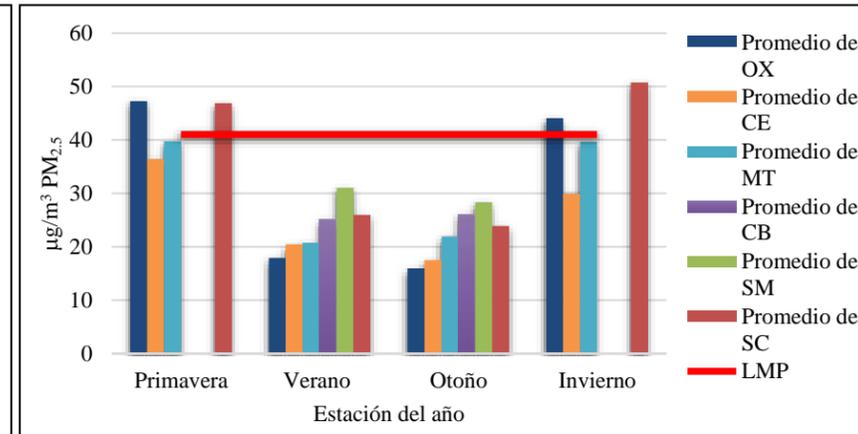
5.2.6.6 Concentraciones por estación del año de material particulado PM_{2.5}

Gráfica 5.2.6. 21 Promedio anual de PM_{2.5} por EMA 2018



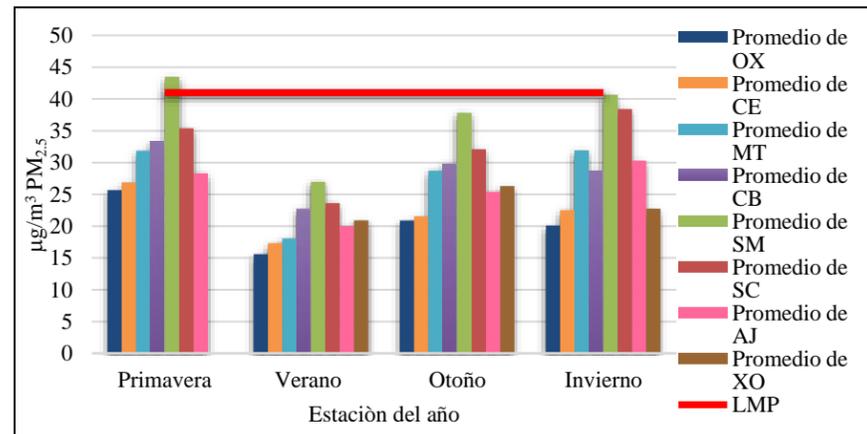
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018d).

Gráfica 5.2.6. 22 Promedio anual de PM_{2.5} por EMA 2019



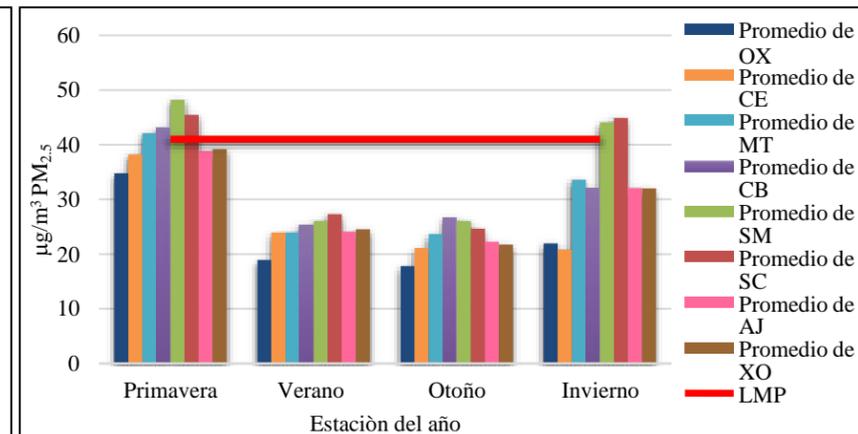
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019d).

Gráfica 5.2.6. 23 Promedio anual de PM_{2.5} por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020d).

Gráfica 5.2.6. 24 Promedio anual de PM_{2.5} por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

Al igual que con el material particulado (PM₁₀) las concentraciones de material particulado (PM_{2.5}) mantienen la tendencia: en primavera e invierno se presentan los niveles más elevados por encima del LMP, mientras que en verano y otoño se mantienen dentro de lo establecido en la norma. En 2018 (Gráfica 5.2.6.21) aunque no todas las estaciones reportaron datos son San Mateo (SM) y San Cristóbal (SC) las que tienen los niveles más altos en todo el año. Mismo caso en 2019 aun cuando Oxtotitlán (OX) durante la primavera e invierno tenía de los datos más altos para el contaminante (Gráfica 5.2.6.22).

En 2020 primavera, otoño e invierno tuvieron un alto nivel de material particulado (PM_{2.5}) en las primeras dos EMA mencionadas anteriormente, aunque no superaron por mucho el LMP (Gráfica 5.2.6.23) y por último en 2021 sucedió lo mismo que en 2018 (Gráfica 5.2.6.24).

5.3 Dinámica de vientos en la ZMVT

De las diferentes variables meteorológicas se eligieron la dirección y velocidad de viento, con la finalidad de observar si esta variable influye en las concentraciones de los contaminantes criterio al igual que observar su comportamiento en las estaciones del año, por medio de rosas de viento elaboradas con los datos de la RAMA en el programa WRPLOT View.

CONAGUA (2016), menciona que el viento es parte de la energía que circula en la atmósfera, su movimiento no siempre es regular y por ello se mide el movimiento y la velocidad, la velocidad del viento puede medirse en dos unidades metros sobre segundo (m/s) o kilometro por hora (k/h) y se considera que es la distancia que recorre una partícula de aire por unidad de tiempo se mide con anemómetros en las estaciones meteorológicas y también en las estaciones de monitoreo atmosférico.

Así mismo el viento horizontal medio que se cuantifica en coordenadas desde el norte geográfico para determinar su movimiento y dirección (Organización Meteorológica Mundial, 2014).

La medición de la velocidad y dirección del viento es complicado e irregular ya que se ve influenciada por los aspectos orográficos de cada zona, además de la rugosidad del suelo fuentes de calor, y en el caso de las zonas metropolitanas la presencia de edificios, por ello es importante el movimiento y velocidad de este, pues permite que los contaminantes alcancen o superen niveles peligrosos en la atmósfera (CONAGUA, 2016).

Francis Beaufort estableció lo que se conoce como la Escala de Beaufort, la cual sirve para clasificar la velocidad del viento en el mar, sin embargo, esta se adaptó a lo que se observa a nivel terrestre, permite conocer las características que presenta cada rango de velocidades y lo que se espera en la superficie en la Tabla 5.1 (Organización Meteorológica Mundial, 2014), dicha escala permitirá clasificar el tipo de viento que se presenta en la ZMVT de acuerdo a los datos que fueron proporcionados por la RAMA, y con ello conocer el comportamiento que tienen y como influyen en la dispersión de los contaminantes criterio.

Tabla 5. 1 Escala de Beaufort.

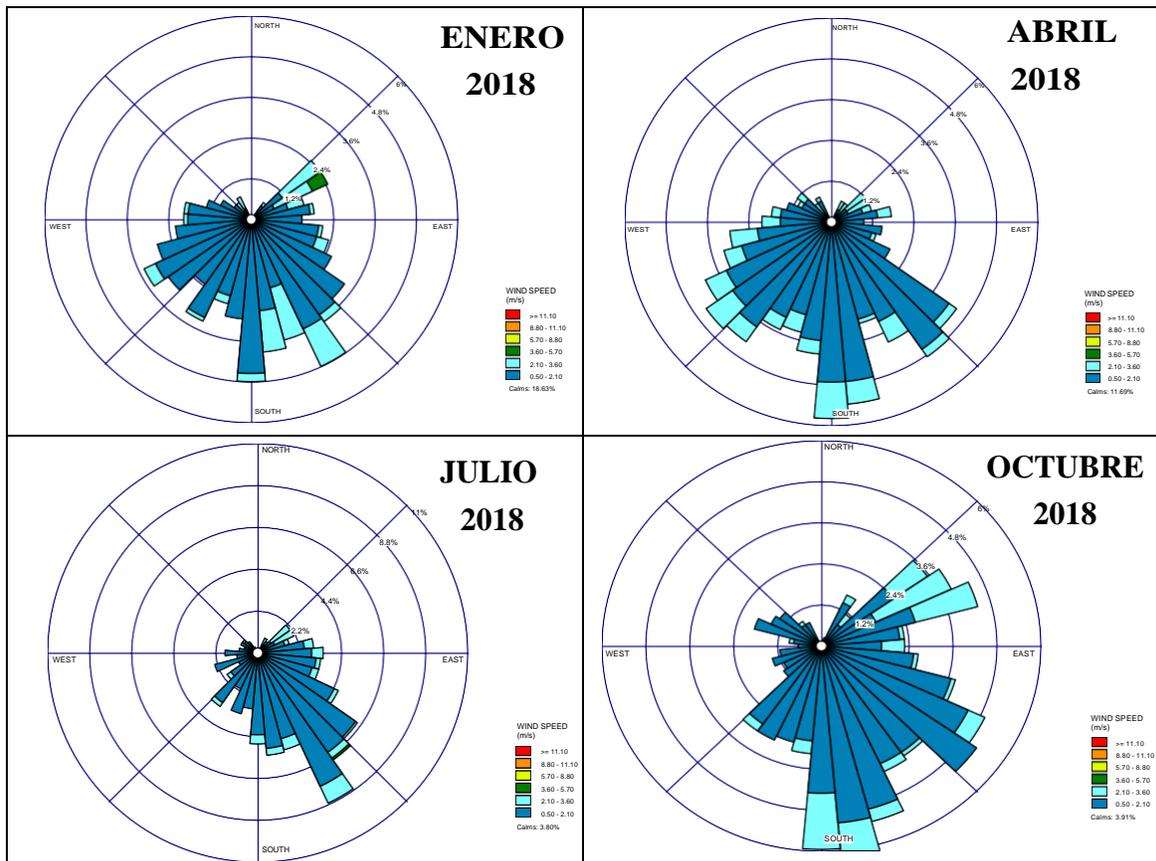
| Fuerza Beaufort | Nombre | Equivalencia de la velocidad a una altura tipo de 10 m sobre el terreno llano o descubierto | | | Características para la estimación de la velocidad en la tierra |
|-----------------|-----------------|---|------------|-----------|---|
| | | Nudos | m/s | k/h | |
| 0 | Calma | 1 | 0-0.2 | 2 | El humo sube verticalmente. |
| 1 | Ventolina | 1-3 | 0.3-1.5 | 1-5 | La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas. |
| 2 | Brisa muy débil | 4-7 | 1.6-3.3 | 6-11 | El viento se percibe en el rostro, las hojas se agitan y la veleta se mueve. |
| 3 | Brisa débil | 8-12 | 3.4-5.4 | 12-19 | El viento despliega banderolas. |
| 4 | Brisa moderada | 13-18 | 5.5-7.9 | 20-28 | El viento levanta el polvo, hojas de papel y ramas. |
| 5 | Brisa fresca | 19-24 | 8.0-10.7 | 29-38 | Los arbustos con hojas se balancean, se forman olitas con cresta en las aguas (estanques). |
| 6 | Viento fresco | 25-31 | 10.8-13.8 | 39-49 | Las grandes ramas se agitan, los hilos telegráficos silban, el uso de paraguas se hace difícil. |
| 7 | Viento fuerte | 32-38 | 13.9-17.1 | 50-61 | La marcha en contra del viento es penosa. |
| 8 | Viento duro | 39-46 | 17.2-20.7 | 62-74 | El viento rompe las ramas es imposible la marcha contra el viento. |
| 9 | Viento muy duro | 47-54 | 20.8-24.4 | 75-88 | El viento ocasiona ligeros daños en viviendas. |
| 10 | Temporal | 55-63 | 24.5-28.4 | 89-102 | Raro en continentes; árboles arrancados, importantes daños en viviendas. |
| 11 | Borrasca | 64-72 | 28.5-32.6 | 103-117 | Es raro causando daños extensos. |
| 12 | Huracán | 73 o más | 32.7 o más | 118 o más | Estragos graves y extensos. |

Fuente: (CONAGUA, 2016).

