



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



Facultad de Planeación Urbana y Regional

**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.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRESENTA:
JANIS YOLOTZIN ANGUIANO MIRANDA**

**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. EN A. ANA MARCELA GÓMEZ HINOJOS**

Toluca de Lerdo, Estado de México; Septiembre, 2018

Dedicatorias

*A ti querido Dios que siempre tienes palabra para mí,
“Y Jehová va delante de ti; él estará contigo, no te dejará; ni desampará; no
temas ni te intimides”*

Deuteronomio.31:8

*A mi familia, principalmente a mi Papá, a mis hermanos, a mis cuñadas y a
cada uno de mis sobrinos.*

*A ti, que, aunque ya no estés físicamente, durante el tiempo que compartimos
juntas me diste las herramientas suficientes para ser una mujer fuerte y
valiente como tú, gracias mi mami amada.*

Agradecimientos

Gracias primeramente a Dios por su infinito amor y por no soltarme; por enseñarme que debo esforzarme y ser valiente y que al que cree todo le es posible.

Gracias a mis hermanos Oscar y Oswaldo; a sus esposas Ale y Brenda, por siempre tener palabras de ánimo, por su cariño y por acompañarme durante este proceso.

Gracias a mis sobrinos Luka, Andy, Evan, Ian y Neri por llenarme de vitalidad en momentos de estrés y desánimo, gracias por sus preciosas sonrisas y cariños.

Gracias a mi papá Rubén Anguiano por el apoyo incondicional brindado en esta etapa de mi vida.

Gracias a mi directora la **Dra. Ana Marcela Gómez Hinojos** por su confianza, disposición y exigencia; por el apoyo académico y moral brindado durante la investigación; y por siempre mantener un ambiente de trabajo tan ameno con el carisma que la caracteriza.

Gracias a mis revisores, el **Dr. Jorge Tapia Quevedo** y al **Dr. Gustavo Álvarez Arteaga** por contribuir ampliamente a mejorar el presente trabajo de investigación, gracias por sus observaciones y por la disposición de atender las dudas que surgieron.

Contenido

INTRODUCCIÓN	13
METODOLOGÍA	19
A. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	20
B. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
C. POBLACIÓN DE ESTUDIO	20
D. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	21
E. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	22
F. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	23
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	25
1.1 ESTUDIOS SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR PARTÍCULAS PM ₁₀ EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL	25
1.2 ESTUDIOS SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR PARTÍCULAS PM ₁₀ EN MÉXICO	31
1.3 ESTUDIOS SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR PARTÍCULAS PM ₁₀ : RAMA-ZMVT	34
EPÍLOGO.....	37
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	39
2.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	39
2.1.1 Tipos de contaminantes atmosféricos.....	42
2.1.1.1 Tipo de contaminantes según su origen	42
2.1.1.2 Contaminantes primarios	43
2.1.1.3 Contaminantes secundarios	45
2.1.1.4 Contaminantes criterio.....	46
2.1.2 Principales fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera.....	49
2.1.2.2 Fuentes naturales y antropogénicas	49
2.1.2.3 Otras clasificaciones de las fuentes de emisión	50
2.1.2.3.1 Fuentes fijas	50
2.1.2.3.2 Fuentes de área	50
2.1.2.3.3 Fuentes móviles	51
2.1.3 Efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana y el ambiente.....	51
2.2 MONITOREO ATMOSFÉRICO A TRAVÉS DE LA RAMA-ZMVT	54
2.2.1 Antecedentes de la RAMA-ZMVT	54
2.2.2 Consideraciones para el diseño de la RAMA-ZMVT	55
2.2.3 Integración de la RAMA-ZMVT.....	57
2.2.4 Estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT	57
2.2.5 Contaminantes que miden las estaciones de la RAMA-ZMVT	60
2.3 ÍNDICE METROPOLITANO DE LA CALIDAD DEL AIRE COMO MECANISMO DE MONITOREO.....	62
2.4 PROGRAMA DE GESTIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE (PROAIRE)	63
2.5 MATERIAL PARTICULADO (PM) COMO PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE.....	64

2.5.1 Definición.....	64
2.5.2 Fuentes de emisión del Material Particulado.....	66
2.5.3 Tipos de partículas.....	67
2.5.3.1 Por su origen.....	67
2.5.3.1.2 Partículas primarias	67
2.5.3.1.3 Partículas secundarias	68
2.5.3.2 Por su tamaño	69
2.5.4 Efectos en la salud por la presencia de material particulado (PM) en el aire	71
2.5.5 Efectos del PM en el Medio Ambiente.....	74
2.6 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR PARTÍCULAS PM ₁₀ EN LOS MUNICIPIOS DE LA RAMA-ZMVT..	75
2.6.1 Efectos en la salud humana asociados a las PM ₁₀	75
2.6.2 Fuentes de emisión de partículas PM ₁₀	76
2.6.3 Factores que influyen en la dispersión de PM ₁₀	77
2.6.4 Principales fuentes de emisión que influyen en las concentraciones de partículas PM ₁₀ en la RAMA-ZMVT	78
2.7 MARCO JURÍDICO SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR PM ₁₀ .	88
2.7.1 Normatividad sobre PM ₁₀ en México	90
2.7.1.1 Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014.....	90
2.7.1.2 Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993	92
2.7.2 Normatividad a nivel internacional sobre PM ₁₀	92
2.7.2.1 Guías de Calidad del Aire (AQG) de la OMS	93
2.7.2.2 Unión Europea (UE)	94
2.7.2.3 EPA.....	95
EPÍLOGO.....	97
CAPÍTULO 3. MARCO CONTEXTUAL.....	100
3.1 LOCALIZACIÓN	100
3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	103
3.2.1 Orografía y relieve.....	103
3.2.2 Clima.....	105
3.2.3 Meteorología.....	108
3.2.4 Dinámica de vientos	109
3.3 ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS DE LOS MUNICIPIOS DE LA RAMA-ZMVT.....	112
3.3.1 Dinámica poblacional.....	112
3.3.2 Distribución de la población sensible	113
3.3.3 Actividades económicas	114
3.3.3.1 Actividades del sector primario.....	114
3.3.3.2 Actividades del sector secundario.....	114
3.3.3.3 Actividades del sector terciario	115
3.3.4 Vías de comunicación	115
3.3.5 Usos de suelo.....	117

EPÍLOGO.....	118
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	120
4.1 CONCENTRACIONES HORARIAS DE PM ₁₀ EN LA RAMA-ZMVT DURANTE 2011-2017	121
4.1.1 PM ₁₀ /hora por estación en el año 2011	122
4.1.1.1. Estación AP	122
4.1.1.2. Estación CB	124
4.1.1.3. Estación CE	125
4.1.1.4 Estación MT	126
4.1.1.5 Estación OX.....	127
4.1.1.6 Estación SC	128
4.1.1.7 Estación SM	129
4.1.2 PM ₁₀ /hora por estación en el año 2012	130
4.1.2.1 Estación AP	130
4.1.2.2 Estación CB	132
4.1.2.3 Estación CE	133
4.1.2.4 Estación MT	134
4.1.2.5 Estación OX.....	135
4.1.2.6 Estación SC	136
4.1.2.7. Estación SM	137
4.1.3 PM ₁₀ /hora por estación en el año 2013	138
4.1.3.1 Estación AP	138
4.1.3.2 Estación CB	140
4.1.3.3 Estación CE	141
4.1.3.4 Estación MT	142
4.1.3.5 Estación OX.....	143
4.1.3.6 Estación SC	144
4.1.3.6 Estación SM	145
4.1.4 PM ₁₀ /hora por estación en el año 2014	146
4.1.4.1 Estación AP	146
4.1.4.2 Estación CB	148
4.1.4.3 Estación CE	149
4.1.4.4 Estación MT	150
4.1.4.5 Estación OX.....	151
4.1.4.6 Estación SC	152
4.1.4.7 Estación SM	153
4.1.5 PM ₁₀ /hora por estación en el año 2015	154
4.1.5.1 Estación AP	154
4.1.5.2 Estación CB	156
4.1.5.3. Estación CE	157
4.1.5.4. Estación MT	158

4.1.5.5. Estación OX.....	159
4.1.5.6. Estación SC	160
4.1.5.7. Estación SM	161
4.1.6 PM_{10} /hora por estación en el año 2016.....	162
4.1.6.1. Estación CB.....	162
4.1.6.2. Estación CE	164
4.1.6.3. Estación MT.....	165
4.1.6.4. Estación OX.....	166
4.1.6.5. Estación SC	167
4.1.6.6. Estación SM	168
4.1.7 PM_{10} /hora por estación en el año 2017.....	169
4.1.7.1. Estación CB.....	169
4.1.7.2. Estación CE	171
4.1.7.3. Estación MT.....	172
4.1.7.4. Estación OX.....	173
4.1.7.5. Estación SC	174
4.1.7.6. Estación SM	175
4.1.7.7 Comportamiento horario de PM_{10} en la RAMA-ZMVT (2011-2017)	176
4.1.7.8 Dispersión de las concentraciones de PM_{10} por estación durante 2011-2017	178
4.2 CONCENTRACIONES MENSUALES DE PM_{10} EN LA RAMA-ZMVT DURANTE 2011-2017	181
4.2.1 PM_{10} /mensual por estación en el año 2011	182
4.2.1.1. Estación AP.....	182
4.2.1.2. Estación CB.....	184
4.2.1.3. Estación CE	185
4.2.1.4. Estación MT.....	186
4.2.1.5. Estación OX.....	187
4.2.1.6. Estación SC	188
4.2.1.7. Estación SM	189
4.2.2 PM_{10} /mensual por estación en el año 2012.....	190
4.2.2.1 Estación AP.....	190
4.2.2.2. Estación CB.....	192
4.2.2.3 Estación CE	193
4.2.2.4 Estación MT.....	194
4.2.2.5 Estación OX.....	195
4.2.2.6 Estación SC	196
4.2.2.7 Estación SM	197
4.2.3 PM_{10} /mensual por estación en el año 2013.....	198
4.2.3.1 Estación AP.....	198
4.2.3.2 Estación CB.....	200
4.2.3.3 Estación CE	201
4.2.3.4 Estación MT.....	202

4.2.3.5 Estación OX.....	203
4.2.3.6 Estación SC	204
4.2.3.7 Estación SM.....	205
4.2.4 <i>PM₁₀/mensual por estación en el año 2014</i>	206
4.2.4.1 Estación AP.....	206
4.2.4.2 Estación CB.....	208
4.2.4.3 Estación CE	209
4.2.4.4 Estación MT.....	210
4.2.4.5 Estación OX.....	211
4.2.4.6 Estación SC	212
4.2.4.7 Estación SM.....	213
4.2. <i>PM₁₀/mensual por estación en el año 2015</i>	214
4.2.5.1 Estación AP.....	214
4.2.5.2 Estación CB.....	216
4.2.5.3 Estación CE	217
4.2.5.4 Estación MT.....	218
4.2.5.5 Estación OX.....	219
4.2.5.6 Estación SC	220
4.2.5.7 Estación SM.....	221
4.2.6 <i>PM₁₀/mensual por estación en el año 2016</i>	222
4.2.6.1 Estación CB.....	222
4.2.6.2 Estación CE	224
4.2.6.3 Estación MT.....	225
4.2.6.4 Estación OX.....	226
4.2.6.5 Estación SC	227
4.2.6.6 Estación SM.....	228
4.2.7 <i>PM₁₀/mensual por estación en el año 2017</i>	229
4.2.7.1 Estación CB.....	229
4.2.7.2 Estación CE	231
4.2.7.3 Estación MT.....	232
4.2.7.4 Estación OX.....	233
4.2.7.5 Estación SC	234
4.2.7.6 Estación SM.....	235
4.2.7.7 <i>Comportamiento mensual de PM₁₀ en la RAMA-ZMVT (2011-2017)</i>	236
4.2.7.8 <i>Correlación lineal simple entre las concentraciones de PM₁₀ y precipitación anual durante el periodo 2011-2017</i>	238
4.2.7.9 <i>Variación entre la Precipitación - concentraciones de PM₁₀</i>	241
4.3 CONCENTRACIONES ANUALES DE PM ₁₀ EN LA RAMA-ZMVT DURANTE 2011-2017	242
4.3.1 <i>Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2011</i>	243
4.3.2 <i>Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2012</i>	244
4.3.3 <i>Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2013</i>	245

<i>4.3.4 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2014</i>	246
<i>4.3.5 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2015</i>	247
<i>4.3.6 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2016</i>	248
<i>4.3.7 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2017</i>	249
<i>4.3.8 Comportamiento anual de PM₁₀ en las estaciones de la RAMA-ZMVT (2011-2017)</i>	250
<i>4.3.9 Número de días fuera de la Norma Oficial Mexicana de PM₁₀ por estación (2011-2017)</i>	253
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	256
CONCLUSIONES	262
RECOMENDACIONES	264
BIBLIOGRAFÍA	266

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Composición de la atmósfera</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 2 Clasificación de los contaminantes según su origen</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3 Contaminantes primarios.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 4 Contaminantes secundarios</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5 Clasificación de las fuentes de emisión.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 6 Aspectos para el diseño de la RAMA-ZMVT</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 7 Aspectos generales de las estaciones de la RAMA ZMVT.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 8 Contaminantes que miden las estaciones de la RAMA-ZMVT</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 9 Escala IMECA</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 10 Programas para mejorar la calidad del aire (ProAire).....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 11 Emisiones de partículas PM₁₀ por tipo de fuentes en la ZMVT, 2004* ...</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 12 Parques industriales en los municipios de Lerma y Toluca</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 13 Emisiones de PM₁₀ por fuentes fijas y sector en la ZMVT (2010)</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 14 Vialidades y puntos de conflicto vial alrededor de la RAMA-ZMVT</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 15 Emisiones de PM₁₀ por fuentes móviles en la RAMA-ZMVT, 2010</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 16 Norma Oficial Mexicana de partículas PM₁₀.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 17 Directrices de la calidad del aire (AQG) de la OMS</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 18 Valores Límite Permisibles de PM₁₀ (UE-EC).....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 19 Valores Límite permisibles de PM₁₀ (U.S. EPA).....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 20 Resumen de las normas para partículas PM₁₀ en México y el mundo, 2018</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 21 Municipios considerados para la calidad del aire en la ZMVT.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 22 Elevaciones de los municipios de la RAMA-ZMVT.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 23 Población de los siete municipios que abarca la RAMA-ZMVT.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 24 Grupos de edad de la población sensible.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 25 Escala del Coeficiente de Variación</i>	<i>178</i>
<i>Tabla 26 Medias de dispersión para la determinación del comportamiento horario de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante 2011-2017.</i>	<i>179</i>
<i>Tabla 27 Porcentaje de precipitación y concentraciones de PM₁₀.....</i>	<i>239</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1 Atenuación por Radiación Beta</i>	22
<i>Figura 2 Contaminantes criterio</i>	46
<i>Figura 3 Efectos de los contaminantes criterio en la salud humana</i>	48
<i>Figura 4 Muertes por Neumonía en niños causada por la contaminación atmosférica</i>	53
<i>Figura 5 Estaciones de la RAMA-ZMVT</i>	58
<i>Figura 6 Distribución de las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT</i>	58
<i>Figura 7 Fuentes de emisión del Material Particulado (PM)</i>	66
<i>Figura 8 Proceso de formación de las partículas secundarias</i>	68
<i>Figura 9 Tamaño del PM según diámetro aerodinámico</i>	69
<i>Figura 10 Afectaciones de las PM_{10} y $PM_{2.5}$ sobre la salud humana</i>	73
<i>Figura 11 Puntos de conflicto vial y carga vehicular en las principales vialidades alrededor de la RAMA- ZMVT</i>	86
<i>Figura 12 Marco jurídico en materia de contaminación atmosférica</i>	88
<i>Figura 13. Mapa de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca</i>	102
<i>Figura 14. Principales elevaciones dentro de los municipios de la RAMA-ZMVT</i>	104
<i>Figura 15 Tipos de clima en los municipios de la RAMA-ZMVT</i>	106
<i>Figura 16 Climograma de la RAMA-ZMVT</i>	107
<i>Figura 17 Rosa Anual de los Vientos de la RAMA-ZMVT</i>	109
<i>Figura 18 Dinámica de vientos en los municipios que abarca la RAMA-ZMVT...</i>	111
<i>Figura 19 Vías de comunicación que abarcan la RAMA-ZMVT</i>	117
<i>Figura 20 Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson</i>	238

Abreviaturas

CO Monóxido de Carbono

CO₂ Dióxido de Carbono

COV Compuesto Orgánico Volátil

EPA Environmental Protection Agency

EU Unión Europea (*European Union en inglés*)

IGCEM Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México

IMECA Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía

LGEEPA Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

LMP Límite Máximo Permisible

µg/m³ microgramo por metro cúbico

PM Material Particulado (*Particulate Matter en inglés*)

NO₂ Dióxido de Nitrógeno

NOM Norma Oficial Mexicana

NO_x Óxidos Nitrosos

O₃ Ozono

OMS Organización Mundial de la Salud

PM_{2.5} Material Particulado menor a 2.5 micras

PM₁₀ Material Particulado menor a 10 micras

PST Partículas Suspendidas Totales

RAMA Red Automática de Monitoreo Atmosférico

SO_x Óxidos de Azufre

SO₂ Dióxido de Azufre

ZMVM Zona Metropolitana del Valle de México

ZMVT Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Introducción

La contaminación del aire es un serio problema ambiental y de salud causado por factores naturales y antropogénicos; por lo general característico de ciudades altamente urbanizadas, en las cuales se desarrollan actividades industriales, se presenta alto tráfico vehicular y con una población numerosa (Camacho-García & Flamand, 2008; Solarte, et al., 2002). Como resultado de dichas actividades se generan emisiones a la atmósfera, las cuales pueden incluir Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos, Óxidos de Azufre (SO_x), Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), mismos que al presentarse en altas concentraciones por determinado tiempo pueden representar un riesgo para la salud de la población (Velasco-García, 2005).