5.3.1 Dirección y velocidad del viento 2018

Como se observa en la Figura 5.1 durante el primer mes los vientos predominan hacia el sur y sureste de la ZMVT con un 18.63% de calmas, velocidad entre 0.5 y 2.1 m/s en un 68% clasificando entre una ventolina y una brisa muy débil, 10.2% entre 2.1 y 3.6 m/s considerando entre brisa muy débil y débil y por último el 0.5% de brisa débil con 5.7 m/s, lo que quiere decir que durante enero las brisas, aunque mínimas en comparación con la ventolina permitieron el movimiento de partículas en el valle. Durante abril las calmas se redujeron para ser del 11.69 %, así mismo el 67% predomino entre los 1.2 y 2.1 m/s (ventolina y brisa muy débil) y el 13% se presentó una brisa débil con 3.6 m/s en dirección al sureste y suroeste. En julio la dirección fue hacia el sureste, el 0.1% fue una brisa moderada con 5.7 m/s además el 9.4%, una brisa débil (3.6 m/s), por otra parte, predomino una ventolina con una velocidad de 1.2 m/s en un 77.8%, finalmente solo un 3.8% fueron calmas durante el mes. En octubre por su parte predominaron velocidades entre 0.5 a 1.21 m/s (ventolina) con 74.7% de frecuencia, 12.2% de brisa débil (2.1 a 3.6 m/s) y solo un 3.91% de calmas, estas velocidades tuvieron movimiento hacia el noreste y sureste principalmente.

Figura 5. 3 Rosa de vientos 2018 ZMVT

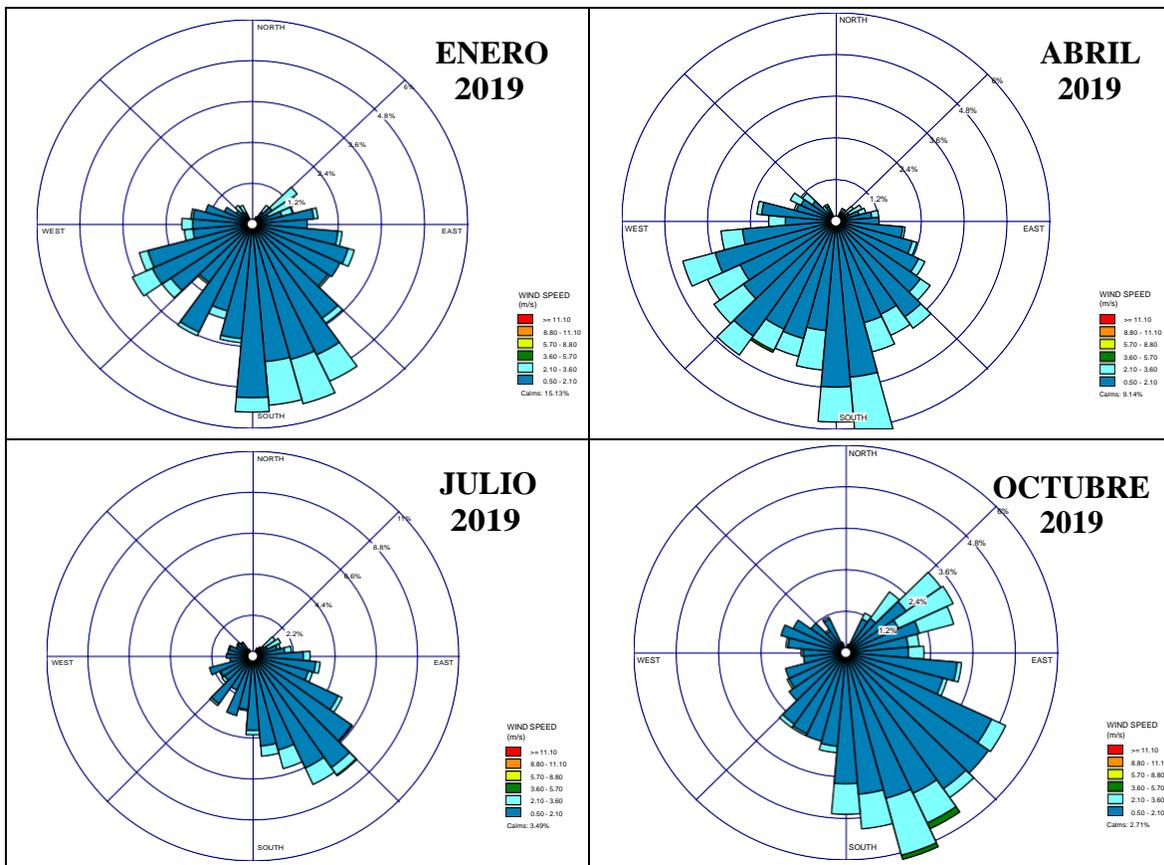


Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018g).

5.3.2 Dirección y velocidad del viento 2019

A comparación del año anterior las calmas en enero (Figura 5.2) se redujeron al 15.13%, y la ventolinas se presentaron en un 70.5% en una velocidad de 1.01 m/s a 2.1 m/s, también una brisa débil con 10% con 3.6 m/s con una dirección predominante al sureste y suroeste. En abril igualmente las calmas redujeron a la mitad al 9.14%, ventolina de 1.3 m/s en un 65.5%, al igual que una brisa débil de 3.6 m/s (18.1%) y el 0.1 % de brisa moderada (5.7%) en dirección al suroeste y sureste principalmente. Durante julio los vientos se dirigieron al sureste con solo 3.49% de calmas y 82% de ventolinas con 1.12 m/s, y un 6.1% de brisa muy débil y débil entre los 2.1 y 3.6 m/s. Por último, en octubre las calmas fueron del 2.71% un 76.6% de ventolinas de 1.3 m/s, las brisas muy débiles y débiles se presentaron entre los 2.1 y un 3.6 m/s con un 12.1% y solo el 0.6% son brisas moderadas de 5.7 m/s en dirección al sureste y noreste.

Figura 5. 4 Rosa de vientos 2019 ZMVT

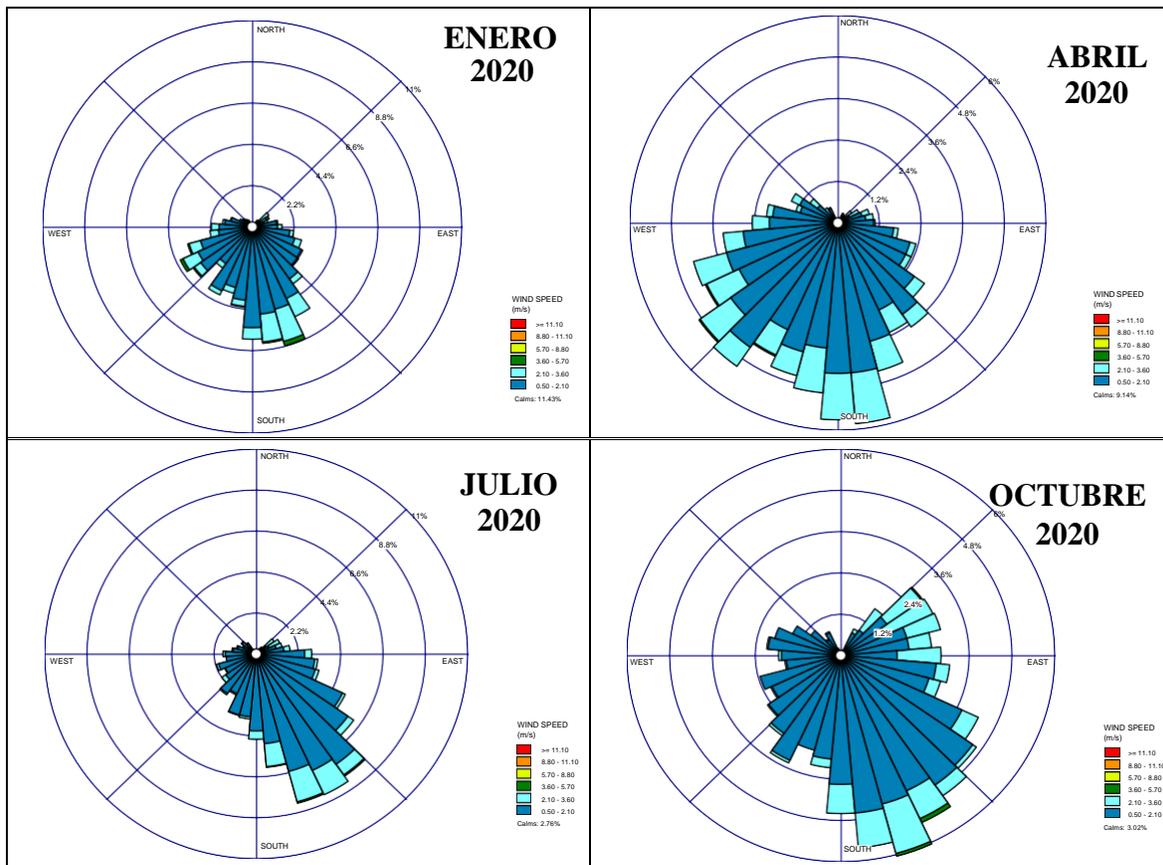


Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019g).

5.3.3 Dirección y velocidad del viento 2020

Como se observa en la Figura 5.3 durante enero el viento se dirigió al sureste y suroeste las ventolinas fueron de 70.3% con 1.18 m/s, 3.6 m/s de brisa débil en un 13.4% y 1.1% de brisa moderada con 5.7 m/s y solo 11.43% de calmas, los vientos de abril prevalecieron al sur, suroeste y sureste con un 9.14% de calmas 66.3% de ventolinas de 1.21 m/s, brisa débil de 3.6 m/s en un 18% y solo un 0.2% de brisa débil entre 3.7 a 5.7 m/s. En julio el viento dominio hacia el sureste con 2.76% de calmas menos que en el 2019, las ventolinas se redujeron solo hasta el 79.5% de 1.3 m/s las brisas muy débiles y débiles fueron entre 2.1 y 3.6 m/s (10.6%), y las brisas débiles y moderadas entre 3.7 y 5.7 m/s con solo 0.2%. Y en octubre hubieron 3.2% de calmas un 75.6% de ventolinas (1.3m/s), brisas muy débiles y débiles en 13.8% (2.1 a 3.6 m/s), finalmente 0.4 de brisas moderadas (5.7 m/s) hacia el suroeste, sureste, y noreste.

Figura 5. 5 Rosa de vientos 2020 ZMVT

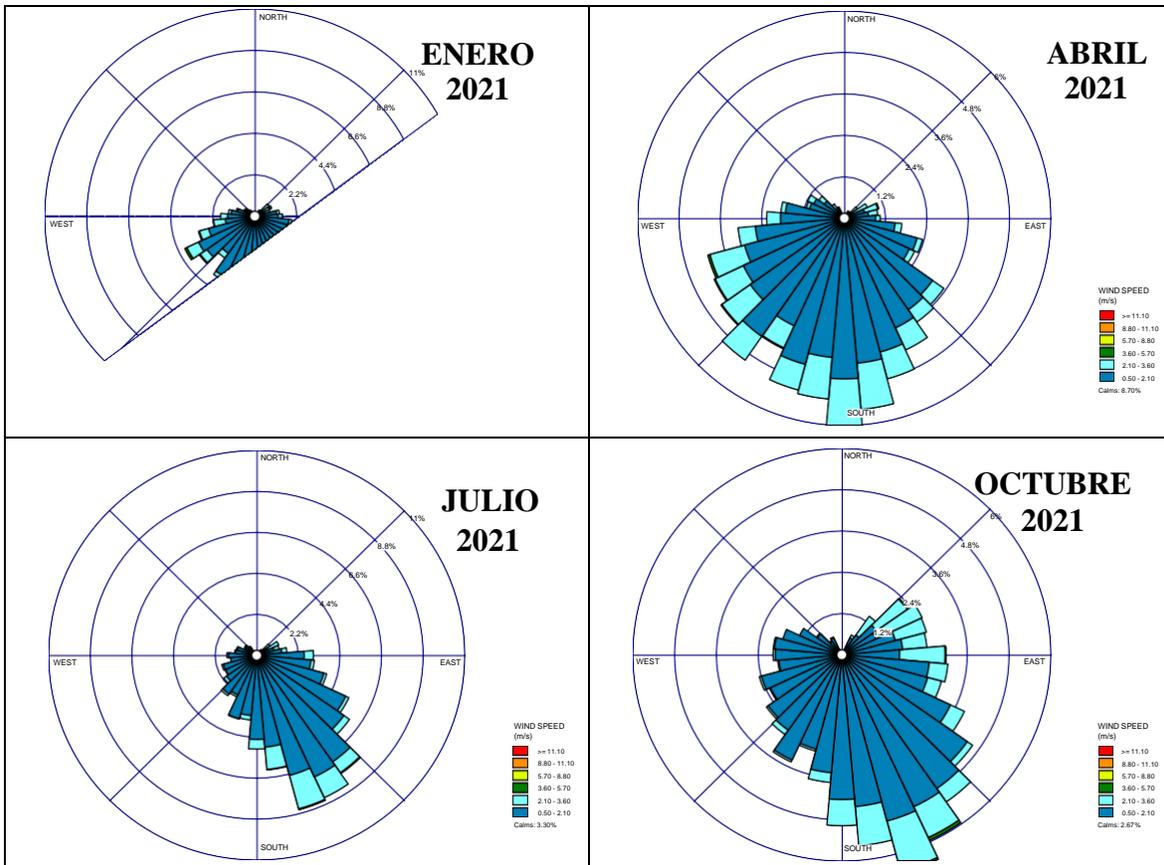


Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020g).

5.3.3 Dirección y velocidad del viento 2021

La Figura 5.4 muestra que en el primer mes el viento tuvo movimiento al sur, sureste y suroeste con 11.38% de calmas, 69% de ventolinas de 1.5 m/s, las brisas débiles de 3.6 m/s con 13.4% y un 1% de brisas moderada (5.7 m/s); en abril las calmas bajaron al 8.7% al igual que las ventolinas a 66.5% de 1.27 m/s, aunque las brisas muy débiles y débiles aumentaron al 17% de 2.1 a 3.6 m/s y solo 0.3% de brisa moderada de 3.7 a 5.7 m/s en dirección al sur, suroeste y sureste; para julio solo hubo 3.3% de calmas, 1.22 m/s de ventolinas (78.6%), 10.2% de brisas débiles y muy débiles (3.6 m/s), únicamente 0.2% de brisa moderada (5.7 m/s) al sureste principalmente; en el cuarto mes (octubre), el viento tuvo 2.67% de calmas, 1.3 m/s en un 75.1% solo un 14% de brisas muy débiles de 2.1 m/s, y 0.3% de brisa moderada 3.7 m/s.

Figura 5. 6 Rosa de vientos 2021 ZMVT



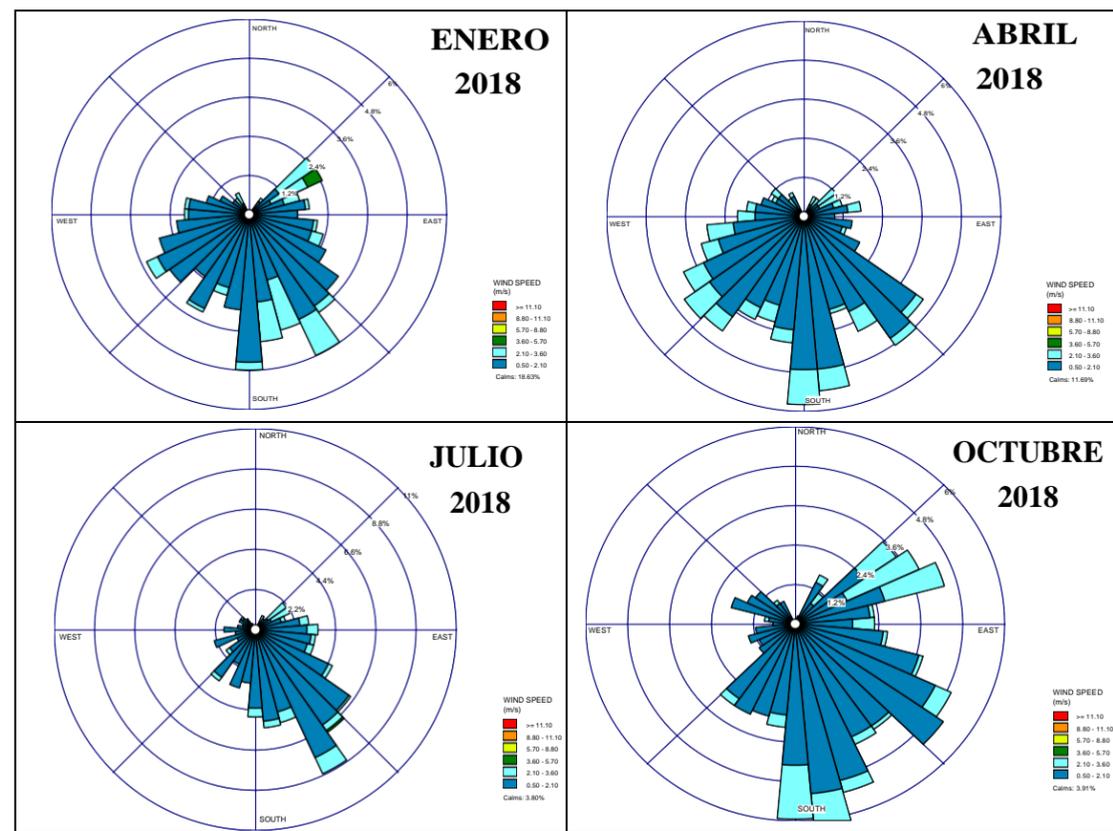
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021g).

5.3.4 Relación entre la dirección y velocidad del viento con respecto a las concentraciones de contaminantes criterio

A continuación, se muestra una comparativa de cuatro de los seis Contaminantes Criterio analizados debido a que mostraron variaciones en sus concentraciones y en algunos casos superaron el Límite Máximo Permisible (LMP), los cuales son: bióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), los otros dos contaminantes monóxido de carbono CO y bióxido de azufre (SO₂) se omitieron debido a que muestran poca variación en sus concentraciones usando como referencia a la dinámica de vientos de los meses estudiados de los años 2018 a 2021, con la finalidad de determinar cómo influye esta variable meteorología en las concentraciones de Contaminantes Criterio y en el proceso de dispersión de estos considerando la rosas del viento y las gráficas de las concentraciones promedio de los contaminantes. Para ello se consideraron los siguientes puntos:

1. **Calmas:** Es el registro menor a 2 nudos o 0.2 m/s, el humo sube verticalmente debido a la usencia de todo movimiento perceptible del aire, es la ausencia del viento (CONAGUA, 2016).
2. **Dirección del viento:** Cuando la dirección del viento es constante en un área estará expuesta a concentraciones elevadas contaminantes, cuando la dirección varía los contaminantes podrán dispersarse fácilmente y los niveles de contaminación disminuirán (Venegas & Mazzeo, 2012)

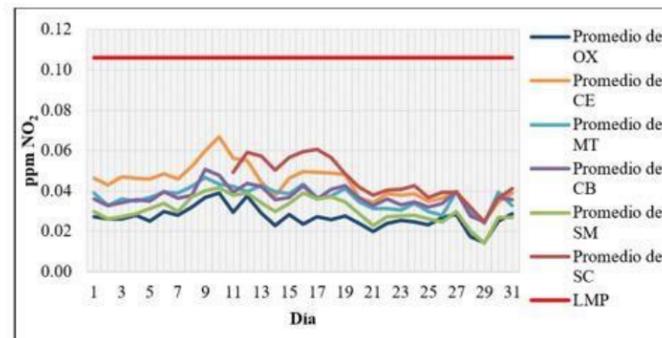
Figura 5.1 Rosa de vientos 2018 ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018g).

En el año 2018 se tomaron en cuenta las emisiones promedio de bióxido de nitrógeno (NO₂), las rosas de viento muestran (Figura 5.1) que en enero y abril la velocidad del viento se presentó entre los 0.5 y 2.1 m/s, con calmas con una frecuencia de 18.63% y 11.69% respectivamente, por otro lado, en julio y octubre tuvieron una velocidad del viento de 0.5 a 3.6 m/s y las calmas eran de 3.8% y 3.91%. Debido a que las calmas tuvieron una mayor frecuencia en los dos primeros meses (Gráfica 5.2.4.5 y Gráfica 5.2.4.9), hubo una menor dispersión de contaminantes y las concentraciones de bióxido de nitrógeno (NO₂) son superiores en comparación con julio (Gráfica 5.2.4.13) y octubre (Gráfica 5.2.4.17), otro factor importante que contribuyó a que octubre mostrara los niveles más bajos de bióxido de nitrógeno (NO₂) es que la dirección del viento no fue hacia el sur, sureste y suroeste como los otros meses, sino que también hacia el noreste y noroeste, lo que incidió en que el contaminante se dispersó en un área mayor.

Gráfica 5.2.4 5 Promedio en enero de NO₂ por EMA 2018



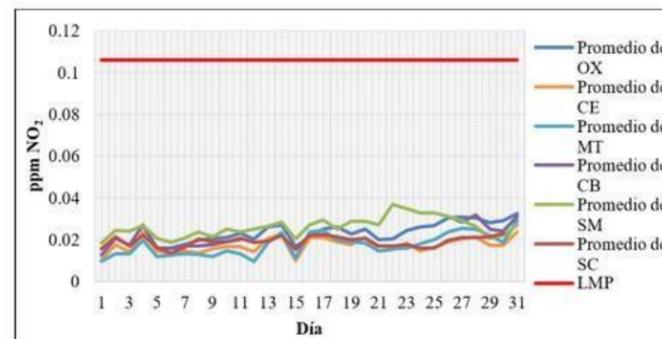
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

Gráfica 5.2.4 9 Promedio en abril de NO₂ por EMA 2018



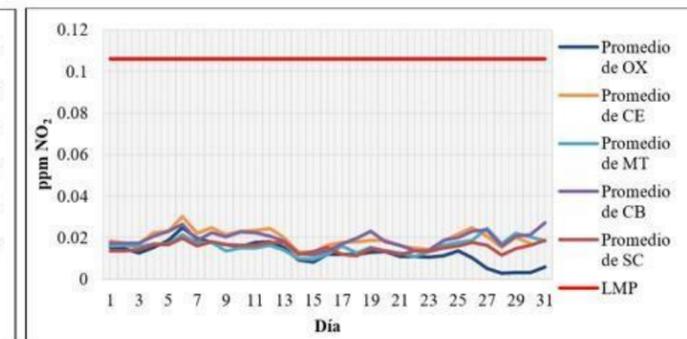
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

Gráfica 5.2.4 13 Promedio en julio de NO₂ por EMA 2018



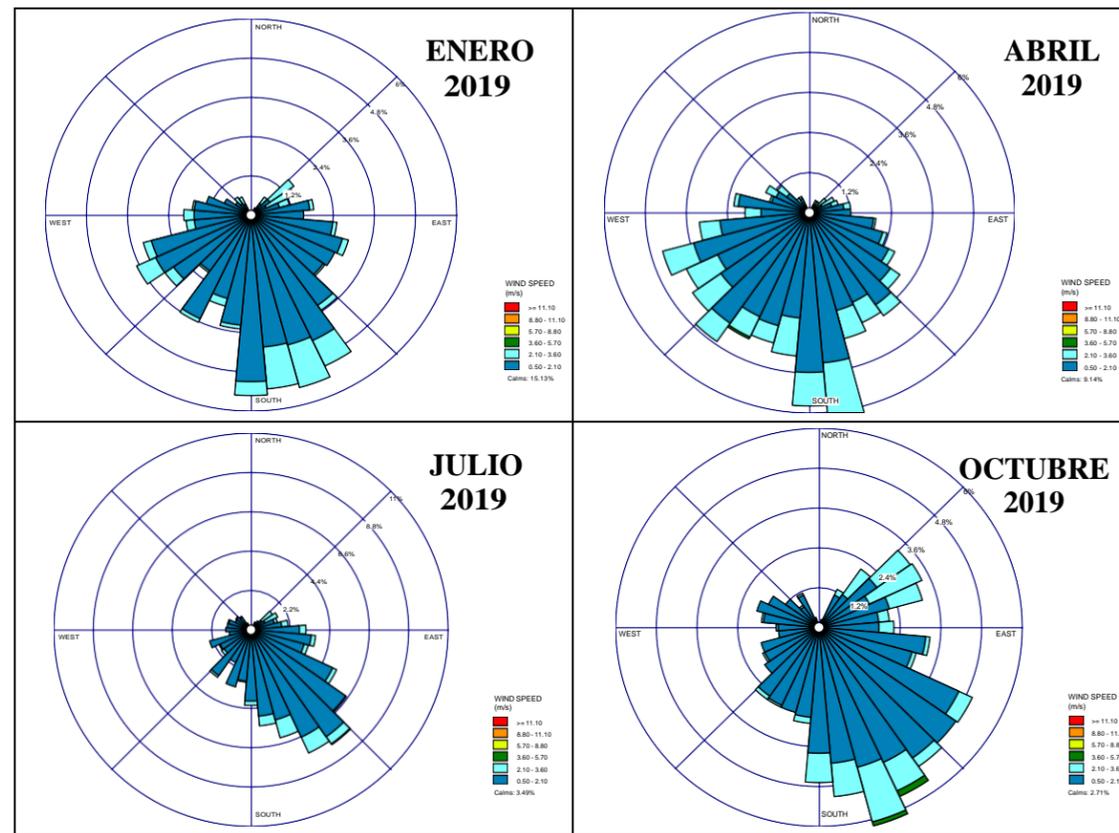
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

Gráfica 5.2.4 17 Promedio en octubre de NO₂ por EMA 2018



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2018b).