Para el caso específico de las Partículas o Material Particulado (PM, por sus siglas en inglés *Particulate Matter*), estas son un indicador representativo de la contaminación del aire y están dentro de los contaminantes más nocivos para las personas.

El Material Particulado (PM) es una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire que pueden tener diversas formas y tamaños (OMS, 2018; SIMAT¹, 2018). Sus características físicas y químicas son determinadas por las fuentes de emisión y por los procesos de formación (Martin, 2005)

El criterio utilizado para definir el tamaño de las partículas es el diámetro aerodinámico (SEMARNAT², 2011). Aquellas partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micras³ se conocen como **PM₁₀**, mientras que aquellas que tienen un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras se conocen como **PM_{2.5}** (INE⁴ 2009).

¹ Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México

² Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

³ 1 micra = milésima parte de un milímetro también puede encontrarse como micrómetro

⁴ Instituto Nacional de Ecología

Cabe señalar que las mediciones de las concentraciones de PM₁₀ se expresan en microgramos por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)¹.

En el caso de las PM₁₀, éstas son partículas inhalables y tan pequeñas como para ingresar en la región torácica del tracto respiratorio (INE, 2009). Se originan principalmente de los procesos de resuspensión de partículas depositadas en las calles, por el material resuspendido de los suelos en los cultivos y en la minería, por actividades de construcción, así como de reacciones con otros gases en la atmósfera, por ejemplo, con los Óxidos de Azufre (SO_x) y los Óxidos de Nitrógeno (NO_x) (SEMARNAT, 2011).

Los componentes de las PM₁₀ están determinados por las fuentes de origen, pueden estar compuestas de sulfatos, nitratos, amoníaco, cloruro de sodio, hollín, polvos, trazas de algunos metales y agua e incluso polen, virus o bacterias, compuestos que convierten a las PM₁₀ en nocivas para la salud humana (OMS², 2018; Velasco-García, 2005; INE, 2009).

Según la Organización Mundial de la Salud, la contaminación por Material Particulado (PM) conlleva efectos en la salud incluso en concentraciones muy bajas, sin embargo, no se ha identificado todavía ningún límite por debajo del cual no se presenten daños en la salud (OMS, 2018).

Los efectos del Material Particulado (PM) sobre la salud provienen de la exposición que actualmente experimenta la población de zonas urbanas y rurales (OMS, 2018). La exposición a altas concentraciones de partículas PM₁₀ está relacionada con el aumento de la mortalidad o morbilidad diaria y a largo plazo, ya que éstas pueden penetrar y alojarse profundamente dentro de los pulmones y originar enfermedades respiratorias (OMS, 2018; Solarte, et al., 2002).

En este contexto los límites máximos permisibles de PM₁₀ para la protección de la salud en México, se establecen en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 que establece un Límite Máximo Permissible de concentraciones promedio de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

¹ μg = microgramo (millonésima parte del gramo); m^3 = metro cúbico de aire

² Organización Mundial de la Salud

(promedio 24 horas). y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (promedio anual) de PM_{10} . Otros organismos internacionales como la OMS recomiendan un LMP¹ de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas) y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) de PM_{10} , mientras que la EPA² establece un LMP de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas) y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) de PM_{10} ; finalmente la UE³ establece un LMP de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas) y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) de PM_{10} .

En el contexto local, la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT) monitorea las concentraciones de los seis contaminantes criterio, nombrados así por ser los principales parámetros de la calidad del aire debido a los efectos adversos que tienen sobre la salud humana (GEM⁴, 2007) y son los siguientes: Ozono (O_3), Material Particulado menor o igual a 10 micrómetros⁵ (PM_{10}), Material Particulado menor o igual a 2.5 micrómetros ($\text{PM}_{2.5}$), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y Dióxido de Azufre (SO_2) por medio de siete estaciones de monitoreo: Aeropuerto (AP), Ceboruco (CB), Toluca Centro (CE), Metepec (MT), Oxtotitlán (OX), San Cristóbal Huichochitlán (SC) y San Mateo Atenco (SM). Sin embargo, la estación AP fue apagada a finales del año 2015, por lo que registró datos hasta el mes de septiembre de ese mismo año.

Objetivo general

Analizar el comportamiento de las concentraciones promedio de Material Particulado menor a 10 micras (PM_{10}) a partir de los datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT), con el fin de observar el comportamiento de las PM_{10} en las siete estaciones durante el periodo 2011-2017.

¹ Límite Máximo Permisible

² Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos).

³ Unión Europea

⁴ Gobierno del Estado de México

⁵ Sinónimo de micra

Objetivos particulares

- Analizar el comportamiento horario de las concentraciones promedio de PM₁₀ en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017 empleando medidas de dispersión.
- Observar el comportamiento mensual de las concentraciones promedio de PM₁₀ en cada estación estableciendo la correlación entre éstas y la precipitación anual en los meses de la época de lluvias en la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017.
- Observar el comportamiento anual de las concentraciones promedio de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017.
- Evaluar el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles establecidos en la NOM-025-SSA1-2014 para la protección de la salud en las estaciones de la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017.

En la hipótesis del presente trabajo se plantea que la mayor concentración de partículas PM₁₀ se registran en las estaciones de la RAMA-ZMVT correspondientes a San Mateo Atenco (SM) y Aeropuerto (AP), argumento basado en que dichas estaciones se encuentran en la zona norte y este de la RAMA-ZMVT caracterizadas por la cercanía con parques industriales y con vialidades de importante flujo vehicular. En este sentido estimar las concentraciones de PM₁₀ registradas en las estaciones mencionadas nos permite conocer si se encuentran dentro de los Límites Máximos Permisibles establecidos por la normatividad oficial y en consecuencia no representan un riesgo para la salud de la población.

Se identificaron las estaciones de la RAMA-ZMVT que registraron concentraciones de partículas PM₁₀ fuera del LMP establecido en la NOM-025-SSA1-2014 durante 2011-2017. Las estaciones Aeropuerto (AP) y San Mateo Atenco (SM) resultaron con concentraciones que rebasan la NOM¹ en mención, sin embargo, la estación que encabezó la problemática fue la de San Cristóbal Huichochitlán (SC) con concentraciones fuera del LMP establecido en la NOM durante el 45% de los días

¹ Norma Oficial Mexicana

del periodo de estudio. Las concentraciones de PM_{10} rebasaron la NOM en horario matutino en la mayoría de las estaciones. Las concentraciones rebasaron la NOM en los meses de noviembre a febrero. Mientras que los que registraron concentraciones más bajas fueron de junio a octubre. Finalmente, las concentraciones anuales disminuyeron en los últimos años de 2014 a 2017.

El presente trabajo consta de 4 capítulos. El capítulo 1 contempla los antecedentes en tres apartados, en el primero se presentan investigaciones sobre el análisis de las concentraciones de PM_{10} llevadas a cabo en el contexto internacional. En el segundo apartado se presentan investigaciones de la misma temática desarrolladas en México; y en el tercero se abordan algunos estudios que se llevaron a cabo sobre PM_{10} particularmente en la RAMA-ZMVT.

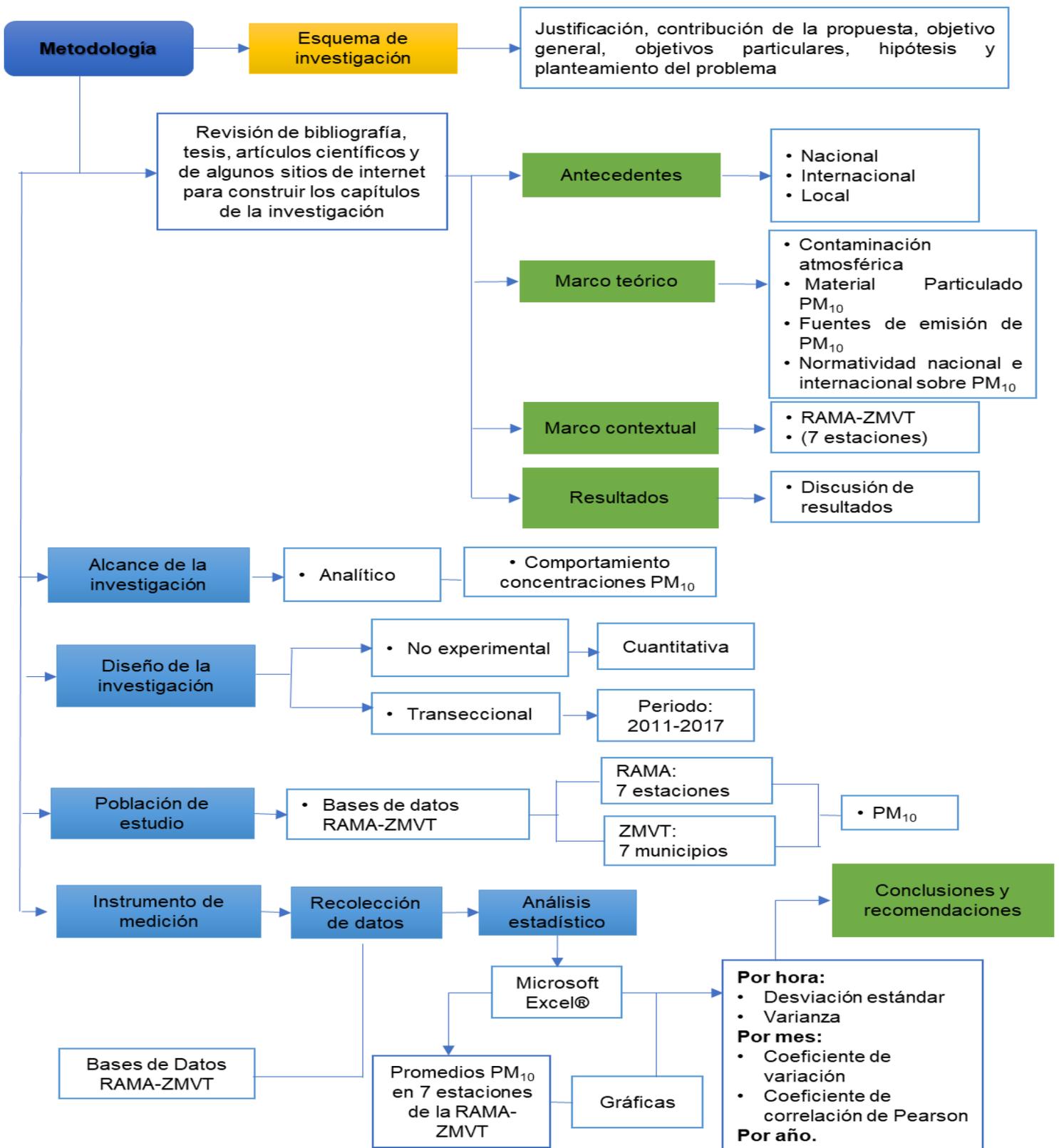
El capítulo 2 corresponde al marco teórico; se presentan los conceptos fundamentales de la investigación, entre ellos, contaminación atmosférica, tipos de contaminantes, fuentes de emisión y los efectos ocasionados por la contaminación atmosférica en la salud y el ambiente. Así mismo, se mencionan las acciones que se llevan a cabo para la gestión de la calidad del aire en la zona de estudio. Se presenta la definición del Material Particulado menor a 10 micras (PM_{10}), sus características, fuentes de emisión en general y en la zona de estudio, así como los factores que influyen en su dispersión y sus efectos en la salud y el ambiente. También se aborda el marco jurídico de PM_{10} aplicable en México y la normatividad existente en otras regiones del mundo.

El capítulo 3 corresponde al marco contextual, en el cual se presenta la localización de la zona de estudio, así como sus principales características físicas y socioeconómicas.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de las concentraciones de PM_{10} en las estaciones de la RAMA-ZMVT. Dichos resultados son presentados por hora, mes y año para cada una de las siete estaciones con sus respectivas gráficas. Además, se incluye la gráfica que representa el cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 en las estaciones de la RAMA-ZMVT durante 2011-2017.

Finalmente se presentan los apartados correspondientes a la discusión de los resultados, las conclusiones y las recomendaciones, así como las fuentes bibliográficas que sustentan la presente investigación.

Metodología



a. Alcance de la investigación

La presente investigación tiene un alcance analítico, ya que posterior al tratamiento de las bases de datos correspondientes a PM_{10} reportadas por las estaciones de la RAMA-ZMVT, se calcularon las concentraciones promedio de PM_{10} por hora, mes y año para después elaborar las gráficas con los promedios obtenidos y establecer una comparación y análisis del comportamiento de las concentraciones horarias, mensuales y anuales de PM_{10} para cada una de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT¹ a lo largo de los siete años del periodo de estudio.

b. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación fue de carácter no experimental. Ninguna variable fue manipulada o controlada, se realizó un procesamiento y análisis de las bases de datos reportadas por la RAMA-ZMVT para obtener los promedios por hora, por mes y año de las concentraciones de partículas PM_{10} en cada estación de la RAMA-la ZMVT. También se considera transeccional porque se analizaron los datos en un periodo específico comprendido por siete años, desde el año 2011 hasta el año 2017.

c. Población de estudio

La población de estudio para la presente investigación se constituye por las bases de datos reportadas por la RAMA-ZMVT, las cuales contienen datos de las concentraciones diarias de los cinco contaminantes denominados como criterio que son: partículas menores o igual a 10 micras (PM_{10}) y partículas menores o igual a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), Ozono (O_3), Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Azufre (SO_2). Se trabajó únicamente con los datos que corresponden a las concentraciones de partículas PM_{10} registradas en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT: Oxtotitlán (OX), Toluca Centro (CE), Sur Metepec

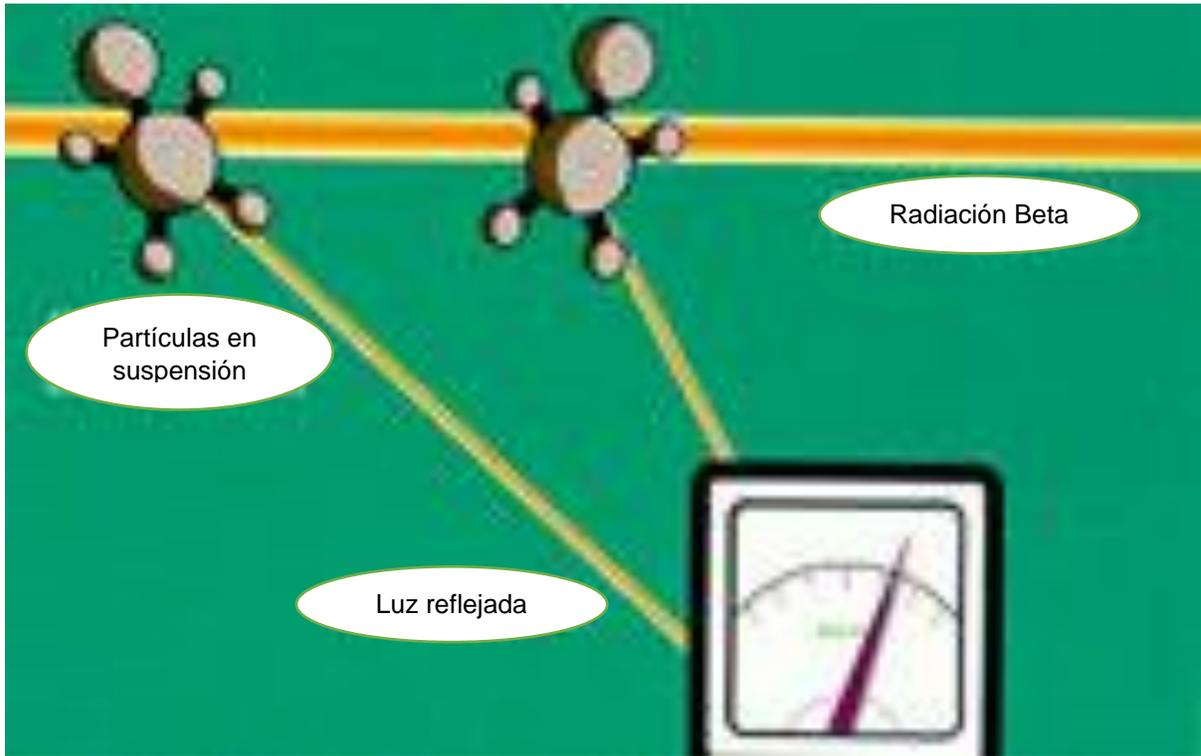
¹ Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

(MT), Ceboruco (CB), San Mateo Atenco (SM); San Cristóbal Huichochitlán (SC) y Aeropuerto (AP), esta última, actualmente no se encuentra disponible, ya que fue desconectada a finales del año 2015, registrando datos hasta el mes de septiembre de ese mismo año.

d. Instrumento de medición

Las concentraciones diarias de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en las estaciones de la RAMA-ZMVT se miden mediante “*Atenuación por radiación beta*”, técnica certificada que consiste en utilizar un elemento que genere radiación y ésta pase por una cinta de fibra de vidrio para ser cuantificada. Enseguida una bomba de vacío succiona cierta cantidad de aire-polvo combinándola con la muestra que se recolectó. Esto se coloca entre el elemento radiactivo y el detector para medir nuevamente la radiación, la cual tiene que ser menor por la presencia de la muestra. La atenuación de la señal de la radiación determina la masa de las partículas depositadas en la cinta, mientras que para determinar la concentración volumétrica de partículas se considera la presión y la temperatura (RAMA, 2018).

Figura 1 Atenuación por Radiación Beta



Fuente: RAMA, 2018 con modificación propia.

e. Recolección de datos

Se trabajó con las bases de datos de la RAMA-ZMVT, las cuales una vez depuradas y procesadas, se procedió a calcular los promedios por hora, por mes y por año de las concentraciones de partículas PM_{10} reportadas en las siete estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017; a excepción de la estación Aeropuerto (AP) de la cual se encontraban disponibles sólo los datos del año 2011 al año 2015, debido a que ésta fue desconectada a finales del 2015 registrando datos hasta el mes de septiembre de ese año.

f. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se llevó a cabo con el programa Microsoft Excel®. De inicio se realizó una depuración de las bases de datos obtenidas de la RAMA-ZMVT para trabajar únicamente con los datos correspondientes a las concentraciones de partículas PM₁₀. Posteriormente se calcularon los promedios por hora, por mes y por año para cada una de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT durante el periodo comprendido de 2011-2017.

Para el análisis del comportamiento de las concentraciones horarias de PM₁₀ se elaboró una gráfica integrativa de las concentraciones promedio de PM₁₀ durante 24 horas en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT durante el periodo de estudio (2011-2017). Se utilizaron medidas de dispersión como la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación para su análisis, obtenidos igualmente con las funciones del programa Microsoft Excel®.

En el caso del análisis del comportamiento de las concentraciones mensuales de PM₁₀, se elaboró una gráfica integrativa de las concentraciones promedio de PM₁₀ de enero a diciembre en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017. Se llevó a cabo una correlación entre la precipitación media anual y las concentraciones promedio de PM₁₀ para determinar la variación de las concentraciones de PM₁₀ en la época de lluvias.

El análisis del comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ anuales, se llevó a cabo mediante una gráfica integrativa de las concentraciones promedio de PM₁₀ reportadas en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT en los siete años del periodo de estudio.

El análisis de las concentraciones de PM₁₀ en la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017 se llevó a cabo en función de la NOM-025-SSA1-2014 que establece los Límites Máximos Permisibles de PM₁₀ para la protección de la salud humana, por lo cual también se determinó el número de días de incumplimiento de la norma en cada estación de monitoreo durante el periodo 2011-2017.

Capítulo 1

Antecedentes



Capítulo 1. Antecedentes

El reporte de la Organización Mundial de la Salud (OMS), en el 2014 desde Ginebra, Suiza, reveló que más de la mitad de la población mundial vive en ciudades con índices de contaminación 2.5 veces superior a los recomendados por el organismo (Mogrovejo-Tenecela, 2015). En ese sentido, el presente capítulo contiene algunas investigaciones en materia de contaminación atmosférica por partículas PM_{10} que han tenido lugar en distintas ciudades del mundo durante un periodo determinado.

El capítulo se divide en tres apartados; el primero corresponde a estudios sobre contaminación atmosférica por partículas PM_{10} que se han llevado a cabo a nivel internacional. En el segundo apartado se presentan investigaciones en el mismo sentido de contaminación atmosférica por PM_{10} llevadas a cabo en México; y finalmente el tercer apartado contiene investigaciones desarrolladas en la RAMA-ZMVT.

1.1 Estudios sobre contaminación atmosférica por partículas PM_{10} en el contexto internacional

La contaminación atmosférica es un problema presente en distintas partes del mundo, ya que sus implicaciones, por ejemplo, las alteraciones en la composición química de la atmósfera, las alteraciones en el clima, la lluvia ácida y el deterioro de la capa de ozono, tienen un impacto a nivel global (Mogrovejo-Tenecela, 2015),

La importancia de conocer el desarrollo de investigaciones en otras regiones del mundo respecto a contaminación del aire por PM_{10} , permite construir un panorama sobre el estado de la problemática a nivel global; además de conocer las tendencias en el desarrollo y cumplimiento de normatividad relativa a contaminación atmosférica y calidad del aire en otros países.

Triantafyllou (2000), analizó las concentraciones de PM_{10} en el periodo 1991-1994 en una zona industrial en la región de la Cuenca de Eordea, Grecia. Se analizaron los patrones de las concentraciones anuales, mensuales y diurnas en relación con

las condiciones meteorológicas como la influencia del viento, y los procesos atmosféricos que pudieren afectar las concentraciones de PM₁₀. El promedio anual de concentraciones de PM₁₀ rebasó el límite establecido por la EPA (50µg/m³).

Yang (2002), analizó datos horarios de la concentración de PM₁₀ en el periodo 1994-1999. Se utilizaron los datos registrados en la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en Taiwán. Se seleccionaron sitios de muestreo y estaciones de monitoreo para evaluar la variación espacial y estacional. Los sitios de monitoreo seleccionados incluyeron tránsito vehicular, zonas industriales y un Parque Nacional. Los resultados mostraron que la mayor concentración se presentó en la zona norte en el periodo marzo-mayo, esto atribuido al polvo arrastrado por fenómenos naturales. Los patrones estacionales de PM₁₀ se caracterizaron por altas concentraciones en invierno, atribuidas a la baja tasa de precipitación mensual y a las bajas temperaturas.

Martin (2005), realizó un estudio sobre la concentración de PST¹ y PM₁₀ en la Ciudad de Buenos Aires, Argentina para el periodo 1998-2001. Se utilizó información meteorológica y se estimaron las concentraciones diarias y anuales de PM₁₀ en cuatro zonas de la ciudad. La concentración media anual de PM₁₀ presentó valores superiores a 0.05 µg/m³ y 0.15 µg/m³ (límite establecido por la Ley 1356, Ciudad de Buenos Aires), representando un riesgo para el 51.6 % de la población total de la ciudad al menos 1 vez por año. Se observó que las principales fuentes de emisión de PM fueron residencias, comercios, pequeñas industrias, vehículos y aviones que operan en la Ciudad de Buenos Aires. Las variaciones se atribuyeron a la distribución del viento.

Inza-Aguirre, et al., (2006) realizaron un estudio de las concentraciones de PM₁₀ en el periodo de Julio de 2003 a Julio de 2004 en Beasain, Guipúzcoa (País Vasco). Se utilizaron datos de un muestreo y de una estación automática ubicada en una zona residencial con influencia de emisiones de industria siderometalúrgica, laminados y bienes de equipo. En los resultados se obtuvo que los meses de

¹ Partículas Suspendidas Totales

noviembre y marzo de 2003 registraron una mayor concentración de PM_{10} debido a la intrusión de masas de aire procedentes de África. Por otro lado, en febrero se presentaron concentraciones medias elevadas de partículas, sin embargo, el origen de estas fue antropogénico. Los niveles de PM_{10} presentaron un pico durante las mañanas de los días laborales y un segundo pico por las tardes. El promedio de los datos reportados por la estación estuvo cercano al límite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} establecido por la norma de esa región.

Maraziotis y otros (2008), realizó un análisis estadístico de la relación entre partículas respirables (PM_{10}), partículas finas ($PM_{2.5}$), partículas gruesas ($PM_{2.5-10}$) y parámetros meteorológicos durante invierno-primavera en el periodo 2005-2006 en la Ciudad de Patras, Grecia. Los sitios de monitoreo se ubicaron cerca de áreas congestionadas y con alto tránsito vehicular. Se encontró que aproximadamente el 36% de las concentraciones de PM_{10} excedieron la norma de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio más alto de PM_{10} se registró en la zona urbana.

Holst, et al. (2008) llevaron a cabo un análisis para comprobar la relación entre las condiciones meteorológicas y las concentraciones de PM_{10} en Baden-Württemberg, Alemania durante el periodo 2001-2006. Los datos de las concentraciones de PM_{10} se obtuvieron de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de la ciudad. Se tomaron en cuenta las estaciones que representaran entornos rural y urbano, y con condiciones de tráfico vehicular. Los resultados mostraron que el ciclo anual de PM_{10} suele modificarse en invierno. Se observó un incremento en el promedio de PM_{10} en las estaciones del entorno urbano debido a la existencia de diversas fuentes de emisión y al alto tránsito vehicular.

Auffhammer, et al. (2009), examinó los efectos de las enmiendas de 1990 a la Ley de Aire Limpio (*CAAA*s, *Clean Air Act Amendments of 1990*) sobre las concentraciones de PM_{10} en Estados Unidos durante el periodo 1990-2005. Las estaciones de monitoreo registraron concentraciones por encima del límite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. Las *CAAA*s redujeron las concentraciones registradas en las estaciones de monitoreo.

Larissi, et al. (2010), realizó un estudio sobre la evolución temporal de partículas PM_{10} registrados en seis estaciones de monitoreo en Atenas en el periodo 2001-2007. La principal variación estacional de las concentraciones registradas en las estaciones periféricas presentó un máximo durante el periodo caliente del año y un mínimo durante el periodo frío. Por el contrario, en las estaciones cercanas a zonas con alto tránsito vehicular no hubo una diferencia estacional clara en las concentraciones de PM_{10} . Las concentraciones de PM_{10} fueron altas en la mayoría de los sitios respecto de los límites para la protección de la salud humana establecidos por la Unión Europea (UE) ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 horas).

Unal, et al. (2011), llevó a cabo un análisis de las concentraciones de partículas PM_{10} registradas en 10 estaciones en Estambul durante el periodo 2005-2009. Se analizaron las variaciones espaciales y temporales de PM_{10} , así como sus posibles fuentes en las zonas urbanas de la ciudad. Las estaciones de monitoreo se categorizaron en tres grupos según fuentes de emisión: 1) Urbana, 2) Tránsito vehicular e 3) Industria. Los niveles de PM_{10} rebasaron el límite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio 24 horas establecido por la Unión Europea (UE) para la protección de la salud humana en puntos con tránsito vehicular alto y zonas industriales. Los patrones temporales se caracterizaron por altas concentraciones en invierno y bajas en verano.

Silva-Vinasco & Canchala-Nastar (2013), llevaron a cabo un estudio para determinar la variación espacial y temporal de partículas PM_{10} durante julio de 2010 a junio de 2011 en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. Se utilizaron los datos de las concentraciones diarias de PM_{10} registradas en cuatro estaciones de monitoreo distribuidas en las zonas norte, sur, oriente y occidente de la ciudad. Así mismo se evaluó el cumplimiento de la norma colombiana ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En los resultados se observó que las concentraciones promedio anuales no sobrepasaron el límite de la norma colombiana ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) excepto una sola estación, representando posibles riesgos sobre la salud de la población expuesta a altos niveles de contaminación. Las altas concentraciones se atribuyeron a fuentes móviles.

Zapata-Palacio (2015), realizó un estudio para determinar la relación entre la cantidad de PM en el aire y enfermedades respiratorias en la localidad de Fontibón, Bogotá. Se utilizaron datos de las concentraciones mensuales de PM₁₀ obtenidos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. La concentración promedio anual fue de 47µg/m³. Para el mismo año se reportaron 5,895 casos de patologías vinculadas al sistema respiratorio. La población más afectada fue la población adulta (mayores de 18 años) con un 61%, seguido de niños (edad promedio menor a 7 años) con 25% y niños (entre 8 y 17 años) con un 14%.

GPA¹ (2016), realizó un estudio para conocer la dispersión y los niveles de concentración de las partículas PM₁₀ en la Aglomeración de Gijón con datos de la red de monitoreo atmosférico del Principado de Asturias. La zona de estudio fue una zona urbana con vías de intenso tráfico vehicular y cercana a zonas industriales del municipio. Se consideraron las emisiones industriales, del tráfico y las emisiones portuarias. Éstas últimas derivadas de actividades propias de almacenamiento, transporte y manipulación de materiales en los puertos. En los resultados de la modelización se observó que la mayor contribución provino de las fuentes industriales (33%).

Pacsi-Valdivia (2016), analizó las variaciones espaciales y temporales de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} en Lima, Perú durante el periodo 2001-2014. Los datos fueron obtenidos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Lima Metropolitana. Se calculó el promedio horario, diario, mensual, estacional y anual de los datos de PM₁₀ y PM_{2.5} para observar su comportamiento. El promedio anual de la mayoría de las estaciones superó el promedio anual para PM₁₀ de 50 µg/m³ límite establecido en los Estándares de Calidad del Aire (ENCA) del Perú la OMS. Las mayores concentraciones de PM₁₀ se atribuyeron al tránsito vehicular y al polvo atmosférico natural.

Gómez-Comba (2017), realizó un análisis descriptivo de las variaciones diarias y anuales de PM₁₀ en Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (9

¹ Gobierno del Principado de Asturias

municipios), Colombia durante el periodo 2011-2017. Los datos se obtuvieron de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá. En ninguna de las estaciones se observaron registros de exposición a PM₁₀ promedio 24 horas con niveles de riesgo para la salud de los grupos vulnerables según el Índice de Calidad del Aire (ICA) para 2015 y 2016. El Área Metropolitana presentó niveles superiores a la norma nacional (50 µg/m³), por posibles causas como el incremento en el uso de vehículos con combustible diésel, fenómenos naturales como polvo arrastrado, el fenómeno del Niño y el cambio de una temporada seca a húmeda y la acumulación del PM.

1.2 Estudios sobre contaminación atmosférica por partículas PM₁₀ en México

Aunque en la actualidad México cuenta con las instituciones que emiten la legislación y normatividad concerniente a contaminación, no fue hasta finales de la década de los ochenta que se comenzó a tener un mayor interés por generar conocimiento en los temas de contaminación atmosférica. Esta problemática tiene una presencia marcada en las zonas metropolitanas de México, sin embargo, se ha extendido a otras ciudades (Riojas-Rodríguez, et al., 2013). Así, en este apartado se incluyen estudios a nivel nacional sobre contaminación atmosférica para conocer la evolución de la problemática en México.

Téllez-Rojo, et al. (2000), realizó un estudio en la Ciudad de México para evaluar la asociación entre las variaciones diarias de O₃ y PM₁₀, así como las muertes por enfermedades respiratorias. Los datos se obtuvieron de la Red Automática de Monitoreo Ambiental de la Ciudad de México. Se utilizaron los datos registrados de enero a diciembre de 1994. El promedio diario de PM₁₀ rebasó en ocasiones el límite establecido por la NOM-025-SSA1-1993 (150 µg/m³). Respecto al número de muertes por causas respiratorias y mortalidad por obstrucción crónica pulmonar, se observó una relación significativa entre éstas y las PM₁₀ en diferentes intervalos. Este estudio confirmó la importancia del impacto de las PM₁₀ en la morbilidad respiratoria en los ancianos, para proporcionar estimaciones más precisas de los impactos negativos de PM₁₀ en la mortalidad.

Vega, et al. (2004), realizó una investigación sobre la concentración de PM₁₀ en el Área Metropolitana de la Ciudad de México durante el periodo 2000-2002. Se seleccionaron tres sitios de muestreo: 1) zona industrial; 2) área comercial y 3) zona residencial. Los resultados obtenidos mostraron que las concentraciones en la zona industrial excedieron el límite de 120 µg/m³ para promedio 24 horas de PM₁₀ en 12 días del muestreo, las concentraciones intermedias en la zona comercial y las concentraciones más bajas se observaron en la zona residencial.

Villa-Mar (2007), desarrolló una investigación para cuantificar los beneficios económicos en el área de salud e identificar los beneficios potenciales de reducir la contaminación atmosférica en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM). Se utilizaron los datos registrados para PM_{10} en las cinco estaciones de monitoreo del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental. De 1998 a 2001 los niveles de concentración promedio anual en el área excedieron la norma, considerando como posibles causas los cambios de uso de suelo y combustibles, el aumento en el parque vehicular y la actividad industrial.