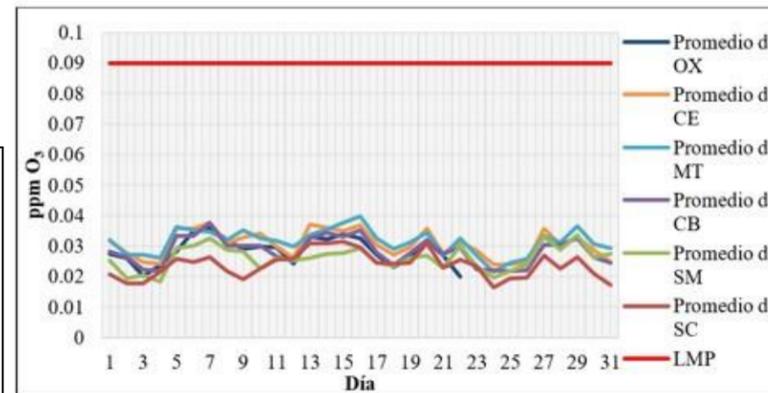
Figura 5.2 Rosa de vientos 2019 ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019g).

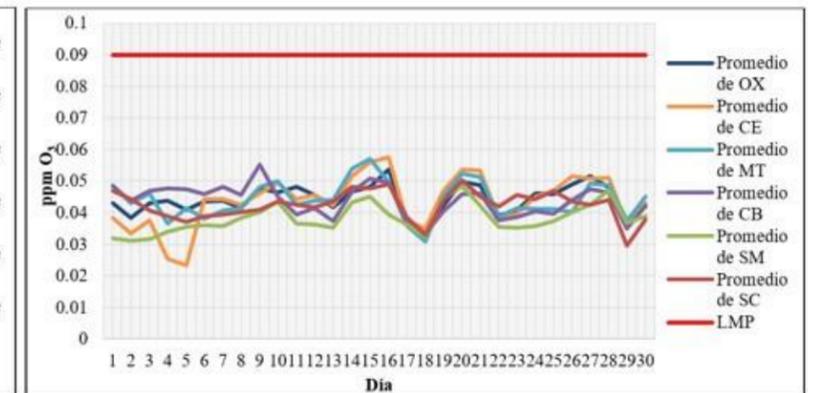
Para el 2019 se consideraron las concentraciones promedio de ozono (O_3), en enero (Figura 5.2) se presentaron calmas con una frecuencia de 15.13% y la velocidad del viento oscilo entre 1.01 y 2.1 m/s, en abril la velocidad se redujo a 1.3 m/s y las calmas a 9.14%, así las concentraciones de ozono (O_3) en enero (Gráfica 5.2.2.6)son menores con respecto a abril (Gráfica 5.2.2.10), ya que aunque hubieron menos calmas la reducción de velocidad del viento pudo haber ocasionado que el contaminante tardara más en dispersarse; en julio se produjeron calmas solo en un 3.49% y el viento tuvo una mayor velocidad con respecto a abril (1.12 a 3.6 m/s), no obstante, la dirección del viento predomino al sureste, lo que impidió que hubiera una mayor área dispersión por lo que solo unos cuantos días los niveles de ozono (O_3) son más bajos (Gráfica 5.2.2.18) que en abril , y finalmente en octubre las calmas descendieron a 1.2% y el viento mantuvo una velocidad entre 1.3 y 5.7 m/s por lo tanto se presentan más días con bajas concentraciones de ozono (O_3) como se puede observar en la Gráfica 5.2.2.18.

Gráfica 5.2.2. 6 Promedio en enero de O_3 por EMA 2019



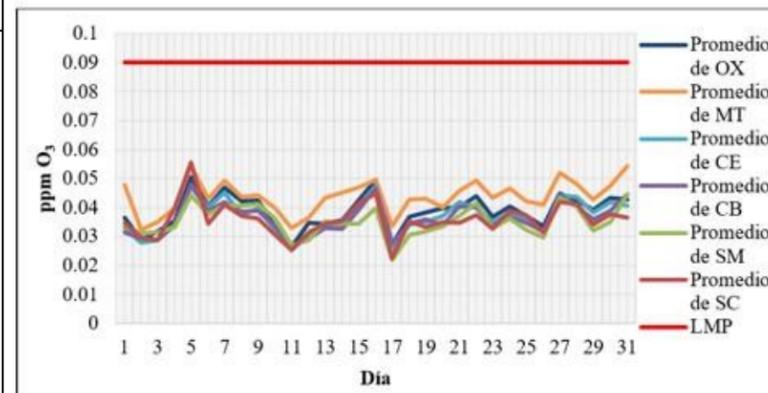
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Gráfica 5.2.2. 10 Promedio en abril de O_3 por EMA 2019



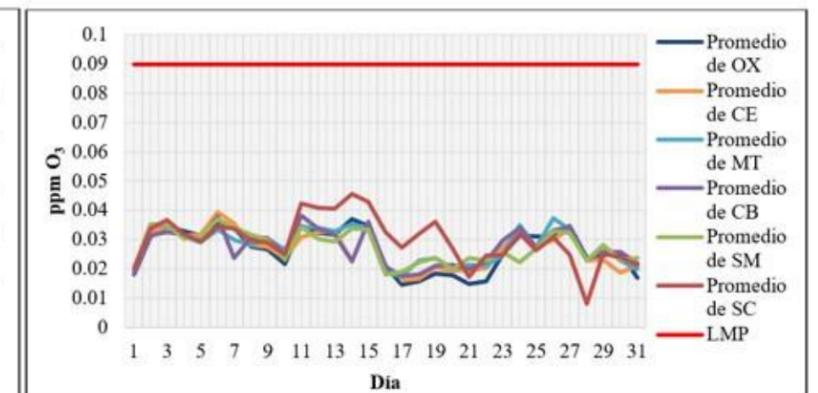
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Gráfica 5.2.2. 14 Promedio en julio de O_3 por EMA 2019



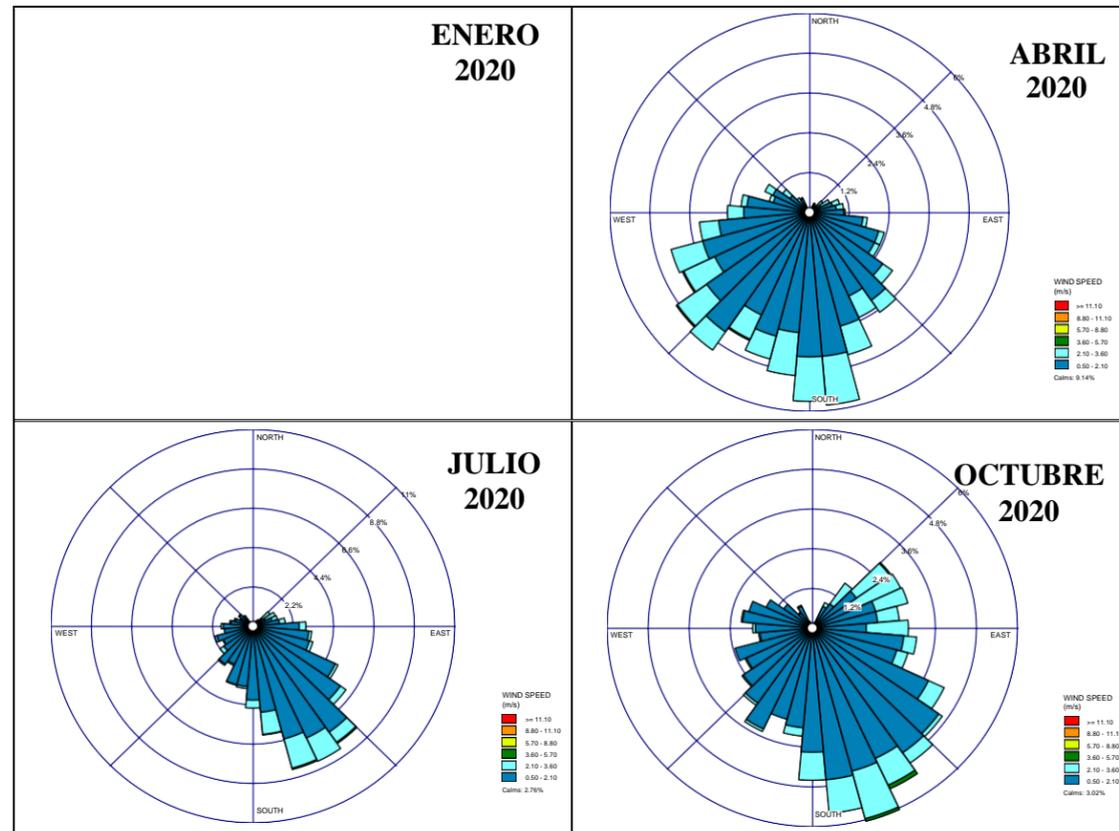
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Gráfica 5.2.2. 18 Promedio en octubre de O_3 por EMA 2019



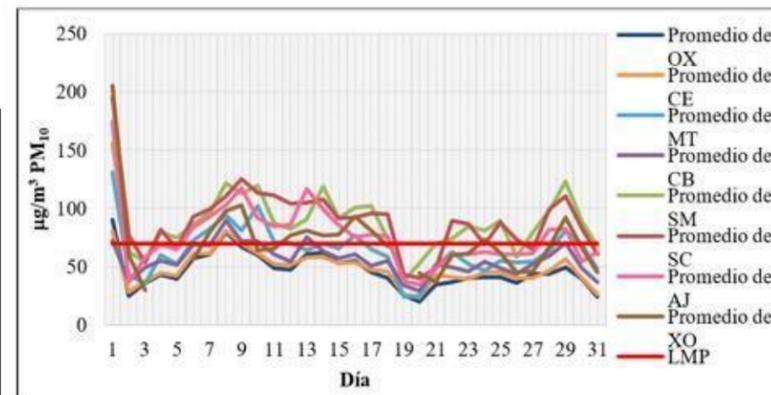
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2019f).

Figura 5.3 Rosa de vientos 2020 ZMVT



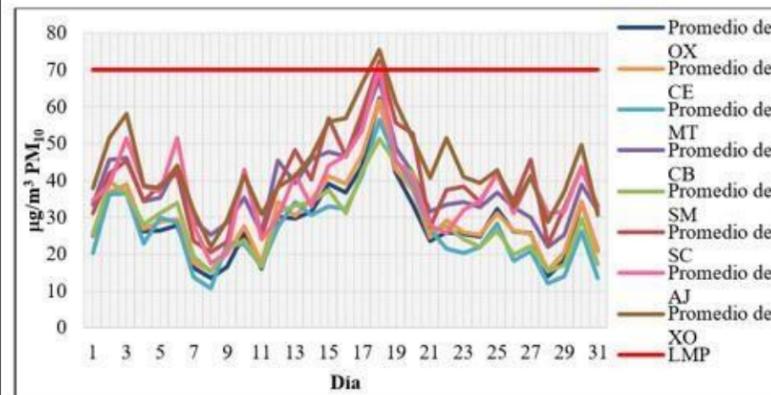
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020g).