Campos, et al. (2008) analizaron los datos de las concentraciones de PM_{10} y demás contaminantes criterio al norte de la Ciudad de Chihuahua durante el año 2007. La estación de monitoreo fue ubicada dentro de un parque industrial rodeado de unidades habitacionales. Se tomaron como referencia las Normas Oficiales Mexicanas (NOM's) y el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA). Los niveles de PM_{10} se mantuvieron por debajo de los 50 puntos IMECA durante el 50% de los días, lo que representó una "buena" calidad del aire. El resto de los días, los valores estuvieron en el rango de "moderada". Por otro lado, los valores estuvieron cerca de los límites establecidos por la NOM para promedio 24 horas ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con $117 \mu\text{g}/\text{m}^3$, así como para el promedio anual ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente, los resultados del análisis temporal de las partículas PM_{10} mostraron que las concentraciones más altas se presentaron en la temporada fría (enero-marzo y octubre-diciembre).

Canales-Rodríguez, et al. (2014), realizó un estudio sobre la concentración y caracterización química de las partículas PM_{10} en Mexicali, Baja California. El trabajo se realizó en dos sitios de muestreo representativos de una zona urbana y una zona rural. Los muestreos se realizaron en dos temporadas: invierno y verano. Se tomó en cuenta el límite de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la NOM para PM_{10} . La mayoría de los datos tomados para las dos zonas de estudio presentaron las concentraciones más elevadas en la temporada de invierno. Las razones de la diferencia de niveles de PM_{10} del invierno al verano se atribuyó principalmente a la reducción de la quema de madera, basura residencial, y otros desechos que se dan durante diciembre y enero, además de días festivos en la zona urbana y rural durante todo el invierno.

Figuroa-Montaña, et al. (2016), llevó a cabo un análisis de las tendencias de PM₁₀ y O₃, así como la asociación con enfermedades cardiovasculares y neumonía en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) para el periodo 1996-2009. Los datos de PM₁₀ y O₃ se registraron en las 8 estaciones del Sistema de Monitoreo del Aire de Jalisco. Los registros mensuales de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y neumonía se obtuvieron del Sistema Nacional de Información en Salud. Se tomaron en cuenta los límites establecidos por las normas aplicables para PM₁₀ y O₃ (NOM-025-SSA1-2014 y NOM-020-SSA1-2014 respectivamente) para evaluar su cumplimiento. La estación que presentó las mayores excedencias en el límite permisible de PM₁₀, se caracteriza por la concentración de industrias cementeras y de transformación, así como la producción de alfarería y artesanías, actividades que implican emisión de partículas en sus procesos de producción. Respecto a la asociación entre las enfermedades cardiovasculares se observó un aumento de mortalidad de un 30 al 40 % por exposición crónica a PM₁₀ y O₃.

1.3 Estudios sobre contaminación atmosférica por partículas

PM₁₀: RAMA-ZMVT

Partiendo de que en la presente investigación se utilizan datos de la RAMA-ZMVT se considera pertinente abordar algunas investigaciones en las cuales también se han utilizado datos de la RAMA-ZMVT, además de que tener conocimiento de las investigaciones llevadas a cabo en el contexto local nos permite establecer un panorama del estado de la calidad del aire en la zona en donde desarrollamos todas nuestras actividades y tomar las medidas necesarias para evitar la exposición a la contaminación por PM₁₀, así como exigir a las autoridades correspondientes se controle la problemática.

Romero-Guzmán, et al. (2007), realizó una investigación para determinar la composición del PM e identificar la distribución de este contaminante en el Valle de Toluca. Para determinar la distribución espacial de PM₁₀ se utilizaron los datos registrados en la RAMA del periodo 1998-2005. En los resultados se observó que el material particulado se concentra en la zona Norte del Valle de Toluca, sin embargo, debido a que el PM sigue una trayectoria de Sureste a Noroeste, éste puede concentrarse en las partes más bajas del Valle de Toluca por un determinado tiempo dependiendo de las condiciones climáticas (Romero-Guzmán, et al., 2007).

Romero-Guzmán (2009), realizó un análisis sobre la composición química y morfológica de las partículas, así como las fuentes de emisión fijas y móviles, los factores meteorológicos, los inventarios de emisiones para determinar hacia donde se dispersan en el área que abarca la RAMA-ZMVT. Los resultados indicaron que las PST en fracciones finas y gruesas son las que rebasaron los valores IMECA en más de una ocasión. Respecto a la composición química de las partículas, se encontraron elementos químicos como enlaces¹ C-S, Ca-S-O, C-S-V-Ti, Si-Al-O, C-O así como Hierro (Fe), originados por procesos de combustión, materiales de

¹ C= Carbono; S= Azufre; Ca= Calcio; O= Oxígeno; V= Vanadio; Ti= Titanio; Al= Aluminio

construcción y material de origen biológico. Además de encontrar algunos Compuestos Orgánicos Volátiles (COV¹).

Cuellar, et al. (2009), llevó a cabo un estudio para analizar el comportamiento temporal de las partículas PM₁₀, identificar las diferencias de sus concentraciones y morfología en la zona industrial de Toluca durante 2005-2006. Se seleccionaron 12 sitios de monitoreo. El muestreo se inició en primavera 2005 hasta el verano 2006. Las mayores concentraciones se obtuvieron en el periodo de estiaje (otoño-invierno) y estuvieron por encima del límite establecido por la NOM (120 µg/m³ promedio en 24 horas).

Flores-Ruiz, et al. (2010), estimó la exposición a las partículas en la RAMA-ZMVT durante el periodo 1998-2005. Se elaboró un catálogo de concentraciones máximas considerando las 7 estaciones de la RAMA² y junto con éste, se tomó en cuenta la NOM de PM₁₀ vigente en ese entonces. Las concentraciones anuales más altas se presentaron en San Cristóbal Huichochitlán, Tepatitlán, Toluca Centro, Aeropuerto; y las más bajas en Oxtotitlán a excepción de 1998-1999, en donde las más bajas se presentaron en San Mateo Atenco. La concentración promedio anual estuvo por debajo de la NOM, sin embargo, de 2003 en adelante las concentraciones rebasaron la NOM en todas las estaciones de monitoreo.

García-Chávez (2014), correlacionó las concentraciones de partículas PM₁₀ con la cantidad de automóviles en circulación en la ZMVT durante el periodo 2006-2011. Las bases de datos de las concentraciones de PM₁₀ se obtuvieron de la RAMA. La correlación entre las variables ya mencionadas se realizó obteniendo promedios para cada una de las siete estaciones de la RAMA. Los resultados mostraron que en el año 2010 hubo un incremento en las concentraciones de PM₁₀, después de haberse mantenido en disminución los años anteriores del periodo de estudio. Se observó que, en los años 2008 y 2011, el parque vehicular se incrementó, pero las concentraciones de PM₁₀ disminuyeron. En este sentido, las correlaciones

¹ Son aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a la temperatura ambiente normal o que son muy volátiles a dicha temperatura (Gobierno de España, 2017)

² Red Automática de Monitoreo Atmosférico

demonstraron que los automóviles son una de las fuentes emisoras de PM_{10} en la ZMVT, más no la principal.

Mogrovejo-Tenecela (2015), analizó las concentraciones de los contaminantes criterio monitoreados en la RAMA-ZMVT durante el periodo 2000-2013. Se calcularon los promedios diarios, mensuales y anuales; además de verificar el cumplimiento de la NOM. El promedio anual de las PM_{10} reveló que es el contaminante más problemático en la ZMVT. Desde el año 2002 hasta el 2013 se excedió el límite máximo permisible de la NOM vigente en ese entonces, ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual). En la temporada seca-fría se presentaron altas concentraciones por las condiciones atmosféricas que impidieron la dispersión de los contaminantes. Los años 2005 y 2007 resultaron con un mayor índice de contaminación atmosférica.

Sánchez-Muñoz (2015), realizó una investigación sobre el comportamiento espacial de PM_{10} en la Zona Metropolitana de Toluca durante el periodo 2011-2013 correlacionando las concentraciones de PM_{10} con variables meteorológicas como precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento, información que se obtuvo de la RAMA. Los resultados mostraron que la calidad del aire se mantuvo de “mala” a “regular” de acuerdo con los valores del IMECA. También se observó una correlación positiva entre la precipitación y las concentraciones de PM_{10} , a medida que la precipitación aumentó en el periodo de lluvias, el nivel de concentración de PM_{10} disminuyó. Así, los meses de julio y agosto resultaron con niveles menores a la NOM. La mayor concentración de PM_{10} se presentó en la temporada seca (noviembre a marzo). El año con mayores concentraciones de partículas PM_{10} fue 2011. En el año 2012 se mantuvieron las concentraciones más altas en la zona Noroeste.

Epílogo

Derivado de las investigaciones presentadas en este capítulo se puede concluir que la contaminación atmosférica, en general, es una problemática que aqueja a las poblaciones de cualquier parte del mundo, pero frecuentemente en aquellas ciudades que desarrollan actividades industriales y que presentan episodios de intenso tráfico vehicular. En específico, las PM_{10} han sido objeto de estudio por las implicaciones en la salud humana y en el ambiente derivado de su comportamiento en cuanto a los niveles de concentración en un determinado tiempo y espacio, así como los factores que lo determinan.

La mayoría de los estudios analizados coinciden en que las actividades del sector secundario (industria) y el tráfico vehicular son factores causales en el incremento de las concentraciones de PM_{10} en un tiempo y espacio, sin embargo, algunas variables meteorológicas como la precipitación, velocidad y dirección de los vientos también influyen a su vez, en la dispersión de éstas.

En la mayoría de los casos no se cumplen los límites máximos permisibles establecidos en las normas de PM_{10} enfocadas a la protección de la salud, propias de cada caso, estableciendo una relación con el incremento de enfermedades respiratorias por la exposición de la población a determinadas concentraciones de PM_{10} , aunado a la composición química de éstas, ya que de acuerdo con el estudio de Romero-Guzmán (2009), se han encontrado PM_{10} que están compuestas por enlaces¹ como C-S, Ca-S-O, C-S-V-Ti, Si-Al-O, C-O, así como Hierro (Fe), originados por procesos de combustión, materiales de construcción y material de origen biológico. Además de encontrar algunos Compuestos Orgánicos Volátiles (COV). Incrementando el riesgo porque son sustancias nocivas para el organismo humano.

¹ C= Carbono; S= Azufre; Ca= Calcio; O= Oxígeno; V= Vanadio; Ti= Titanio; Al= Aluminio

Capítulo 2

Marco Teórico



Capítulo 2. Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conceptos que rigen la investigación. El capítulo se divide en ocho apartados: el primero comprende el concepto general de contaminación atmosférica, así como sus efectos, tipos de contaminantes y las fuentes de emisión; en el segundo se presentan los organismos a nivel internacional que tratan y regulan temáticas relativas a la contaminación atmosférica. El tercer apartado contiene la legislación y normatividad nacional relativa a la contaminación atmosférica y caso particular, contaminación atmosférica por partículas PM₁₀. Del cuarto al sexto apartado se presentan los mecanismos para la gestión de la calidad del aire en México y en un contexto local, es decir, en la RAMA-ZMVT. El séptimo apartado aborda la temática del material particulado y generalidades, para finalmente concluir en el quinto apartado con las generalidades de los efectos de la contaminación por partículas PM₁₀.

2.1 Contaminación atmosférica

La atmósfera se define como una capa compuesta de gases que envuelve a la Tierra. Esta tiene un espesor de 640 kilómetros (SEMARNAT, 2013).

En la **Tabla 1** se muestran los gases y su volumen en porcentaje.

Tabla 1 Composición de la atmósfera

Componente	Volumen (%)
Nitrógeno N₂	78.08
Oxígeno O₂	20.95
Argón Ar	0.934
Bióxido de Carbono CO₂	0.0314
Neón Ne	0.00182
Helio He	0.000524
Kriptón Kr	0.000114

Elaboración propia con base en (Dickson, 2000; Figueruelo y Dávila, 2004).

Entre los gases con mayor porcentaje destacan el Nitrógeno, el Oxígeno y el Argón. El 99.96 % de su composición es Nitrógeno, Oxígeno y Argón (Dickson, 2000). Estos y los demás gases en concentraciones normales no reaccionan entre sí (Camacho-García y Flamand, 2008).

Según la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, la atmósfera está compuesta por cuatro capas: Tropósfera, Estratósfera, Mesósfera, Ionósfera (SEMARNAT, 2013).

La atmósfera juega un papel vital para la existencia de los seres vivos en la tierra, entre las funciones que cumple están:

- Mantener la capa de Ozono
- Contribuir a la regulación del clima a través del movimiento de las masas de aire sobre océanos y continente.

- Transportar el vapor de agua para que se produzca lluvia.
- Retener el Carbono y el Nitrógeno, elementos esenciales para los seres vivos (SEMARNAT, 2007).

Se refiere a contaminación atmosférica cuando determinadas sustancias se presentan en cantidades excesivas, reduciendo su capacidad de autodepuración y/o alterando su composición química (Romero-Guzmán y otros, 2007; Camacho-García y Flamand, 2008).

Las sustancias presentes en la atmósfera pueden clasificarse como naturales y antropogénicas dependiendo de dónde se originen (SEMARNAT, 2013). Los contaminantes de origen natural surgen de procesos naturales, por ejemplo, las erupciones volcánicas (emisiones en forma de gases, vapores, polvos y aerosoles) (SEMARNAT, 2013), a diferencia de los antropogénicos que derivan de actividades humanas como el parque vehicular, las emisiones de las industrias, actividades agrícolas, etc.

La contaminación atmosférica es una problemática característica de ciudades con un importante nivel de desarrollo urbano, industrial y demográfico (RAMA, 2018). No obstante, sus efectos se observan en diferentes escalas:

- Local: los contaminantes se concentran en la misma zona en donde son emitidos,
- Regional: los contaminantes se dispersan a zonas cercanas; y finalmente,
- Global: los contaminantes alcanzan otras zonas alrededor del mundo (SEMARNAT, 2012; SEMARNAT, 2013).

Cuando las sustancias que deterioran la calidad del aire se acumulan, causan serios problemas a escala global, como el deterioro de la capa de ozono en la estratósfera, el cambio climático y el detrimento en la calidad del aire (SEMARNAT, 2007). Para proponer las medidas que contribuyan en la mitigación de los efectos de la contaminación atmosférica, es una necesidad contar con la información de las características fisicoquímicas de los contaminantes, fuentes de emisión,

concentraciones, patrones de dispersión y deposición. Además de tener el conocimiento de la forma en la que los seres vivos reaccionan al estar expuestos a ciertos niveles de concentración de los contaminantes (Darré-Castell, 2011).

2.1.1 Tipos de contaminantes atmosféricos

Según GEM¹ (2007), un contaminante es aquel que, al interactuar con la atmósfera, el agua o el suelo, éste altera o modifica la composición y condición natural de dichos elementos.

“En el caso del aire es una sustancia que, en alta concentración, puede causar daño al hombre, a los animales, vegetales o a los materiales. Puede incluir casi cualquier compuesto susceptible de ser transportado por el aire en forma de partículas sólidas, gotas líquidas, gases o sus combinaciones” (GEM, 2007, p.149).

2.1.1.1 Tipo de contaminantes según su origen

Como ya se mencionó en el apartado anterior, los contaminantes del aire incluyen elementos de origen natural y antropogénico. Pueden estar presentes en forma gaseosa (Ozono (O₃), los Óxidos de Azufre y de Nitrógeno, Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂) y los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)), aerosoles o Material Particulado (PM). Más adelante se explica la definición de este último por ser el contaminante de análisis en la presente investigación.

A continuación, en la **Tabla 2** se presenta una clasificación de los contaminantes de acuerdo con su origen antropogénico o natural según Figueruelo y Dávila (2004).

¹ Gobierno del Estado de México

Tabla 2 Clasificación de los contaminantes según su origen

NATURAL	
Primario	Secundario
Sal marina	Sulfato de gases biogénicos
Polvo mineral	Sulfato de SO ₂ volcánico
Aerosoles orgánicos primarios/residuos biológicos	Nitrato de NO _x
Cenizas volcánicas	Orgánico de COV biogénico
ANTROPOGÉNICO	
Primario	Secundario
Polvo industrial	Sulfato de SO ₂
Quema biomasa	Nitrato de NO _x
Hollín (todas las fuentes)	Amonio de NH ₃
	Orgánicos de COV

Elaboración propia con base en Figueruelo & Dávila, 2004.

2.1.1.2 Contaminantes primarios

Otra definición sugiere la clasificación de los contaminantes en dos grupos: primarios y secundarios (SEMARNAT, 2013).

- A. Contaminantes primarios.** Su principal característica es que se emiten directamente de una fuente. Por ejemplo, chimeneas, automóviles, entre otros (SEMARNAT, 2013).

En la **Tabla 3** se presentan los contaminantes que integran al grupo A, incluyendo fuentes de emisión y sus efectos en el ambiente.

Tabla 3 Contaminantes primarios

Contaminante	Fuente	Generalidades
Óxidos de Azufre (SO_x)	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión del Azufre presente en el carbón y el petróleo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Forman aerosoles e incrementan la corrosividad de la atmósfera • Genera lluvia ácida.
Monóxido de Carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión incompleta de compuestos de Carbono. (70% se emite de los vehículos) 	<ul style="list-style-type: none"> • Al oxidarse genera Dióxido de Carbono (CO₂).
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión de combustibles fósiles de vehículos • Combustión de carbón • Quemadas de madera. • Producción de fertilizantes, explosivos, tabaco y calderas. 	<ul style="list-style-type: none"> • El Monóxido de Nitrógeno (NO) se oxida formando Dióxido de Nitrógeno (NO₂), éste último precursor del smog fotoquímico.
Partículas PM₁₀ y PM_{2.5}	<ul style="list-style-type: none"> • Actividades agrícolas. • Resuspensión del material de las vialidades. 	<ul style="list-style-type: none"> • Material respirable en forma sólida o líquida (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras).
Hidrocarburos (HC)	<ul style="list-style-type: none"> • Mala combustión de derivados del petróleo. • Transporte carretero. • Disolventes y pinturas. • Producción de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los de mayor interés son los compuestos orgánicos volátiles (COV), dioxinas, furanos, bifenilos policlorados e hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH).

Elaboración propia con base en SEMARNAT, 2013.

2.1.1.3 Contaminantes secundarios

B. Contaminantes secundarios. Su principal característica es que se forman por las interacciones de contaminantes primarios con otros componentes de la atmósfera (SEMARNAT, 2013).

En la **Tabla 4** se presentan los contaminantes del grupo B, fuentes de emisión y sus efectos sobre el ambiente.

Tabla 4 Contaminantes secundarios

Contaminante	Fuente	Generalidades
Ozono (O₃)	<ul style="list-style-type: none"> • Forma parte de la composición de la atmósfera, sin embargo, a baja altura se convierte en O₃ troposférico. 	<ul style="list-style-type: none"> • El O₃ es perjudicial por su carácter oxidante, reactivo, corrosivo y tóxico. • Genera compuestos secundarios.
Lluvia ácida	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de ácidos a partir de contaminantes en la atmósfera y luego precipitan a la tierra. 	<ul style="list-style-type: none"> • La lluvia ácida presenta un pH < a 5, en comparación con el pH de la lluvia normal (aprox. de 6).
Dióxido de Azufre (SO₂) y Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	<ul style="list-style-type: none"> • Parque vehicular • Procesos industriales 	<ul style="list-style-type: none"> • En presencia de agua y otros compuestos forman Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) y Ácido Nítrico (HNO₃) que precipitan a la tierra en deposiciones húmedas y secas. • Provocan lluvia ácida.
Contaminación fotoquímica (smog fotoquímico)	<ul style="list-style-type: none"> • Mezcla de contaminantes que se forman por reacciones producidas por la luz solar al incidir sobre los contaminantes primarios 	<ul style="list-style-type: none"> • La constituyen la luz solar y sustancias susceptibles de ser oxidadas.

Elaboración propia con base en SEMARNAT, 2013.

2.1.1.4 Contaminantes criterio

Según GEM¹ (2007), el concepto de “*contaminante criterio*” es reconocido en México y a nivel internacional. Se les denomina así a aquellos contaminantes que, por sus características, resultan más perjudiciales para la salud humana y el ambiente (SEMARNAT, 2013) además de ser las principales sustancias responsables de las emisiones en áreas tanto urbanas como rurales (GEM, 2012).

Los contaminantes criterio son “*ciertos contaminantes conocidos como dañinos para la salud humana presentes en el aire y que constituyen los principales parámetros de la calidad del aire*” (GEM, 2007, p.149).

Los contaminantes que forman parte de esta agrupación son las partículas menores a 10 micras (PM_{10}) y partículas menores a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), Ozono (O_3), Bióxido de Azufre (SO_2), Monóxido de Carbono (CO) y Bióxido de Nitrógeno (NO_2) (GEM, 2012). Dichos contaminantes sirven de guía para determinar la calidad del aire en una zona determinada. De ahí que se han formulado normas por la Secretaría de Salud de México (Mogrovejo-Tenecela, 2015) que establecen valores límite de sus concentraciones y evitar daños en la salud humana por la exposición a altas concentraciones y, desde luego, al ambiente (GEM, 2012).

Figura 2 Contaminantes criterio



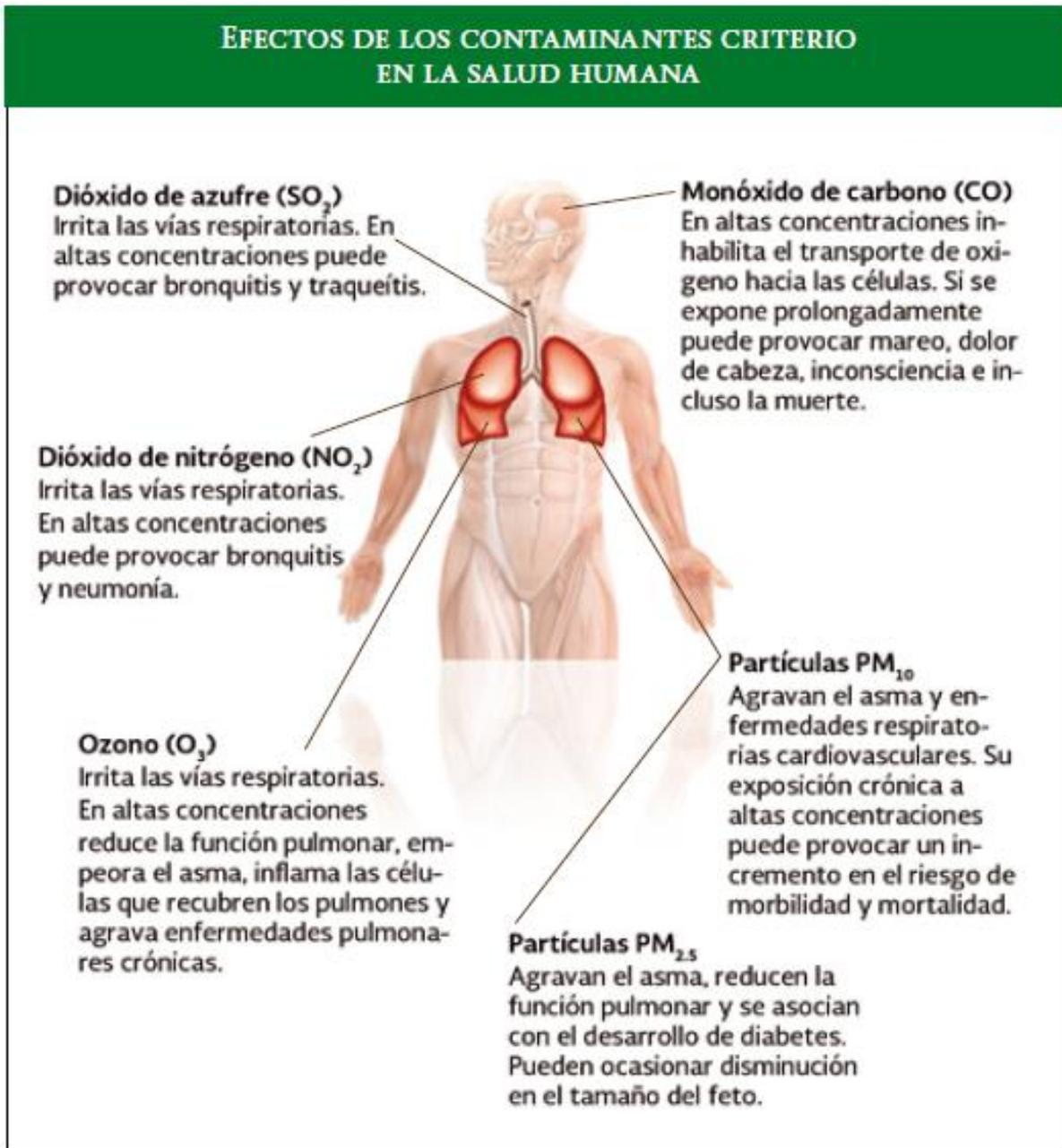
Fuente: Elaboración propia con base en GEM, 2012.

¹ Gobierno del Estado de México

Los contaminantes criterio son medidos y monitoreados por la RAMA-ZMVT y posteriormente informar a la población sobre las concentraciones a las que está expuesta. Los datos reportados por la RAMA-ZMVT sobre las concentraciones de los contaminantes criterio son transmitidos de manera menos técnica a través del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), con la finalidad de vigilar que las concentraciones de los contaminantes criterio no rebasen los valores permitidos por las Normas Oficiales Mexicanas y representen un riesgo para la salud de la población, y en caso contrario, se tomen las medidas que este mismo índice recomienda.

En la **Figura 3** se describen los efectos sobre la salud humana de cada uno de los cinco contaminantes criterio.

Figura 3 Efectos de los contaminantes criterio en la salud humana



Fuente: SEMARNAT, 2013.

2.1.2 Principales fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera

Para determinar los impactos ambientales y socioeconómicos de la contaminación atmosférica, es necesario conocer los niveles de concentración de los contaminantes en el aire y los diferentes tipos de fuentes de las cuales son emitidos (SEMARNAT, 2007). En este sentido a continuación se presenta la clasificación de los tipos de fuentes de emisión de los contaminantes.

2.1.2.2 Fuentes naturales y antropogénicas

La existencia de contaminantes naturales y antropogénicos deriva del tipo de fuente de la cual se emiten. En la **Tabla 5** se describe las fuentes que se consideran naturales y las antropogénicas.

Tabla 5 Clasificación de las fuentes de emisión

Tipo de fuentes	
Naturales	Antropogénicas
<ul style="list-style-type: none">• Erupciones volcánicas	<ul style="list-style-type: none">• Uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad, el transporte, la industria y los hogares
<ul style="list-style-type: none">• Polvo de la superficie resuspendido por el viento	<ul style="list-style-type: none">• Procesos industriales y uso de disolventes en las industrias químicas y minerales
<ul style="list-style-type: none">• Aerosol de sal marina	<ul style="list-style-type: none">• Actividades agrícolas
<ul style="list-style-type: none">• Emisiones de COV's a causa del metabolismo de las plantas y de los procesos de desnitrificación	<ul style="list-style-type: none">• Tratamiento de residuos

Elaboración propia con base en (EEA, 2017; Martin, 2005; GEM, 2012).

Según Martin (2005), la mayoría de las fuentes mencionadas anteriormente son responsables de la emisión de Material Particulado (PM), proceso que se comentará en los apartados posteriores (Martin, 2005).

2.1.2.3 Otras clasificaciones de las fuentes de emisión

Existe otra clasificación para las fuentes de emisión basada en el tipo de establecimiento y actividad (GEM, 2012).

2.1.2.3.1 Fuentes fijas

- Establecimientos industriales con emisiones contaminantes a través de chimeneas. También pueden ser emisiones “fugitivas”, pero estas se estiman de forma individual (GEM, 2012).

2.1.2.3.2 Fuentes de área

- Establecimientos comerciales y de servicios.
- Actividades de casas habitación, talleres mecánicos, tintorerías, panaderías, lavanderías, imprentas y combustión doméstica, entre otros. Pese a que las emisiones son bajas, generan importantes emisiones por su número e intensidad.
- Evaporativas de compuestos orgánicos por el consumo doméstico, aplicación de pintura arquitectónica, en señalización vial y por pavimentación, así como emisiones asociadas a incendios forestales y quemas agrícolas intencionales.
- Ganadería, aporta emisiones de amoníaco (NH_3)
- Actividades con generación de partículas como construcciones y circulación por caminos no pavimentados (GEM, 2012).

2.1.2.3.3 Fuentes móviles

- Vehículos automotores que circulan por calles y carreteras (automóviles, camionetas, camiones ligeros, medios y pesados, de servicio privado y público, de carga y de pasajeros) y que utilizan diésel o gasolina como combustible (GEM, 2012).
- Aviación comercial, locomotoras de arrastre y de patio (GEM, 2012). Son las que contribuyen en mayor proporción a la contaminación del aire en las grandes ciudades (Camacho-García & Flamand, 2008).

2.1.3 Efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana y el ambiente

El deterioro de la calidad del aire es un hecho innegable a nivel mundial, principalmente en ciudades desarrolladas y que genera efectos adversos en la salud humana y el ambiente (SEMARNAT, 2013). Sus efectos están sujetos a los tipos de contaminantes, interacciones entre ellos, sus concentraciones y permanencia en el ambiente (Darré-Castell, 2011). Las afectaciones recaen no solo en la salud humana, sino también en la de los animales, además del deterioro de otros recursos naturales como el suelo y el agua (Rubiano-Olaya & Chaparro De Valencia, 2006).

Un caso extremo de contaminación del aire, entre muchos otros documentados, fue el de la niebla tóxica londinense en 1952. Este acontecimiento cobró 4 mil víctimas mortales, y daños severos en los bosques europeos por la lluvia ácida durante la década de los 50 y 60's (SEMARNAT, 2013).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en el mundo suman 1,3 millones las personas que mueren en un año a causa de la contaminación atmosférica urbana (OMS, 2018).

La contaminación atmosférica es uno de los riesgos ambientales más importantes por sus efectos sobre la salud (OMS, 2018). La OMS estimó que una de cada nueve

muerter en todo el mundo está relacionada con la contaminación atmosférica (OPS¹, 2017).

Las personas que viven en ciudades con altos niveles de contaminación presentan, en mayor medida, enfermedades cardiacas, respiratorias y cáncer de pulmón a diferencia de quienes viven en ciudades con una buena calidad del aire (OMS, 2018). Datos documentados por la OMS (2018), reportan más de 2 millones de muertes prematuras cada año como consecuencia de la contaminación atmosférica.

Los grupos más afectados frecuentemente son los niños menores de cinco años y los adultos de entre 50 y 75 años. Así como aquellas personas que ya han tenido padecimientos (OPS, 2017).

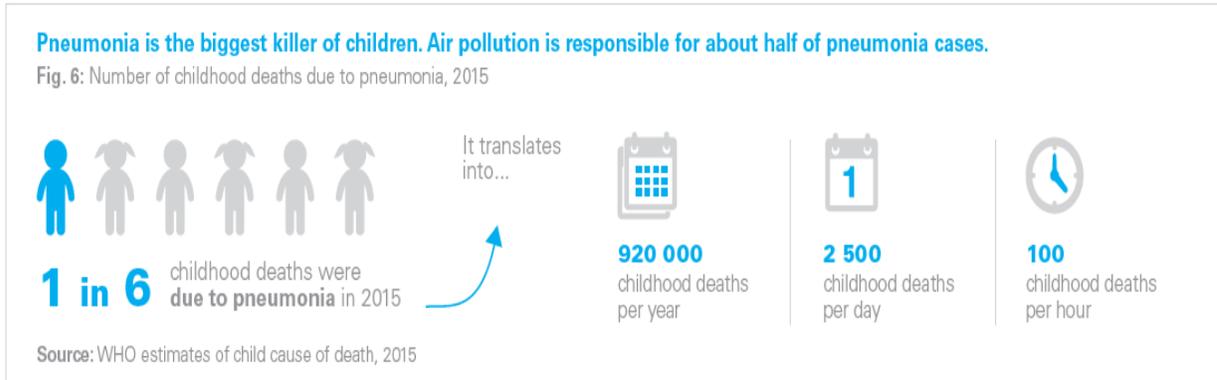
Los efectos de la contaminación atmosférica dependen del tiempo al que las personas se encuentren expuestas (OPS, 2017). En este sentido la exposición a corto y largo plazo a la contaminación atmosférica aumenta el riesgo de sufrir enfermedades respiratorias agudas (neumonía), y crónicas (cáncer de pulmón), además de padecer enfermedades cardiovasculares (WHO², 2018). Entre las enfermedades que llega a padecer la población por contaminación atmosférica son: cáncer de pulmón, enfermedad obstructiva crónica (EPOC), accidentes cerebrovasculares, cardiopatías isquémicas e infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores esta última sobre todo en niños (OPS, 2017).

Según UNICEF (2018), la contaminación atmosférica está dentro de los principales peligros para la salud de los niños y está relacionada con enfermedades respiratorias como la neumonía (UNICEF, 2018).

¹ Organización Panamericana de la Salud

² World Health Organization

Figura 4 Muertes por Neumonía en niños causada por la contaminación atmosférica



Fuente: UNICEF, 2016.

UNICEF (2016), menciona que la neumonía fue responsable de 1 de cada 6 muertes en niños en el año 2015, sin embargo, esta cifra se ha incrementado en los últimos tres años, provocando actualmente 1 de cada 10 muertes en niños menores de cinco años (UNICEF, 2018).

Como ya se mencionó, dentro de los grupos más vulnerables a la contaminación atmosférica se encuentran los niños.

"Los niños son más susceptibles que los adultos a la contaminación atmosférica (...), ya que sus pulmones, sus cerebros y sus sistemas inmunitarios están aún en desarrollo y sus vías respiratorias son más permeables. Los niños también respiran más rápido que los adultos, e inhalan más aire en relación con su peso corporal (...)" (UNICEF, 2018, p.1).

Sin embargo, a pesar de que la calidad del aire es una necesidad básica de salud y bienestar humanos, la contaminación atmosférica continúa representando una amenaza para la salud a nivel mundial (OMS, 2018).