Gráfica 5.2.5. 7 Promedio en enero de PM₁₀ por EMA 2020



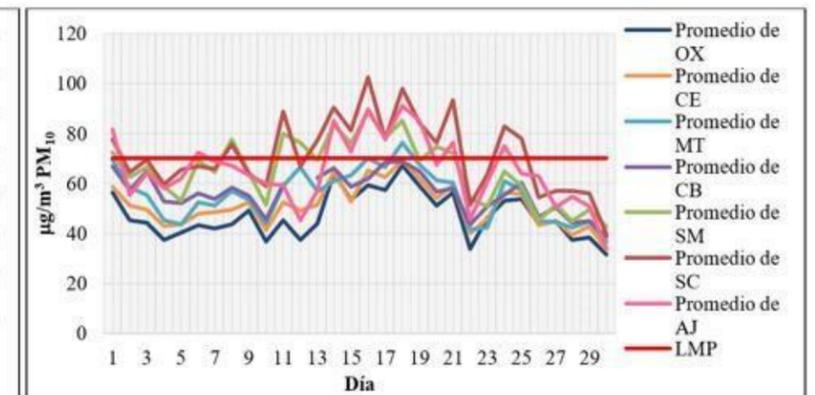
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

Gráfica 5.2.5. 15 Promedio en julio de PM₁₀ por EMA 2020



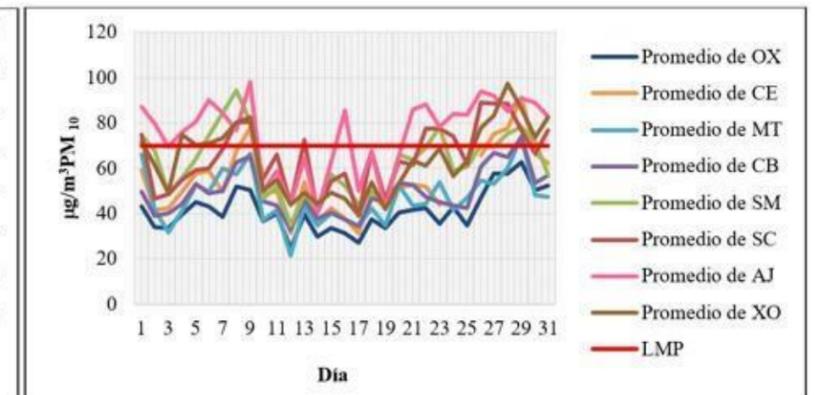
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

Gráfica 5.2.5. 11 Promedio en abril de PM₁₀ por EMA 2020



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

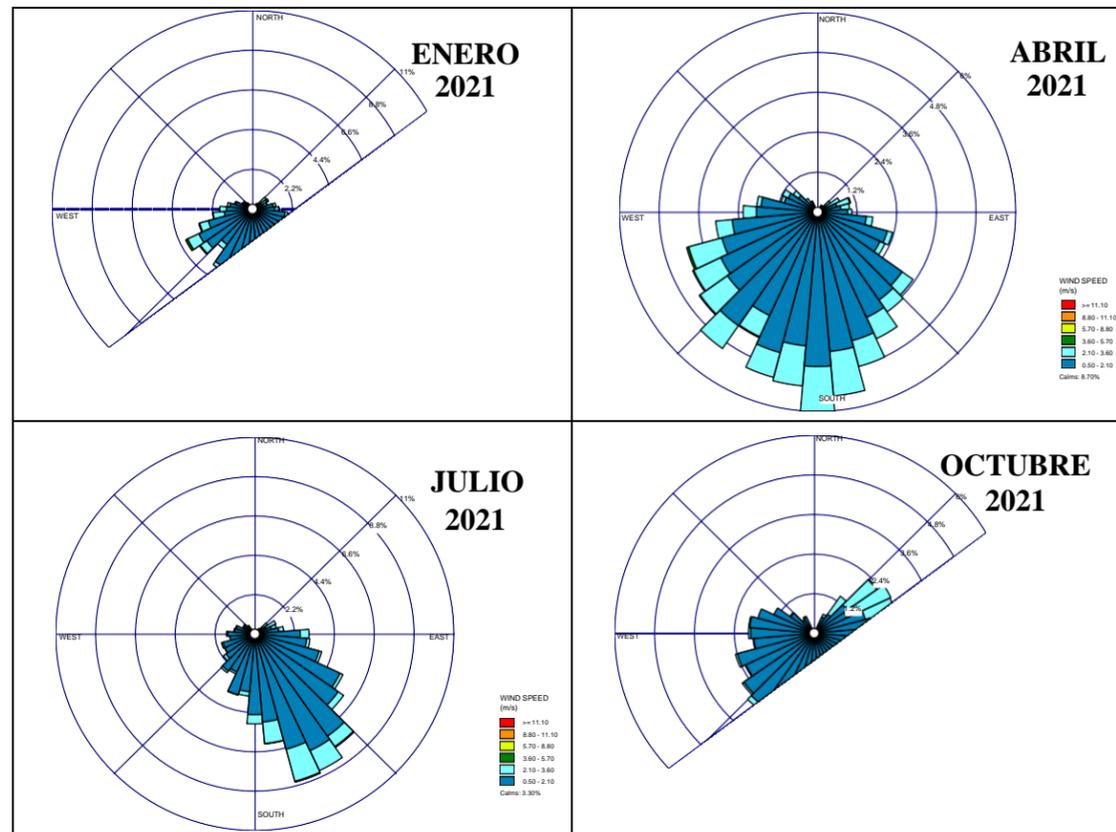
Gráfica 5.2.5. 19 Promedio en octubre de PM₁₀ por EMA 2020



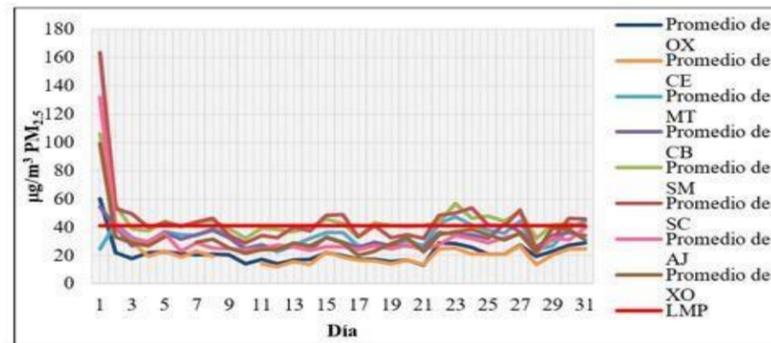
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2020c).

Para el caso del material particulado (PM₁₀) en el 2020 sus concentraciones fueron más elevadas que los otros contaminantes, a pesar de ello se pudo observar la relación con la velocidad y dirección del viento (Figura 5.3), en enero los vientos predominaron con una velocidad de 1.5 m/s, las calmas con una frecuencia del 11.43% estos factores y en conjunto con su dirección del viento que fue hacia el sureste principalmente, los niveles del material particulado (PM₁₀) fueron más elevados (Gráfica 5.2.5.7) con relación a abril (Gráfica 5.2.2.11), a pese a que su velocidad fue de 1.21 m/s las calmas se redujeron a un 9.14% además de que hubo una mayor área de dispersión (suroeste, sureste, sur y noroeste), lo que influyó a que en varios días se respetara el LMP; julio presentó con calmas del 2.76% y una velocidad de velocidad de 1.3 a 3.6 m/s por lo que las concentraciones son menores (Gráfica 5.2.5.15) que en octubre (Gráfica 5.2.5.19) ya que las calmas aumentaron a un 3.2% y la velocidad se mantuvo en 1.3 m/s no fue suficiente para dispersar el contaminante, a pesar de que el viento tuvo variaciones en su dirección, esto pudo deberse a que hubo una mayor emisión del contaminante en este mes.

Figura 5.4 Rosa de vientos 2021 ZMVT

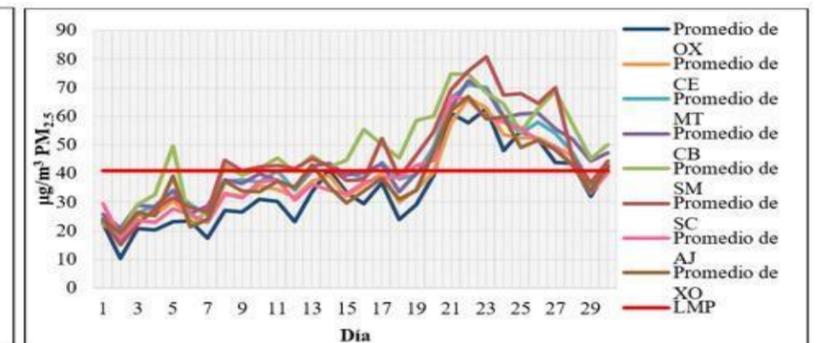


Gráfica 5.2.6. 8 Promedio en enero de PM_{2.5} por EMA 2021



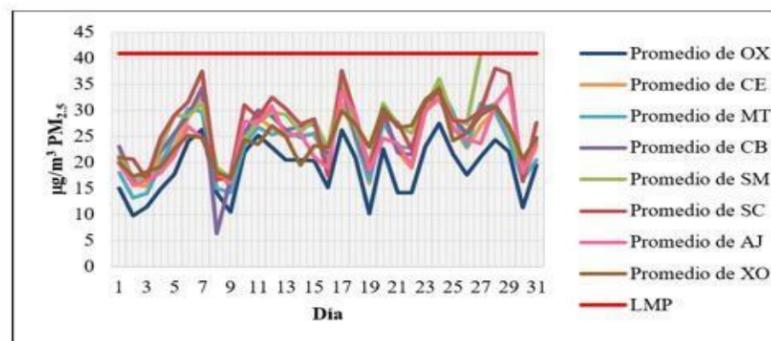
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

Gráfica 5.2.6. 12 Promedio en abril de PM_{2.5} por EMA 2021



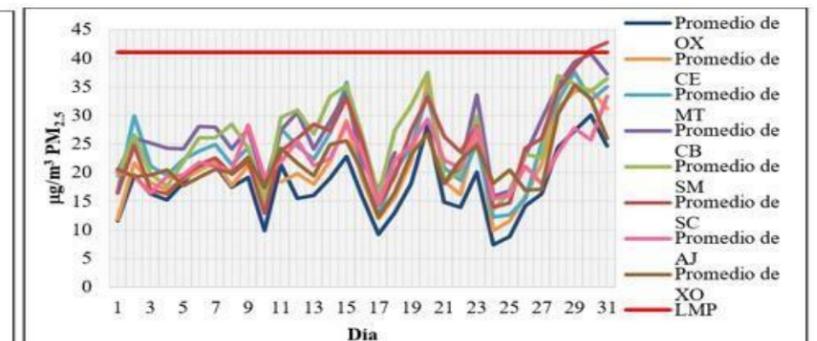
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

Gráfica 5.2.6. 16 Promedio en julio de PM_{2.5} por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

Gráfica 5.2.6. 20 Promedio en octubre de PM_{2.5} por EMA 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021d).