Por último, los daños en el ambiente por la contaminación del aire se ven reflejados en los ecosistemas naturales, en los monumentos históricos y edificios (SEMARNAT, 2013).

Contaminantes como la lluvia ácida, obstruye y acidifica los poros de las hojas imposibilitando que las plantas realicen el proceso de fotosíntesis, al mismo tiempo que degrada los suelos afectando las raíces y nutrición de las plantas. Cuando la lluvia ácida afecta a los lagos, ríos y otros cuerpos de agua, suelen disminuir los peces. Por otro lado, los daños en los monumentos histórico y edificios se presentan por la corrosión de los metales y daños de la pintura y la piedra que provocan las partículas ácidas (SEMARNAT, 2013).

2.2 Monitoreo Atmosférico a través de la RAMA-ZMVT

El monitoreo atmosférico es una herramienta que brinda información sobre la calidad del aire y forma parte del sustento técnico para la elaboración de planes y programas para la gestión de la calidad del aire. Los datos que se generan de las redes de monitoreo permiten la protección de la salud de la población y el medio ambiente de los efectos adversos de la contaminación atmosférica (GEM, 2012).

2.2.1 Antecedentes de la RAMA-ZMVT

Los inicios del monitoreo atmosférico se remontan en la ciudad de Toluca en el año de 1975, esto mediante una red manual para PST. Más adelante, en 1987 con ayuda de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), se incorporan las mediciones de Óxidos de Nitrógeno (NOx) y Bióxido de Azufre (SO₂) en 3 de las 5 estaciones que se tenían establecidas (RAMA, 2018). Por otro lado, en 1986 pero en la Ciudad de México se estableció una red manual para el monitoreo de la calidad del aire (Vega, et al., 2004).

En 1992, el Gobierno del Estado de México (GEM) lleva a cabo la adquisición e instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT), misma que inició operaciones en 1993 y desde entonces es administrada por la Secretaría de Medio Ambiente del gobierno del estado (RAMA, 2018), con el objeto de medir permanentemente los principales contaminantes atmosféricos o contaminantes criterio (Ozono, Bióxido de Azufre,

Bióxido de Nitrógeno, Monóxido de Carbono y Material Particulado PM_{2.5} y PM₁₀), además de medir, en la mayoría de las estaciones, parámetros meteorológicos (velocidad y dirección del viento, humedad relativa, precipitación pluvial, presión atmosférica, temperatura y radiación solar); evaluar las tendencias de la calidad del aire y mantener informada a la población sobre los niveles de contaminación (GEM, 2012).

Los datos derivados del monitoreo son almacenados en bases de datos, las cuales aportan información para verificar el cumplimiento de las NOM's respecto a Material Particulado (PM) y demás contaminantes criterio (Vega, et al., 2004). De ahí que dichos datos tienen que validarse por medio de planes y programas de control de calidad, así como de procesos estadísticos para evaluar espacial y temporalmente la calidad del aire en una zona determinada (GEM, 2007).

A principios del año 2010, la RAMA-ZMVT fue renovada en su totalidad, se reubicó la estación Toluca-Centro y se instaló una nueva estación: Ceboruco (RAMA, 2018).

La RAMA-ZMVT surge como un programa de vigilancia atmosférica con base en los siguientes objetivos:

- Evaluar la calidad del aire
- Crear medidas para controlar la contaminación
- Observar la tendencia de los contaminantes a lo largo del tiempo.
- Evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire
- Conocer el impacto que ejercen ciertos contaminantes sobre la población.
- Desarrollar estrategias de control para prevenir y/o mitigar problemas por contaminación (RAMA, 2018).

2.2.2 Consideraciones para el diseño de la RAMA-ZMVT

Se consideran una serie de aspectos necesarios para que una red de monitoreo proporcione datos confiables y representativos, en la **Tabla 6** se describen los más representativos.

Tabla 6 Aspectos para el diseño de la RAMA-ZMVT

Aspecto	
Zona de estudio	<ul style="list-style-type: none"> • Considerar topografía y variables climáticas del sitio
Clima	<ul style="list-style-type: none"> • Presión, temperatura, precipitación pluvial, velocidad y dirección del viento
Sitio de muestreo	<p>De acuerdo con la EPA, deben de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ser representativos del área donde se ubican • Tener un tiempo largo de vida útil • Mantenerse accesibles • Resistencia a condiciones extremas
Inventario de emisiones	<ul style="list-style-type: none"> • Enumera todas las fuentes de emisión que existen en la zona de estudio • Define el tipo de contaminante, número y tamaño de cada una de las fuentes
Manejo y reporte de datos	<ul style="list-style-type: none"> • Los datos deben ser validados y contar con un número mínimo
Métodos de análisis para los contaminantes	<ul style="list-style-type: none"> • Normas Oficiales Mexicanas
Número mínimo de estaciones.	<ul style="list-style-type: none"> • De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud va de 2 a 10, dependiendo del tamaño de la población • La RAMA-ZMVT cuenta con 7 estaciones

Elaboración propia con base en RAMA, 2018.

2.2.3 Integración de la RAMA-ZMVT

La RAMA-ZMVT está integrada por un centro de Control y siete estaciones remotas de monitoreo fijas, Así mismo, está integrada por tres subsistemas operativos (RAMA, 2018):

- a) Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMAT).
- b) Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA).
- c) Red Meteorológica (RETMET).

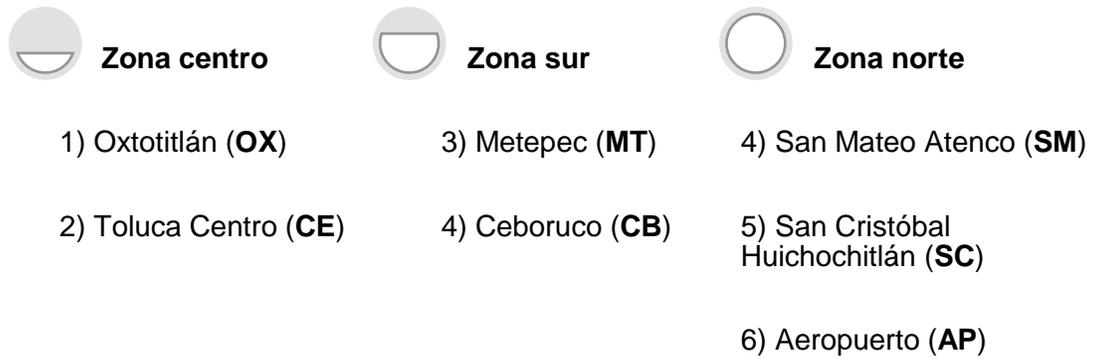
También cuenta con una Unidad Móvil (UM) de monitoreo que opera las 24 horas, generando datos de forma permanente y en tiempo real durante todo el año (RAMA, 2018).

2.2.4 Estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT

Las estaciones de Monitoreo Atmosférico son dispositivos que contienen equipos automáticos que se encargan de analizar las concentraciones de los contaminantes criterio. Tienen una torre meteorológica con sensores, cuentan con energía eléctrica regulada, almacena los datos en plataforma PC y mantienen comunicación con el Centro de Control (RAMA, 2018).

En la **Figura 5** se presentan las siete estaciones de monitoreo con las que cuenta la RAMA-ZMVT, mismas que a su vez, están distribuidas en tres zonas.

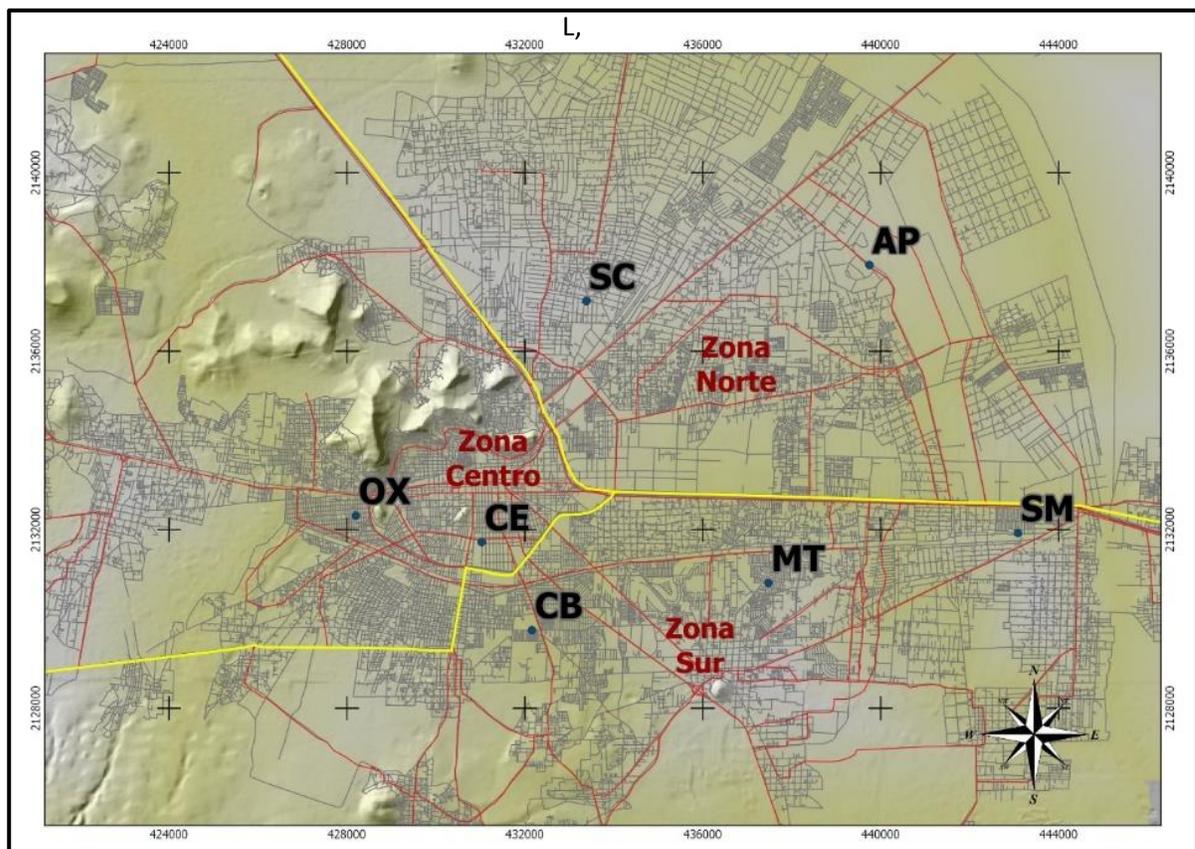
Figura 5 Estaciones de la RAMA-ZMVT



Elaboración propia con base en RAMA, 2018.

En la **Figura 6** se observa la distribución de las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT.

Figura 6 Distribución de las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT



Fuente: RAMA, 2018.

En la **Tabla 7** se describen los datos generales de cada una de las siete estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT.

Tabla 7 Aspectos generales de las estaciones de la RAMA ZMVT

Zona	No.	Nombre y clave	Coordenadas	Ubicación
C E N T R O	1	Oxtotitlán OX	Latitud Norte: 19° 17' 0.40" Longitud Oeste: 99° 41' 0.56"	Escuela Primaria "Carmen Serdán", calle Lago Caimanero esq. Laguna de la Asunción, Col. Nueva Oxtotitlán, Toluca, Méx.
	2	Toluca Centro CE	Latitud Norte: 19° 16' 41.1" Longitud Oeste: 99° 39' 23.1"	Gimnasio "Prof. Guillermo Ortega Vargas" de la UAEM, Calle Venustiano Carranza esq. Mariano Matamoros, Toluca, Méx.
S U R	3	Metepéc MT	Latitud Norte: 19° 16' 12.7" Longitud Oeste: 99° 35' 42.7"	Calle Manzana # 20-A, Colonia Izcalli Cuauhtémoc V, Metepéc, México (en el Parque Ecológico).
	4	Ceboruco CB	Latitud Norte: 19° 15' 37.1" Longitud Oeste: 99° 38' 44.6"	Preparatoria # 5 Ángel María Garibay Kintana de la UAEM). Calle Ceboruco S/N, Colonia Azteca
	5	San Mateo Atenco SM	Latitud Norte: 19° 16' 49.5" Longitud Oeste: 99° 32' 30.0"	Tanque Elevado de OPDAPAS. Av. Hacienda Tres Marías # 260 Colonia Santa Elena, San Mateo Atenco.

N O R T E	6	Aeropuerto AP (Actualmente no disponible)	Latitud Norte: 19° 20' 4.41" Longitud Oeste: 99° 34' 26.3"	CENCAD de la Cruz Roja. Calle Enedino Arévalo Alanis S/N, Parque Industrial Exportec II, San Pedro Totoltepec
	7	San Cristóbal Huichochitlán SC	Latitud Norte: 19° 19' 38.0" Longitud Oeste: 99° 38' 3.44"	Escuela Primaria Manuel Hinojosa Giles. Paseo de la Luz esquina Manuel Hinojosa Giles S/N, San Cristóbal Huichochitlán.

Elaboración propia con base en RAMA, 2018.

2.2.5 Contaminantes que miden las estaciones de la RAMA-ZMVT

Las estaciones de monitoreo fijas cuentan con analizadores automáticos para el monitoreo de los 6 contaminantes criterio (O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO₂, SO₂) (RAMA, 2018).

También cuentan con una torre meteorológica que mide variables como la temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, precipitación, radiación solar, humedad relativa y la presión atmosférica (RAMA, 2018).

Las estaciones cuentan con energía eléctrica regulada y un sistema de adquisición de datos basado en una plataforma PC y una topología de red LAN interna con un sistema de comunicación con el Centro de Control vía TCP/IP (RAMA, 2018).

Respecto a la unidad móvil (UM), ésta es un camper equipado que cumple el mismo fin que el de las estaciones fijas (RAMA, 2018).

Como se observa en la **Tabla 8**, las siete estaciones miden los contaminantes criterio, mientras que las variables meteorológicas son medidas sólo en algunas estaciones, aunado a los errores que pudieren presentarse en las mediciones de los contaminantes criterio, podría representar una deficiencia en los datos proporcionados por la RAMA-ZMVT.

Tabla 8 Contaminantes que miden las estaciones de la RAMA-ZMVT

Contaminante	Estaciones de monitoreo							
	OX	CE	MT	CB	SM	AP	SC	UM
Partículas menores a 2.5 micras (PM _{2.5})	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Partículas menores a 10 micras (PM ₁₀)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ozono (O ₃)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bióxido de Azufre (SO ₂)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Monóxido de Carbono (CO)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Meteorología								
Velocidad de viento	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dirección de viento	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Humedad relativa	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Temperatura	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Presión atmosférica		✓	✓			✓		✓
Precipitación pluvial	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Radiación solar total		✓	✓			✓		✓

Elaboración propia con base en RAMA, 2018.

2.3 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire como mecanismo de monitoreo

En México se empleó el Índice Metropolitano de Calidad del Aire para determinar si la calidad del aire es satisfactoria o no con base en los niveles de contaminación atmosférica (RAMA, 2018). Es una herramienta desarrollada para informar a la población sobre los niveles de contaminación de una forma sencilla (SEMARNAT, 2018).

Tabla 9 Escala IMECA

Intervalos	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300
Calidad del aire	Buena	Regular	Mala	Muy Mala	Extremadamente Mala

Fuente: RAMA, 2018.

El cálculo del IMECA integra y convierte los datos de las concentraciones de los contaminantes criterio, en un formato o valores diferentes (SEMARNAT, 2018). El valor que indica la calidad del aire como satisfactoria o no para los contaminantes criterio se representa en un valor de 100 puntos, mismo que corresponde a las normas de calidad del aire de cada contaminante. En ese sentido, se estableció la siguiente escala (RAMA, 2018).

2.4 Programa de Gestión para mejorar la calidad del aire (ProAire)

Los Programas de Gestión para mejorar la calidad del Aire son instrumentos que establecen medidas y acciones a corto, mediano y largo plazo, para prevenir y mitigar las tendencias del deterioro de la calidad del aire en una región determinada (SEMARNAT, 2018).

Los ProAire responden a la necesidad de los estados de contar con un instrumento de carácter preventivo y/o correctivo en materia de calidad del aire y protección a la salud, así como para dar cumplimiento al marco jurídico aplicable en esta materia (SEMARNAT, 2018).

Para la zona de estudio los ProAire aplicables han sido los siguientes:

Tabla 10 Programas para mejorar la calidad del aire (ProAire)

<i>Entidad</i>	ProAire
<i>México</i>	Valle de Toluca 1997-2000
	Zona Metropolitana del Valle de Toluca 2007-2011
	Zona Metropolitana del Valle de Toluca 2012-2017 (vigente)

Elaboración propia con base en (SEMARNAT, 2014; SEMARNAT, 2018).

2.5 Material Particulado (PM) como problema de contaminación del aire

El material particulado (PM) se encuentra dentro de los tres contaminantes que mayor afectación ejercen en la salud humana, seguido del Dióxido de Nitrógeno y el Ozono (EEA, 2017).

El PM genera efectos adversos en el medio ambiente y en la salud (SEMARNAT, 2011). Dentro del segundo rubro, pueden presentarse desde enfermedades respiratorias hasta la muerte prematura (EEA, 2017).

Las partículas suspendidas tienen características únicas entre los contaminantes atmosféricos (SEMARNAT, 2011). Su complejidad radica en las características que posee, por ejemplo, el tamaño, la composición química, las interacciones con otros contaminantes en la atmósfera (Rojas, 2007) y permanencia en la atmósfera. (SEMARNAT, 2011).

La importancia de su estudio se sustenta en que permite estimar el aporte de las fuentes de emisión a la contaminación del aire y, desde luego, dimensionar las implicaciones en el tema de la salud (Pachón & Sarmiento-Vela, 2008).

2.5.1 Definición

De inicio, se considera importante señalar que las partículas se encuentran de forma natural en la atmósfera (SMA, 2018), sin embargo, actividades antropogénicas como la combustión del transporte que funciona con diésel, procesos industriales, agricultura y combustión de carbón (Unal, et al., 2011) ocasionan que las partículas estén formadas por elementos como polvo, cenizas, hidrocarburos, sulfatos, trazas de metales pesados (Velasco-García, 2005) derivados de las actividades antropogénicas (Aldunate, et al., 2006).

El PM es conocido de varias maneras. Según SEMARNAT¹ (2011), “(...) las partículas, también conocidas como partículas suspendidas, aeropartículas, material particulado —del inglés particulate matter— y aerosoles, que son algunos de los términos utilizados para nombrar una mezcla de compuestos microscópicos o muy pequeños en forma de líquidos y sólidos suspendidos en el aire (por ejemplo, hollín, polvo, humo y neblinas)” (SEMARNAT, 2011, en línea).

Martin (2005), define al Material Particulado (PM) como una mezcla heterogénea de partículas caracterizadas por sus propiedades físicas y químicas adquiridas según las fuentes de emisión, mecanismos de formación, tamaño, forma y composición química. Las características físicas, definen el transporte y depósito de las partículas en el sistema respiratorio; mientras que su composición química determina los efectos sobre la salud. El PM puede clasificarse por su diámetro aerodinámico, es decir, el tamaño de partícula, mismo que define su transporte y dispersión en la atmósfera, así como determinar las fuentes de emisión (Martin, 2005).

Otra definición se refiere a las partículas suspendidas como cualquier material sólido o líquido que permanece en suspensión en el aire. Pueden ser muy pequeñas y alcanzar fracciones de milímetro e incluso nanómetros (SIMAT, 2018).

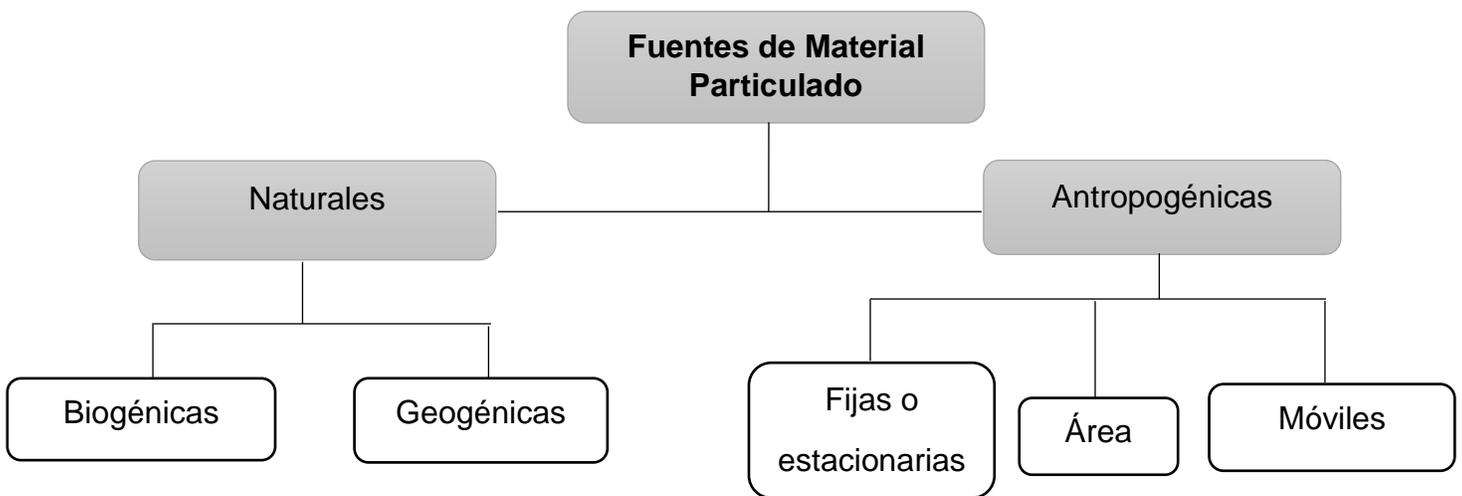
El PM se compone de gotas de sólidos y líquidos que se encuentran en el aire y pueden ser emitidas directamente de la fuente o formarse por las reacciones del PM con otros contaminantes presentes en la atmósfera (EPA, 2017; Auffhammer, et al., 2009).

¹ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

2.5.2 Fuentes de emisión del Material Particulado

En la **Figura 7** se presentan en un esquema las fuentes de emisión del Material Particulado (PM).

Figura 7 Fuentes de emisión del Material Particulado (PM)



Elaboración propia con base en SEMARNAT, 2011.

A continuación, se mencionan las fuentes de Material Particulado (PM):

1) Naturales: no interviene el hombre.

a) **Biogénicas:** polen, virus y bacterias (INE, 2009).

b) **Geogénicas:** partículas de origen geológico (volcanes y las que tienen que ver con el suelo).

2) Antrópicas: ocasionadas por las actividades del hombre.

a) **Fijas o estacionarias:** instalación establecida en un solo lugar.

- Procesos industriales, comerciales, servicios, actividades que generen combustión, procesos de molienda, trituración o abrasión de materiales y evaporación de materia volátil).

- b) **Área:** son numerosas fuentes y dispersas, pero en conjunto generan emisiones considerables
- Gasolineras, actividades de construcción, quemas agrícolas y la resuspensión de polvos de caminos.
- c) **Móviles:** todas las fuentes motorizadas (motocicletas, vehículos de pasajeros, camiones y autobuses, etc.)
- Emisiones por la combustión y evaporación de combustibles, así como el desgaste de los frenos y de las llantas (SEMARNAT, 2011).

2.5.3 Tipos de partículas

Las partículas se pueden clasificar de varias maneras de acuerdo con diferentes criterios. Entre ellos por su origen y por su tamaño.

2.5.3.1 Por su origen

El PM proviene generalmente de la quema de combustibles fósiles, sin embargo, su composición puede tener otros elementos según la fuente que lo origina (OPS, 2017). Cuando las partículas son emitidas directamente de la fuente, se conocen como PM primario; y cuando se forman por las reacciones del PM con otros contaminantes en la atmósfera se conoce como PM secundario (EPA, 2017; Auffhammer, et al., 2009).

2.5.3.1.2 Partículas primarias

Las partículas primarias son aquellas que se emiten directamente a la atmósfera por fuentes antropogénicas como los escapes de los automóviles y camiones (humo), el polvo de las calles (SEMARNAT, 2011), fábricas, derrumbes, de algunos materiales y residuos de la fundición de metales, así como de fuentes naturales como el polen de las plantas, incendios (SIMAT, 2018).

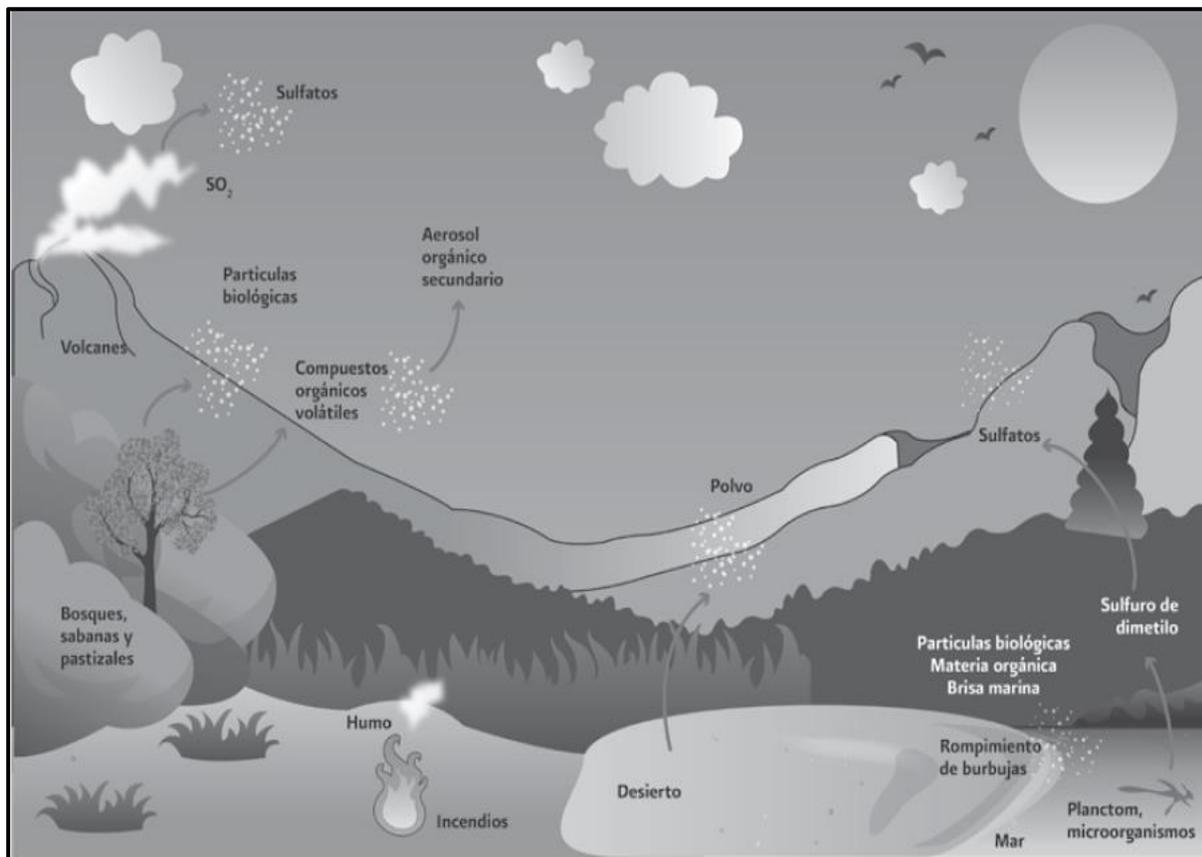
2.5.3.1.3 Partículas secundarias

Las partículas secundarias se forman por reacciones químicas en el aire (SIMAT, 2018). Se forman a partir de los gases conocidos como precursores (SEMARNAT, 2011).

Entre los principales gases precursores de las partículas se encuentran el Dióxido de Azufre (SO_2), los Óxidos de Nitrógeno (NO_x), los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y el Amoniaco (NH_3), los cuales forman sulfatos y nitratos, así como partículas suspendidas secundarias orgánicas derivadas por los procesos de oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos (SEMARNAT, 2011).

En la **Figura 8** se observan los factores necesarios para el proceso de formación de las partículas secundarias.

Figura 8 Proceso de formación de las partículas secundarias



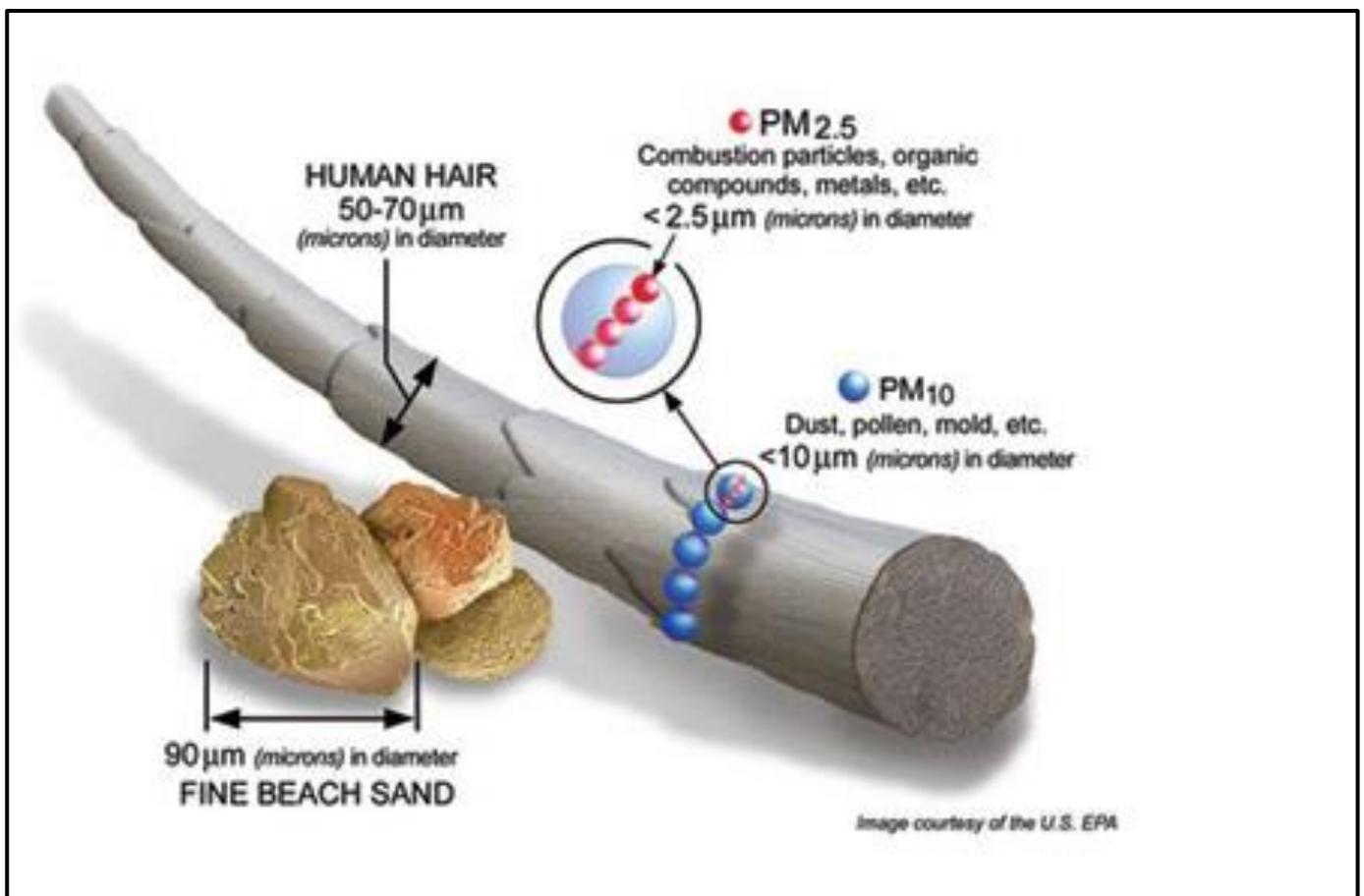
Fuente: SEMARNAT, 2011.

2.5.3.2 Por su tamaño

Las partículas pueden tener diversas formas y tamaños (SIMAT, 2018). Debido a la complejidad respecto a su forma, se utiliza el diámetro aerodinámico como criterio para definir el tamaño de la partícula (SEMARNAT, 2011).

En la **Figura 9** se observa el rango de tamaños propuesto por la EPA (2017).

Figura 9 Tamaño del PM según diámetro aerodinámico



Fuente: EPA, 2017.

Por su tamaño las partículas se clasifican en aquellas con diámetro aerodinámico menor a 10 micras (**PM₁₀**) y aquellas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras (**PM_{2.5}**) (INE, 2009).

- **PM₁₀**: son partículas inhalables. Son lo suficientemente pequeñas como para penetrar en la región torácica del tracto respiratorio (INE, 2009).

Las PM₁₀ se conocen como partículas gruesas originadas principalmente de procesos de desintegración de partículas más grandes, como la remoción de tierra durante actividades de labranza o minería o el paso de vehículos por caminos sin pavimentar. También pueden contener material biológico, como polen, virus o bacterias, o provenir de la evaporación del agua de mar en regiones costeras (INE, 2009).

- **PM_{2.5}**: son partículas más pequeñas y tienen más probabilidad de depositarse en los conductos más finos del tracto respiratorio y en los alvéolos.

Las PM_{2.5} se consideran como la “fracción fina” de las PM₁₀; están formadas por gases y por material proveniente de la combustión. Generalmente son partículas secundarias, es decir, se originaron en procesos de nucleación-condensación de sustancias provenientes de reacciones químicas en la atmósfera, las cuales forman pequeñas partículas a las que se adhieren otras, en un proceso denominado “coagulación” (WHO, 2006) citado en (INE, 2009).