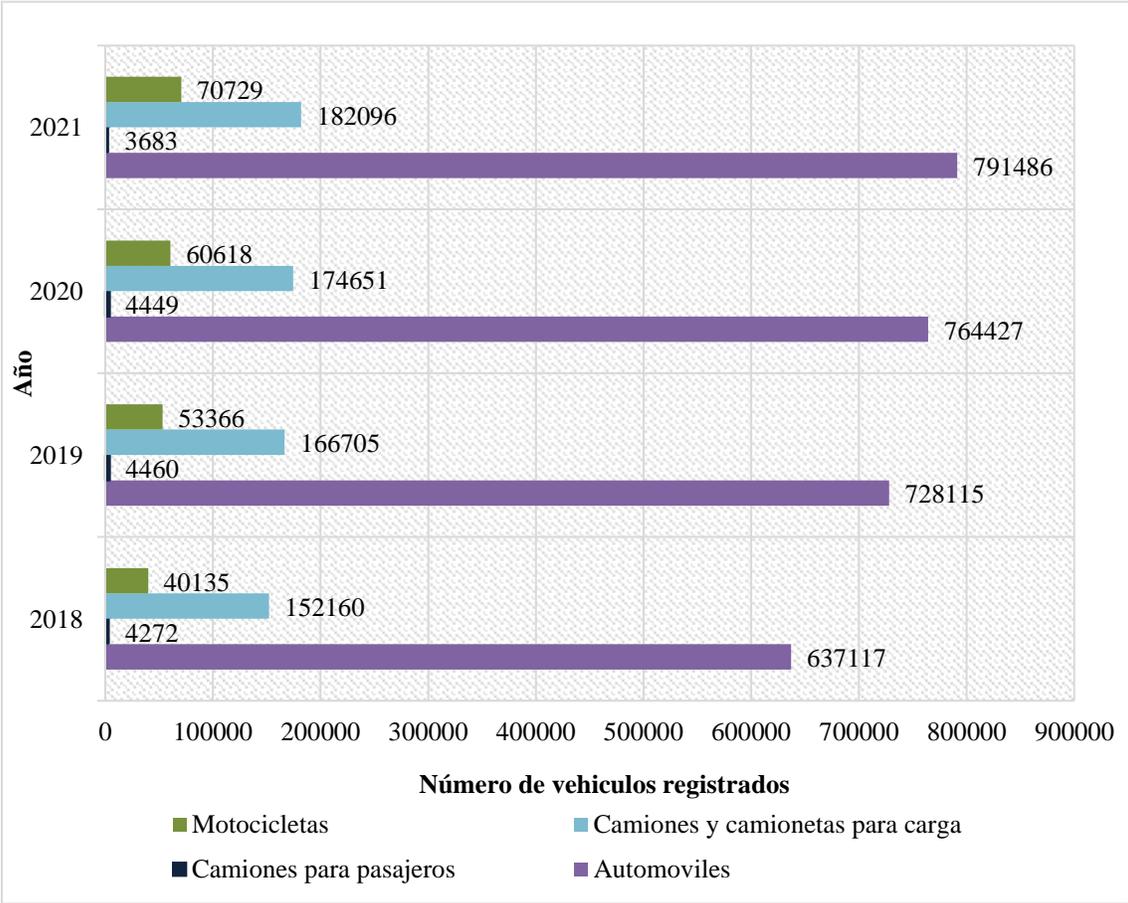
Fuente: Elaboración propia con base en RAMA (2021g).

Para 2021 se consideraron las concentraciones promedio del material particulado (PM_{2.5}), enero (Gráfica 5.2.6.8) y abril (Gráfica 5.2.6.12) produjeron calmas de 11.38% y 8.7% respectivamente con una velocidad del viento entre 1.27 a 3.6 m/s por lo que los niveles de material particulado (PM_{2.5}) son más altas en comparación con julio (Gráfica 5.2.6.16) y octubre (Gráfica 5.2.2.20), en estos meses las calmas fueron de 3.1% y 2.3% y la velocidad del viento fue de 1.22 a 5.7 m/s, en este caso la dispersión de los contaminantes fue mayor y por lo tanto son pocos los días que se excede el LMP, así mismo las direcciones que presentó octubre permitieron que el contaminante se dispersara con más facilidad y en un área mayor.

5.4 Transporte y vialidades en la ZMVT 2018-2021

Como se muestra en la Gráfica 5.4.1 en donde se muestra el número de vehículos registrados en la ZMVT, desde el 2028 los automóviles han predominado en la ZMVT, con 637,117 autos según datos de INEGI (2022), en comparación con los camiones y camionetas para carga que son 152,160, seguidos de las motocicletas que son 40,135 y por ultimo los camiones para pasajeros con solo 4272, si bien estos últimos en el 2019 aumentaron a 4460 unidades para el 2020 se redujeron hasta que en el 2021 llegaron a ser solo a 3683, en comparación con el resto de vehículos que con los siguientes tres años aumentaron de manera significativa, los automóviles registrados en 2021 fueron 791,486, los camiones y camionetas de carga hasta 182,096 y las motocicletas 70,729 un número mayor comparado con el antes y durante la pandemia.

Gráfica 5.4 1 Vehículos registrados en la ZMVT 2018-2021



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2022).

Por otro lado, el registro de Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2022), en las principales carreteras, federales o estatales que conectan con la ZMVT, muestran que antes de la pandemia (2018 y 2019) el número de vehículos en circulación era mayor en la Toluca-Almoloya de Juárez, Naucalpan-Toluca, Toluca-Cd. Altamirano y el Libramiento Nororiental de Toluca entre los 11,970 y 22,260 TDPA, en estas mismas carreteras durante la pandemia el TDPA se redujo hasta 9,4012, sin embargo, en la Toluca-Morelia y México-Toluca fueron las más transitadas durante la pandemia (datos 2018-2019 no disponibles), de 36,123 hasta 53,310 TDPA en el 2021.

Gráfica 5.4 2 Transito diario promedio anual en la ZMVT 2018-2021



Fuente: Elaboración propia con base en la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2022).

El nivel de automóviles registrados, sobre todo los particulares, camiones de carga y motocicletas en los años 2020 y 2021, fueron superiores al periodo 2018 y 2019, ya que por la pandemia la población optó por evitar los espacios públicos cerrados como un autobús de pasajeros, lo que pudo significar un aumento en las concentraciones de los Contaminantes Criterio, específicamente en el 2021, ya que en este año muchas de las actividades diarias regresaron a la normalidad después del confinamiento y la población comenzó a moverse generando los niveles de tráfico mostrados anteriormente, lo que conlleva a embotellamientos en donde los vehículos de todo tipo se encuentran generando y emitiendo diversos gases a la atmósfera, entre ellos los Contaminantes Criterio.

Epílogo

Los datos recuperados por la RAMA mostraron que los contaminantes con los que se supera el límite máximo permisible es el material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ ya que constantemente en los meses y días analizados con concentraciones que suponen un peligro para la población además de degradar la calidad del aire en la ZMVT.

Por otro lado, contaminantes como el bióxido de azufre SO_2 y monóxido de carbono CO de acuerdo con las graficas mostraron concentraciones bajas y muy pocas variaciones menores a los 0.5 ppm por lo que son los contaminantes que presentaron un menor riesgo para la población en los meses estudiados.

Contaminantes como el ozono O_3 y el bióxido de nitrógeno NO_2 si bien no superaron el límite máximo permisible las variaciones que muestran entre un día y otro son drásticas y elevadas por lo que es importante mantenerlos constantemente monitoreados en conjunto con los otros contaminantes.

De acuerdo con el análisis con las rosas del viento se observó que la dinámica de vientos si influye en la dispersión de los contaminantes en el caso de la ZMVT estos se dirigen hacia el sur por lo que la dispersión de los contaminantes será en esa dirección, al igual que la velocidad que es un factor sumamente importante y al haber velocidades de 1.2 a 5.7 m/s los contaminantes se dispersaran más rápido.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones



6.1 Conclusiones

Al realizar la comparación de las concentraciones de contaminantes criterio Contaminantes Criterio, se encontró que bióxido de nitrógeno NO₂, ozono O₃, material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} fueron los que presentaron mayores variaciones en el periodo 2018-2019 y en algunos casos superaban el Limite Máximos Permisibles (LMP) y en 2020-2021 si bien las concentraciones fueron relativamente menores también presentaron concentraciones altas. Así mismo el aumento de dos estaciones en la ZMVT permitió observar como en otros municipios de la zona de estudio también se emiten niveles importantes de contaminantes.

La elaboración de los antecedentes permitió entender que los Contaminantes Criterio pueden ocasionar daños severos a la salud y afectar la calidad de vida de las personas a nivel internacional, nacional y local en conjunto con el marco teórico conceptual que con ello se pudo comprender de mejor manera el proceso de la contaminación atmosférica y como se generan los Contaminantes Criterio.

Anudado las bases jurídicas que establecen el LMP y de los cuales se percibió que tanto a nivel internacional como nacional fueron actualizadas después de aproximadamente 10 años y si bien son más estrictas en cuanto a la cantidad de emisiones permisibles hay una gran diferencia entre los limites siendo los parámetros internacionales son más rigurosos.

En el presente trabajo de investigación al identificar y geolocalizar las estaciones de monitoreo atmosférico se observó que el alcance de medición que de acuerdo con las bases conceptuales es de 5 km, así en el periodo 2018-2019 el monitoreo atmosférico se concentraba en los municipios de Toluca y Metepec con las seis estaciones que se encontraban en funcionamiento: Toluca Centro (CE), Oxtotitlán (OX), Metepec (MT), Ceboruco (CB), San Mateo Atenco (SM), San Cristóbal Huichochitlán (SC).

Dicho monitoreo se ve favorecido ya que el aumento de las dos estaciones en el año 2020 permitió que se expandiera a Lerma, Xonacatlán y Almoloya de Juárez, sin embargo, se siguen dejando sin cobertura a otros municipios dentro de la ZMVT, que pueden contribuir de manera importante a las emisiones de los Contaminantes Criterio y al deterioro de la calidad del aire.

Cabe mencionar que la base de datos con las concentraciones de los Contaminantes Criterio en la ZMVT que fue a través de la solicitud al Sistema de Acceso a la Información Mexiquense SAIMEX, de los cuales se encontró que hay días en los que no se contaban con datos, esto probablemente a que hay días en los que se le brinda mantenimiento al equipo de las estaciones de monitoreo y por ello hay datos nulos o en ceros, por ello también se realizaron los ajustes estadísticos correspondientes.

De las diferentes variables meteorológicas que mide la RAMA, (humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, temperatura, etc.), se seleccionaron la velocidad y dirección del viento y derivado de ello se realizaron rosas del viento, para analizar y comparar la velocidad y dirección del viento de 2018 a 2021 en donde se observó que el viento se mueve principalmente hacia el sur, sureste y suroeste con velocidades entre 1.2 y 5.7 m/s así mismo se observó si influye en el de dispersión de los Contaminantes Criterio en la ZMVT.

El análisis realizado a través de las diferentes tablas y gráficas dinámicas en Excel ® de las concentraciones de los Contaminantes Criterio reportados por cada estación de monitoreo atmosférico, dentro de la ZMVT de 2018 a 2021, una vez seleccionados los meses

representativos de cada estación del año enero (invierno), abril (primavera), julio (verano) y octubre (otoño), se pudo observar que los contaminantes con los niveles más bajos y que no superaron los Límites Máximos Permisibles (LMP), fueron el monóxido de carbono (CO) y del bióxido de azufre (SO₂), en los años y meses estudiados; por otro lado el bióxido de nitrógeno (NO₂) presentó variaciones importantes en donde se destaca las estaciones San Cristóbal (SC), Centro (CE) y Almoloya de Juárez (AJ) las cuales tienen los niveles más altos de este contaminante sin llegar a superar los LMP.

El ozono (O₃) si bien no supera el LMP, sus concentraciones superan el 0.05 ppm en estaciones como Metepec (MT) y Centro (CE), además de variaciones drásticas entre un día y otro en todos los meses de 2018 a 2021.

Por su parte el material particulado (PM₁₀), mostró concentraciones muy elevadas que constantemente rebasan el LMP en las estaciones San Cristóbal (SC), San Mateo (SM) en el 2018 y 2019, al igual que las estaciones de Xonacatlán (XO) y Almoloya de Juárez (AJ) en 2020. El material de material particulado (PM_{2.5}), aunque también registró niveles elevados y por encima de los LMP, sus concentraciones llegan a ser menores que el PM₁₀.

Acorde con las gráficas elaboradas se pudo observar que las concentraciones de los años 2018-2019, son relativamente más altas que en el periodo 2020-2021; en cuanto a los meses son enero y abril en los que se observan niveles altos de los contaminantes, principalmente el material particulado (PM₁₀) y (PM_{2.5}), ozono (O₃) y se determinó que en julio y octubre se registraron las concentraciones más bajas en los cuatro años.

La hipótesis planteada al inicio de la presente investigación se corrobora puesto que si existe una variabilidad importante entre los periodos 2018-2019 y durante 2020-2021 se añadieron dos estaciones de monitoreo dentro de la ZMVT y estas presentaron concentraciones elevadas en varios de los contaminantes estudiados que superaban el LMP en municipios en donde no se llevaba a cabo un monitoreo atmosférico con anterioridad.

Con los resultados obtenidos se pudo observar que las emisiones de Contaminantes Criterio muestran variaciones importantes en la ZMVT, es decir contaminantes como el monóxido de carbono CO y bióxido de azufre SO₂ tuvieron los niveles más bajos en los periodos estudiados, sin embargo, para el resto de los contaminantes las estaciones que se encontraban en funcionamiento en el 2018-2019 ya reportaban niveles elevados o que superaban los parámetros establecidos en las normas.

En el 2020-2021 las nuevas estaciones en Almoloya de Juárez y Xonacatlán también registraron concentraciones altas, por ejemplo, el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) que constantemente rebasan el LMP con concentraciones superiores a los 100 mg/m³, lo que indica que la calidad del aire en la ZMVT continúa en deterioro.

Los resultados encontrados apoyan el supuesto que todos los procesos de movilidad en transporte que consuma como fuente de energía los combustibles fósiles que ocasionan el incremento de diferentes Contaminantes Criterio.

La normatividad mexicana (Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente) explica claramente las características que debe tener el monitoreo atmosférico para medir y comunicar la calidad del aire, si bien en la ZMVT se encuentran bien ubicadas las estaciones de monitoreo atmosférico, es la comunicación a la población lo que se encuentra deficiente, por lo que es importante que tanto el gobierno estatal como la RAMA trabajen en conjunto para que la población conozca de manera certera el estado de la calidad del aire.

Anudado a ello la NOM-172-SEMARNAT-2019, del nuevo índice Aire y Salud que es una versión mejorada del IMECA, presenta mejoras en comparación a este último y sin duda es uno de los más completos que permite además de saber la calidad del aire también considera a las personas propensas a sufrir riesgos mayores por la contaminación atmosférica, la desventaja es que solo se publica en portales oficiales de la RAMA sitio que pude que la mayoría de la población no conozca.

Si bien las Normas Oficiales Mexicanas en cuestión de límites máximos permisibles se actualizaron en los últimos años con parámetros más estrictos a nivel internacional son aún más rígidos y en el área de estudio (ZMVT) sigue habiendo concentraciones elevadas y preocupantes de contaminantes criterio que violan constantemente lo establecido por la ley.

Tal es el caso de la NOM-025-SSA-2021 en donde se establece el LMP del material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) el cual desafortunadamente no se cumple en ninguno de los periodos estudiados, y por ello la relevancia de que las autoridades tanto estatales como locales vigilen y evalúen dichas concentraciones y el porqué de sus altas concentraciones ya que de acuerdo con la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente es su responsabilidad la coordinación para la toma de decisiones para el control y reducción de contaminación atmosférica y de esta manera garantizar una calidad del aire satisfactoria.

6.2 Recomendaciones

Derivado del presente trabajo de investigación, se recomienda que, con la finalidad de mantener un conocimiento general sobre la calidad del aire, seguir realizando actualizaciones sobre las concentraciones de Contaminantes Criterio y su comportamiento en relación con las variables meteorológicas como son la velocidad y dirección del viento, ya que estos pueden influir de manera importante en la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

Así mismo prestar especial atención a contaminantes como el material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), ozono (O_3) y bióxido de nitrógeno (NO_2), que fueron los que presentaron variaciones importantes en sus concentraciones e incluso superaban los LMP de las NOM; se recomienda generar una cultura de prevención para que la población se exponga el menor tiempo posible a estos contaminantes cuando sus concentraciones se disparen.

Promover el transporte público, eficiente, seguro y limpio, con la finalidad de reducir los embotellamientos en los que se pueden generar emisiones importantes de contaminantes y con ello disminuir el uso de automóviles particulares.

Por otro lado, incrementar el número de estaciones de monitoreo atmosférico, de tal manera que, su área de medición no se sobreponga entre sí, es decir, ubicarlas estratégicamente para que puedan tener un mayor alcance de monitoreo y así cubrir la mayor parte posible de la ZMVT.

De manera general es recomendable que la población se mantenga al tanto de los reportes horarios que emite la RAMA y sobre todo saber y, conocer el manejo de los índices en materia de la calidad del aire aplicados por la RAMA para al momento de realizar actividades al aire libre tomar las medidas correspondientes.

Bibliografía

- Albert, L. A. (1995). Contaminación ambiental, origen, clases, fuentes y efectos. En *La Contaminación y sus efectos en la salud y ambiente* (Issue 4, p. 332). [https://doi.org/10.1016/S1698-031X\(07\)74080-3](https://doi.org/10.1016/S1698-031X(07)74080-3)
- Aldunate, P., Paz, O., & Halvorsen, K. (2006). Los efectos de la contaminación atmosférica por PM₁₀ sobre la salud, ciudad de La Paz – Bolivia (3650 m.s.n.m.). *Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad Mayor de San Andrés*, 3, 422–442.
- Anglés, M., Rovalo, M., & Tejado, M. (2021). *Manual de derecho ambiental mexicano* (Primera ed). Instituto de Investigaciones Jurídicas.
- Anguiano Miranda, J. Y. (2018). *Análisis de las concentraciones de material particulado menor a 10 micras (PM₁₀) a partir de los datos de la Red Automática de Monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2011-2017*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Arredondo, A. N. (2019). Control de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(102), 631–663. <http://www.scielo.org.mx/pdf/educm/v34n3/2448-6515-educm-34-03-631.pdf>
- BBC News. (2021). *La Palma: la peligrosa reacción química que ocurre cuando la lava de un volcán llega al océano*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-58639261>
- Beaudry, F. (2021). *How Does Nitrogen Oxide Pollution Affect the Environment?* Threehugger. <https://www.treehugger.com/what-is-nitrogen-oxide-pollution-1204135>
- Bermejo, V., Alonso del Amo, R., Elvira Cozar, S., Rábago Juan-Aracil, I., & García, M. (2009). *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*. Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Medio Marino.
- Campbell, A., Hanania, J., Sheardown, A., Stenhouse, K., Toor, & Donev, J. (2019). *Carbon Monoxide*. University of Calgary. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Carbon_monoxide
- Canales-Rodríguez, M. A., Quintero-Núñez, M., Castro-Romero, T. G., & García-Cuento, R. O. (2014). Las partículas respirables PM₁₀ y su composición química en la zona Urbana y rural de Mexicali, Baja California en México. *Informaciónn Tecnológica*, 25(6), 13–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000600003>
- Carnicer, J. M. (2008). *Contaminación Ambiental*. <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20198/contaminacion-atmosferica>
- CEPANAF. (2021). *Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca*. Comisión Estatal de Parques Naturales y de La Fauna. https://cepanaf.edomex.gob.mx/parque_nevado_toluca
- Cercas, V. G. (2020). *Comportamiento de los contaminantes criterio y su relación con la meteorología durante el periodo 2012-2017: Municipio de Puebla*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Choudhary, M. P., & Garg, V. (2015). Causes, Consequences and Control of Air Pollution.

- Control of Air Pollution*, 1(2013), 9–11.
<https://www.researchgate.net/publication/279202084>
- Código para la Biodiversidad del Estado de México. (2021). Título quinto de la protección al ambiente. Capítulo II: De la prevención y control de la contaminación. En *Gaceta de Gobierno del Estado de México* (pp. 56–60).
- COFEPRIS. (2017a). *Clasificación de los contaminantes en aire ambiente*. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente>
- COFEPRIS. (2017b). *Efectos a la salud por la contaminación del aire ambiente*. Contaminación Del Aire Ambiente. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/3-efectos-a-la-salud-por-la-contaminacion-del-aire-ambiente>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis. (2018). *IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire*. <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/imeca-indice-metropolitano-de-la-calidad-del-aire?idiom=es>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). La Atmósfera. En *Servicio Meteorológico Nacional, tiempo y clima* (pp. 66–75). http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=12:temperatura-y-precipitacion&catid=6:slider&Itemid=65
- Cumbrera, F. D. Q. (2018). Contaminación del aire urbano: riesgos y alternativas. In *Instituto Español de Estudios Estratégicos* (pp. 1–15). http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_opinion/2018/DIEEEO63-2018_Contaminacion_AireUrbano_QuerolCumbrera.pdf
- Domínguez, W. (2015). *Representación espacial por interpolación con kriging de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la zona metropolitana del Valle de Toluca en el año 2011*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- EPA. (2021a). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- EPA. (2021b). *Effects of Acid Rain*. <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- EPA. (2021c). *NAAQS Table*. Criteria Air Pollutants. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- EPA. (2021d). *Sulfur Dioxide Basics*. Sulfur Dioxide (SO₂) Pollution. <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>
- Etze, R., & French, J. (2000). Contaminación De Aire. En *Impacto de los desastres en la salud pública* (Issue 2, pp. 337–352). <http://cidbimena.desastres.hn/pdf/spa/doc12849/doc12849.pdf>
- European ComMission. (2021). *Air Quality Standards*. Environment. <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
- Flores, J., Peña, P., Balcázar, M., Madrigal, D., Ramos, L., López, A., & Morelos, J. (2010). Estimación del riesgo a la exposición de partículas suspendidas en el Valle de Toluca. *CIENCIA Ergo-Sum*, 17(1), 72–80.

- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Instituto de Geografía-UNAM. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1xxv3n.2>
- García, E., & CONABIO. (2008). *Climas*. Catálogo de Metadatos Geográficos. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>
- Gilbert, S. G. (2018). Una pequeña dosis de contaminación del aire o Una introducción a los efectos de la contaminación del aire en la salud. In *Toxicología de la contaminación del aire* (Vol. 16, pp. 1–20).
- Gobierno de Canarias. (2021). *Plan especial de protección civil y atención a las emergencias por riesgo volcánico de canarias*. https://info.igme.es/eventos/la-palma/pevolca/211002_Informe-Comite-Cientifico-PEVOLCA.pdf
- Guirola, J., Pérez Barly, L., García González, Y., O', D., Noda, R., & Guedes Díaz, R. (2019). Intoxicación por monóxido de carbono. Carbon monoxide poisoning. *Revista Cubana de Medicina Militar*, 48(2), 245–251. <http://scielo.sld.cuhttp://www.revmedmilitar.sld.cuBajolicenciaCreativeCommons>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). Metodología de la Investigación. Las rutas Cuantitativa Cualitativa y Mixta. En *Universidad Tecnológica Laja Bajo*. <http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/handle/54000/1292>
- Hernandez, A., Orozco, M. G., García Velasco, J., & Ortiz, J. (2018). Calidad del aire por PM₁₀ Y PM_{2.5}, en puntos críticos de la Zona Centro de Guadalajara, Jalisco. México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 4(June 2021), 37–40. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34646.16961>
- Herrera, J. (2015). Inventario de emisiones de contaminantes criterio de Costa Rica en 2011. *Revista de Ciencias Ambientales*, 48(2), 5–19. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5536130.pdf>
- Imbert, C., & Zapata, L. (2017). Emisión de dióxido de azufre por las principales fuentes fijas en el municipio Santiago de Cuba. *Centro Meteorológico Provincial Santiago de Cuba. Santiago de Cuba.*, 9. <http://repositorio.geotech.cu/jspui/handle/1234/2308>
- INECC. (2010). *Primer catálogo: Estaciones de monitoreo atmosférico en México* (p. 5). http://bios.biologia.umich.mx/files/monitoreo/documentos/2primer_catalogo.pdf
- INECC. (2012). *Importancia de las partículas PM 2.5* (pp. 33–52). <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/importancia.pdf>
- INECC. (2017). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2016, México. *Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación Sobre La Calidad Del Aire y Los Contaminantes Climáticos.*, 52, 1–185. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/236724/Informe_nacional_calidad_del_aire_2015_Final.pdf
- INEGI. (2010). *Datos vectoriales*. Conjunto de Datos Vectoriales de Información Topográfica Escala 1:50 000, Serie III. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825202620>
- INEGI. (2014). *Las zonas metropolitanas en México* (pp. 1–2). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ce/ce2014/doc/minimonografias/m_

zmm_ce2014.pdf

- INEGI. (2016). *División política estatal 1:250000. 2015*. Catálogo de Metadatos Geográficos. Comisión Nacional Para El Conocimiento y Uso de La Biodiversidad.
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2022). *Vehículos de motor registrados en circulación*. Conjunto de Datos: Vehículos de Motor Registrados En Circulación. <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>
- Juliño Carliño, M., Ocaña Segura, F., & Concha Iglesias, J. (2021). Contaminación ambiental y su influencia en la salud. *ReNaCientE - Revista Nacional Científica Estudiantil - UPEL-IPB*, 2(1), 75–90. <https://doi.org/10.46498/renacipb.v2i1.1566>
- Kumar, S., & Yadav, S. (2021). Chapter15 - Air quality index and criteria pollutants in ambient atmosphere over selected sites: Impact and lessons to learn from COVID-19. En *Climate Change Effects on Environmental Functionality* (pp. 153–162). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323855129000036>
- LGEEPA. (2021). Capítulo II Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera. En *Diario Oficial de la Federación*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_180121.pdf
- Luna, A. T. (2018). *Análisis de las concentraciones de monóxido de carbono utilizando los datos de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca en el periodo de 2011 al 2017*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Mantilla, E., Castell, N., Salvador, R., Azorín, C., Millán, M., Miró, J. Vi., & Juan, L. (2015). Ozono troposférico y calidad del aire. *Generalitat Valenciana y CEAM*, 15. <http://www.citma.gva.es/documents/20549779/161512949/Ozono+troposférico+y+calidad+del+aire.+Libro+completo/c0ae3c3e-5588-433f-a0b6-daf473a9c0a9;jsessionid=49ADB4805220D697BF9FF226B34A1ABD.node1>
- Mares Cuevas, M. J. (2019). *Análisis de las concentraciones de PM_{2.5} en el periodo 2012-2018 utilizando los datos de las estaciones de la RAMA-ZMVT*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Martínez, M., & Lara, M. (2015). Datos e indicadores de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. En *Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México IGECM* (p. 2). https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2017/8/3/3a5b1d2fb9a55cea32564f562f9848aa.pdf
- Milpa Barrios, L. I. (2018). *Correlación entre la variabilidad de la temperatura y las concentraciones de Ozono a partir de los datos de la RAMA-ZMVT, 2011-2016*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Mogrovejo, M. (2015). *Evaluación de las tendencias de calidad del aire en la zona metropolitana del valle de Toluca durante los años 2000-2013* Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22410/1/TESIS.pdf>
- NPI. (2009). *Carbon Monoxide*. National Pollutant Inventory, Department of Agriculture,

- Water and Environment of Australia. <http://www.npi.gov.au/resource/carbon-monoxide>
- OMS. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. En *Organización Mundial de la Salud*.
- OMS. (2021a). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*. Centro de Prensa: Preguntas y Respuestas. <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/who-global-air-quality-guidelines>
- OMS. (2021b). *Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire*. <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>
- Orellana, R. (2021). *Índice de humedad de Lang*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. <http://www.ccpy.gob.mx/agenda-regional/escenarios-cambio-climatico/atlas/indice-humedad.php>
- Organización Meteorológica Mundial. (2014). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (Vol. 8). https://web.directemar.cl/met/jturno/documentos/wmo_8-2014_es.pdf
- Orizaola, M. (2017). *Una Visión Global Del Efecto Invernadero* (p. 33). Universidad de Cantabria. <file:///C:/Users/USER/Downloads/OrizaolaMadrazoMiguel.pdf>
- Querol, X. (2018). *Calidad Del Aire Reto Mundial* (Primera ed, p. 16). Fundación Gas Natural Fenosa.
- Quintero, M., & Moncada, A. (2008). Contaminación y control de las quemas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California. *Región y Sociedad*, 20(43). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252008000300001
- RAMA. (2018a). Concentraciones de bióxido de azufre SO₂ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2018. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2018b). Concentraciones de bióxido de nitrógeno NO₂ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2018. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2018c). Concentraciones de material particulado PM₁₀ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2018. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2018d). Concentraciones de material particulado PM_{2.5} por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2018. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2018e). Concentraciones de monóxido de carbono CO por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2018. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2018f). Concentraciones de ozono O₃ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2018. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2018g). Velocidad y dirección del viento por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2018. *Variables meteorológicas*.
- RAMA. (2019a). Concentraciones de bióxido de azufre SO₂ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2019. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2019b). Concentraciones de bióxido de nitrógeno NO₂ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2019. *Contaminantes Criterio*.

- RAMA. (2019c). Concentraciones de material particulado PM₁₀ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2019. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2019d). Concentraciones de material particulado PM_{2.5} por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2019. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2019e). Concentraciones de monóxido de carbono CO por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2019. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2019f). Concentraciones de ozono O₃ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2019. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2019g). Velocidad y dirección del viento por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2019. *Variables meteorológicas*.
- RAMA. (2020a). Concentraciones de bióxido de azufre SO₂ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2020. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2020b). Concentraciones de bióxido de nitrógeno NO₂ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2020. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2020c). Concentraciones de material particulado PM₁₀ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2020. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2020d). Concentraciones de material particulado PM_{2.5} por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2020. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2020e). Concentraciones de monóxido de carbono CO por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2020. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2020f). Concentraciones de ozono O₃ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2020. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2020g). Velocidad y dirección del viento por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2020. *Variables meteorológicas*.
- RAMA. (2021a). Concentraciones de bióxido de azufre SO₂ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2021. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2021b). Concentraciones de bióxido de nitrógeno NO₂ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2021. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2021c). Concentraciones de material particulado PM₁₀ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2021. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2021d). Concentraciones de material particulado PM_{2.5} por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2021. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2021e). Concentraciones de monóxido de carbono CO por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2021. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2021f). Concentraciones de ozono O₃ por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2021. *Contaminantes Criterio*.
- RAMA. (2021g). Velocidad y dirección del viento por estación de monitoreo atmosférico en la ZMVT 2021. *Variables meteorológicas*.
- Randolph, L. (2021). *Inhalable Particulate Matter and Health (PM_{2.5} and PM₁₀)*. The California Air Resources Board. <https://ww2.arb.ca.gov/es/resources/inhalable-particulate-matter-and-health>

- Raña. (2005). Unidades de medición empleadas en la calidad del aire. Portal temático de contaminación atmosférica. <https://www.troposfera.org/conceptos/unidades-de-medicion-empleadas-en-calidad-del-aire/>
- Represa, S. N., Abril, G., Ojeda, S., & García, M. F. (2017). Contaminación atmosférica en Dock Sud, pcia. de Buenos Aires, Argentina. Análisis de su comportamiento temporal en el período 2011-2017. *Centro de Investigaciones Del Medio Ambiente Universidad de La Plata*, 2, 1–15.
- Rojas, B. L., & Garibay, B. V. (2003). Las partículas suspendidas , aeropartículas o aerosoles : ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo? *Gaceta Ecológica*, 69(octubre-diciembre), 29–44.
- Salazar Ávila, D. (2018). *Análisis del comportamiento del Bióxido de Azufre (SO₂) y su relación con la temperatura: Caso Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) 2011-2016*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Salcido, A., Celada Murillo, A. T., Tamayo Flores, G. A., Hernández Flores, N., Carreón Sierra, S., Martínez Flores, M. A., & Colín Aguilar, A. L. (2019). Calidad del aire y monitoreo atmosférico. *Revista Digital Universitaria*, 20(3), 12. <https://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n3.a3>
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2022). *Datos Viales*. TPDA Histórico. <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/>
- Secretaría de Salud. (2015). *Normas Oficiales Mexicanas*. <https://www.gob.mx/salud/en/documentos/normas-oficiales-mexicanas-9705>
- Secretaría de Salud. (2019). Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de prot. En *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019
- Secretaría de Salud. (2020a). Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-SSA1-2020, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO). Valores normados para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente. En *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5601282&fecha=25/09/2020
- Secretaría de Salud. (2020b). Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-023-SSA1-2020, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de nitrógeno (NO₂). Valores normados para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire amb. En *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Salud. (2021a). Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2021, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. En *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633956&fecha=28/10/2021
- Secretaría de Salud. (2021b). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO)

- en el aire ambiente como medida de p. En *Diario Oficial de La Federación de La Federación*.
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2021c). Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente como medi. En *Diario Oficial de la Federación*.
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2021d). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. En *Diario Oficial de la Federación*. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021
- Secretaría del Medio Ambiente. (2007). Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. En *Gobierno del Estado de México* (pp. 11–20).
https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma_pdf_ie_zm_vt.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente. (2012). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de Toluca 2012-2017*. Gobierno del Estado de México.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/69287/8_ProAire_ZMVT.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente. (2018). *Programa de gestión para mejorar la calidad del aire en el Estado de México 2018-2030*. Gobierno del Estado de México.
http://proaire.edomex.gob.mx/proaire_edomex
- Secretaría del Medio Ambiente. (2020a). *¿Qué es la red?* Red Automática de Monitoreo Atmosférico de La ZMVT. https://rama.edomex.gob.mx/que_es_red
- Secretaría del Medio Ambiente. (2020b). *Estaciones de Monitoreo*. Red Automática de Monitoreo Atmosférico de La ZMVT. <https://rama.edomex.gob.mx/xonacatlan>
- Secretaría del Medio Ambiente. (2021a). *Índice de la calidad del aire, reporte diario*.
http://rama.edomex.gob.mx/sites/rama.edomex.gob.mx/files/files/REPDI_1810202116.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente. (2021b). *Reporte horario de Calidad del Aire de la ZMVT*. Red Automática de Monitoreo Atmosférico de La ZMVT.
<http://rama.edomex.gob.mx/calidaddelaire>
- SEMARNAT. (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. *Diario Oficial de La Federación*.
- SEMARNAT. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida* (p. 28). Cuadernos de divulgación ambiental.
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>
- SEMARNAT. (2015). *Guía para la elaboración de Programas para la Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (Pro Aire)*. Dirección General de Gestión de la Calidad del

- Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.
- SEMARNAT. (2018). *Fuentes de Contaminación Atmosférica*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2019). Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. En *Diario Oficial de la Federación*.
- Simioni, D. (2003). *Fortalecimiento de la conciencia ciudadana para la formulación de políticas de control de la contaminación atmosférica en tres metrópolis de América Latina* (Organización de las Naciones Unidas (ed.)). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2351/1/S02121026_es.pdf
- Skiba, Y. N., & Parra, D. (2011). *Introducción a los métodos de dispersión y control de contaminantes* (pp. 26–30). Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.
- SMA. (2017). *Principales Clases de Contaminantes del aire*. Subsecretaría de Gestión Ambiental de Coahuila. <https://www.sema.gob.mx/SGA-MONITOREO-CLASES.htm#>
- Sura Castellanos, K. A. (2018). *Análisis de las concentraciones del Bióxido de Nitrógeno, a partir de los datos de la RAMA-ZMVT, 2011-2016*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Téllez, J., Rodríguez, A., & Fajardo, Á. (2006). Contaminación por monóxido de carbono: un problema de salud ambiental. *Revista de Salud Pública*, 8(1), 108–117. <https://doi.org/10.1590/s0124-00642006000100010>
- Trejo, R. (2006). El IMECA: Indicador del Grado de Contaminación de la Atmósfera. *Conciencia Tecnológica*, 31, 50–53. <https://www.redalyc.org/pdf/944/94403111.pdf>
- Vallero, D. (2014). Chapter 7 - Air Pollutant Hazards. In *Fundamentals of Air Pollution* (Fifth Edit, pp. 197–214). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124017337000074>
- Vásquez Cortez, A. H. (2017). *Tendencia de la Calidad del Aire en Monterrey y su Zona Metropolitana*. Escola Técnica Superior d'Enginyeria de Camins. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/112133/Tendencia de la calidad del aire de Monterrey y su Área Metropolitana- Hugo Vasquez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/112133/Tendencia%20de%20la%20calidad%20del%20aire%20de%20Monterrey%20y%20su%20%C3%81rea%20Metropolitana-Hugo%20Vasquez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Venegas, L., & Mazzeo, N. (2012). La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*, 1–11. [http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/cliv2/public/actas congreso/15.Venegas.CLIV2.pdf](http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/cliv2/public/actas%20congreso/15.Venegas.CLIV2.pdf)
- Villasante Colina, J. (2000). Tipos de contaminación, sus fuentes y efectos en el estuario de Santoña. *Monte Buciero*, 5, 211–224.
- WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- Yassi, A., Kjellström, T., De Kok, T., & Guidotti, T. L. (2002). Salud Ambiental Básica. En *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente* (Primera Ed, Vol. 23, Issue

http://www.pnuma.org/educamb/documentos/salud_ambiental_basica.pdf