Las PM_{2.5} y PM₁₀ pueden ser primarias; sin embargo, de manera general se considera que las partículas finas son secundarias (SEMARNAT, 2011).

Clasificar a las partículas por su diámetro aerodinámico permite determinar el transporte, los procesos de remoción y deposición, así como la trayectoria de las partículas dentro del sistema respiratorio (SEMARNAT, 2011).

Las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} se consideran como uno de los contaminantes del aire más peligrosos a corto y largo plazo (Unal, et al., 2011). En el caso de las PM₁₀, pueden permanecer suspendidas en el aire por horas e incluso días (Rojas, 2007). El riesgo para la salud y el ambiente aumenta a medida que el tamaño del PM se

reduce, incrementando su tiempo de permanencia en el aire junto con la facilidad de penetrar al sistema respiratorio (SIMAT, 2018).

2.5.4 Efectos en la salud por la presencia de material particulado (PM) en el aire

En todo el mundo existe evidencia acerca de los efectos negativos de las PM₁₀ en la salud humana. Estudios epidemiológicos y toxicológicos en todo el mundo han puesto de manifiesto el potencial de estos efectos reside en la exposición aguda o crónica a las PM (INE, 2009b). Mientras la población se encuentre expuesta a altas concentraciones de PM y por más tiempo, ésta tiene un mayor riesgo de padecer enfermedades respiratorias y cardiovasculares (WHO, 2018).

Las partículas entran al sistema respiratorio por medio de la respiración del aire que las transporta. Las de mayor tamaño se depositan en la nariz y garganta, mientras que las más pequeñas ingresan a los pulmones, incluso hasta partes más profundas. Es así como, las partículas pueden transportar por nuestro organismo compuestos tóxicos además de microorganismos y material biológico, provocando alergias, incluso que ingresen al torrente sanguíneo provocando daños a otros órganos (SIMAT, 2018).

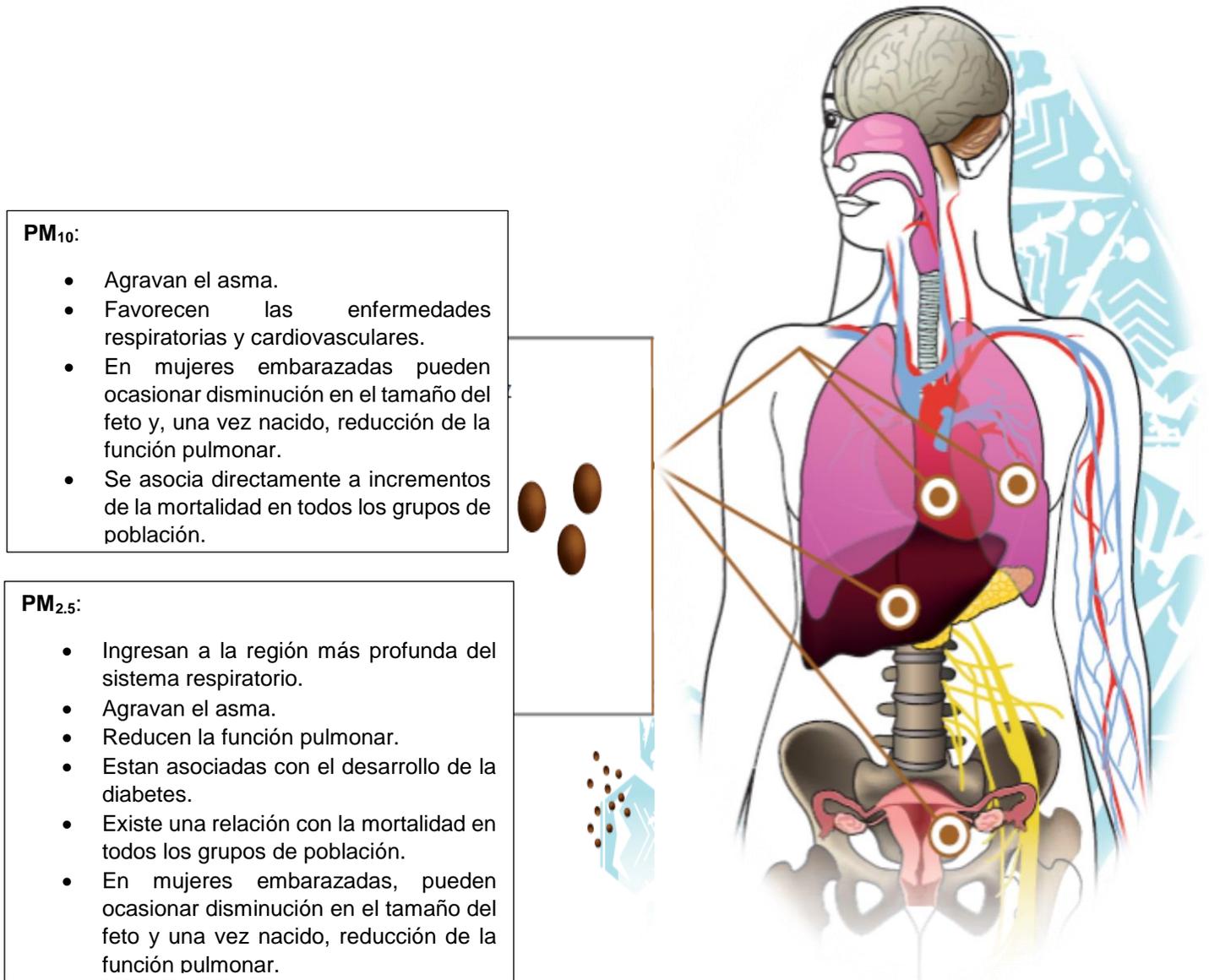
A pesar de que ninguna persona está exenta de sufrir las afectaciones derivadas de la exposición al PM, existen grupos aún más vulnerables como los niños, los adultos mayores, personas con enfermedades del corazón o de pulmón (EPA, 2017) y aquellas que sufren de asma o bronquitis (SIMAT, 2018). Aun cuando la condición de salud sea favorable, la exposición a altos niveles de contaminación por PM produce síntomas temporales (EPA, 2017).

De acuerdo con la (EPA, 2017), entre los problemas de salud asociados a la contaminación por PM se encuentran:

- Tos, dificultad para respirar y ataques de asma
- Reducción en la función de los pulmones
- Ritmo cardiaco irregular y ataques del corazón
- Muerte prematura en personas con enfermedades del corazón y de pulmones.

En la **Figura 10** se describen los efectos de las partículas según su tamaño: partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) sobre algunos órganos y funciones del cuerpo.

Figura 10 Afectaciones de las PM₁₀ y PM_{2.5} sobre la salud humana



Fuente: SIMAT, 2018 con modificación propia.

Tomando en cuenta que el ser humano respira entre 5 y 8 litros de aire por minuto, la población está propensa a inhalar cualquier partícula que se encuentre en el aire, depositándose las de mayor tamaño en la nariz y en la garganta. Por otro lado, las más pequeñas pueden depositarse en los bronquios y en los pulmones (SIMAT, 2018) quedando atrapadas (SMA, 2018) y con la posibilidad de penetrar

profundamente en los mismos e inducir la reacción de la superficie y las células de defensa (OPS, 2017).

Aldunate et. al., (2006), explica que cuando éstas ingresan, los pulmones producen mucosidad para atraparlas y existen un tipo pelitos llamados cilios que se mueven para expulsar la mucosidad junto con las partículas al toser o estornudar. Con este mecanismo las partículas pueden ser transportadas a la boca y de ahí eliminarlas o pasarlas al sistema digestivo. Dicha función es considerada un mecanismo de defensa del organismo, sin embargo, el deterioro de la calidad del aire provoca que esta mucosidad se produzca de forma permanente (SIMAT, 2018).

2.5.5 Efectos del PM en el Medio Ambiente

Si bien, la importancia de las afectaciones de la contaminación por PM recae en la salud humana, cabe señalar que también producen daños sobre el ambiente, entre ellos, el deterioro en los edificios y estatuas, la reducción de la visibilidad debido a que dispersan y absorben la luz o por formación de niebla; además de deteriorar recursos como el agua (se incrementa su acidez), el suelo y la vegetación (bosques y cultivos) (EPA, 2017; SMA, 2018).

El Material Particulado (PM) es uno de los principales contaminantes al que se le atribuye el deterioro de la calidad del aire (SIMAT, 2018). y, por consiguiente, el que más aqueja a la economía, puesto que sus efectos causantes del deterioro de los recursos implican un costo (Vega, et al., 2004).

2.6 Contaminación atmosférica por partículas PM₁₀ en los municipios de la RAMA-ZMVT

Según INE (2009) uno de los principales problemas de calidad del aire que registran los municipios de la RAMA-ZMVT es el ocasionado por las elevadas concentraciones de partículas PM₁₀ y O₃.

Se han registrado altas concentraciones de PM₁₀ desde 1997, de acuerdo con un análisis realizado durante el periodo 1997-2005 (INE, 2009). Asimismo, Romero-Guzmán et al., (2007), afirmaron que las partículas PM₁₀ fueron el principal contaminante reportado por la RAMA-ZMVT.

2.6.1 Efectos en la salud humana asociados a las PM₁₀

Las partículas PM₁₀ o también llamadas partículas inhalables se han convertido en un tema de interés ambiental y de salud. Los efectos sobre la salud en la población se han hecho presentes, pues se ha señalado el aumento de enfermedades respiratorias y defunciones relacionadas al incremento de las concentraciones de las PM₁₀ (Aldunate, et al., 2006).

La importancia de monitorear las PM₁₀ surge por su origen antropogénico, ya que estudios han expuesto que las PM₁₀ registradas en las zonas urbanas, a su vez, están compuestas por partículas finas que fácilmente ingresan al sistema respiratorio (Maraziotis, et al., 2008).

Los grupos con mayor susceptibilidad a las PM₁₀ son los niños, por la falta de madurez de su sistema respiratorio; y los adultos mayores, caso contrario al de los niños, tienen un sistema respiratorio ya deteriorado (Zapata-Palacio, 2015). En este sentido se deduce que la magnitud de los efectos de la contaminación del aire sobre la salud, están influenciados por la edad y los hábitos de vida o condición de salud de las personas expuestas, sin dejar de lado que los niveles de concentración y tiempo de exposición también influyen (Martin, 2005). Otros grupos vulnerables son

las mujeres embarazadas y personas con problemas respiratorios (Gómez-Comba, 2017).

Evidentemente cuando las concentraciones de PM_{10} se incrementan, los síntomas temporales de la contaminación del aire también aumentan, entendiendo como síntomas temporales a la presencia de tos y flemas; fiebre y dolor de cabeza (Solarte, et al., 2002)

Particularmente, la exposición prolongada a partículas PM_{10} provenientes de la combustión representan un importante riesgo ambiental y de salud por ser causantes de cáncer de pulmón y enfermedades cardiopulmonares (Flores-Ruiz, et al., 2010; SMA, 2018). Estos riesgos se posicionan entre los de mayor preocupación y resaltan la necesidad de vigilar las concentraciones a las que la población está expuesta.

2.6.2 Fuentes de emisión de partículas PM_{10}

Las contribuciones de material particulado ingresan a la atmósfera como partículas primarias emitida directamente como liquido o solidos; y como partículas secundarias, las cuales son formadas en la atmósfera por reacciones entre gases precursores como gases orgánicos, Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y Óxidos de Azufre (SO_x) (Auffhammer, et al., 2009).

En este caso, las emisiones de partículas secundarias de PM_{10} por gases precursores a la atmósfera es mayor que las emisiones de las partículas primarias (Auffhammer, et al., 2009).

Entre las principales fuentes de emisión de partículas PM_{10} se encuentran:

- Procesos mecánicos de prensado, molienda y abrasión.
- Evaporación de aerosoles (reacciones de los gases sobre las partículas)
- Por la resuspensión de partículas depositadas en las calles
- El desgaste de las llantas sobre las calles

- El desgaste de las balatas de freno de los automóviles
- Suspensión de suelos en los cultivos y/o en la minería
- Actividades de construcción y demolición
- Cenizas de combustión de carbón no controlado, petróleo y madera, y de la
- Brisa marina (SEMARNAT, 2011).

2.6.3 Factores que influyen en la dispersión de PM₁₀

Existen factores determinantes en la dispersión de las PM₁₀. Su dispersión espacial y temporal está influenciada por las características físicas y meteorológicas de cada lugar (Unal, et al., 2011).

Los municipios de la RAMA-ZMVT cuentan con una variable favorable para la dispersión de las PM₁₀. Debido a que los municipios de la RAMA-ZMVT se encuentran dentro de un valle que no está cerrado por completo por barreras naturales como sucede en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la circulación del viento es favorecida la mayor parte del año y en consecuencia el transporte y dispersión de los contaminantes (GEM, 2012).

Entre las variables meteorológicas que pueden influir en la dispersión y variaciones de las concentraciones de PM₁₀ están la precipitación, la dirección y velocidad del viento (Yang, 2002; Holst, et al., 2008; INE, 2007; GEM, 2012).

El efecto de la precipitación sobre la disminución de las concentraciones de PM₁₀ consiste en la retención y arrastre de las partículas por parte de las gotas de lluvia para limpiar la atmósfera (Silva-Vinasco & Canchala-Nastar, 2013; INE, 2007). Respecto a la velocidad del viento, mientras esta aumenta, facilita la dispersión de las PM₁₀, caso contrario a las bajas velocidades del viento que facilitan su acumulación en la atmósfera (Silva-Vinasco & Canchala-Nastar, 2013).

Como ya se expuso en párrafos anteriores, las partículas son dispersadas y removidas por factores físicos y meteorológico, sin embargo, el tamaño de estas es un factor que determina su tiempo de permanencia en la atmósfera (SEMARNAT,

2011). El tamaño de las PM_{10} permite una sedimentación rápida, pero recorren distancias cortas en condiciones de vientos débiles depositándose cerca de la fuente de origen (GEM, 2012).

Por último, Pacsi-Valdivia (2016), encontró que el tránsito vehicular también es un factor de influencia en la dispersión de los contaminantes debido a la resuspensión del material de las vialidades que este ocasiona.

2.6.4 Principales fuentes de emisión que influyen en las concentraciones de partículas PM_{10} en la RAMA-ZMVT

Dentro de las actividades antropogénicas que explican los niveles de contaminación de una ciudad, se encuentra la actividad industrial y el parque vehicular (Camacho-García & Flamand, 2008). Sin embargo, para el caso específico del municipio de Toluca las principales fuentes emisoras de PM_{10} son las fuentes erosivas, las áreas agrícolas los caminos sin pavimentar, las actividades de la construcción y el tráfico vehicular (INE, 2009; GEM, 2012).

Según GEM (2004), se emiten 7,777.17 toneladas¹ de PM_{10} al año en la ZMVT. Las principales fuentes que emitieron PM_{10} y que influyeron en el registro de altas concentraciones en la RAMA-ZMVT fueron las áreas agrícolas y las fuentes erosivas con 51.2%. El transporte de carga con 15.1%) y los productos metálicos, maquinaria y equipo con 8.9%. le siguieron en menor porcentaje, el transporte de pasajeros, los autos particulares, la industria alimenticia, los incendios forestales entre otras fuentes (GEM, 2004).

En la **Tabla 11** se presentan las concentraciones de PM_{10} con base en los tipos de fuentes y porcentaje de emisión en la ZMVT para el año 2004.

¹ Estimación para los 22 municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Tabla 11 Emisiones de partículas PM₁₀ por tipo de fuentes en la ZMVT, 2004*

Fuente	PM₁₀ (ton/año)¹	PM₁₀ (%)
Puntuales	224.6	13.6
Área	148.9	9.0
Móviles	431.2	26.1
Vegetación y suelo	849.3	51.3
Total	1,654.0	100

Elaboración propia con base en GEM, 2004.

Como se puede observar en la tabla anterior, las fuentes con mayor emisión de partículas PM₁₀ fueron naturales (vegetación y suelo) con 51.3%, seguido de las fuentes móviles con 26.1% y las fijas (industria) con 13.6%. Las fuentes de área emitieron PM₁₀ en menor medida representando 9.0%.

Según el Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (2004), la actividad industrial no es la que contribuye en mayor medida con emisiones de PM₁₀, no obstante, resulta importante considerar que es una de las actividades económicas predominantes en dos de los siete municipios de la RAMA-ZMVT, es decir, Toluca y Lerma. En particular, tan solo los parques industriales del municipio de Toluca representan el 10.41% de los 96 que se encuentran en el Estado de México (PMDUT², 2013-2015).

En la **Tabla 12** se presentan los parques industriales localizados dentro de los municipios de Lerma y Toluca.

¹ Estimación para los 22 municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

² Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca

Tabla 12 Parques industriales en los municipios de Lerma y Toluca

Municipio	Nombre del parque industrial
Lerma	Corredor Industrial Lerma
	Microparque Industrial O´donell Logistic
	Parque Industrial Cerillo I
	Parque Industrial Cerillo II
	Parque Industrial FRISA (Doña Rosa)
	Parque Industrial Lerma
	Prologis Park Toluca
Toluca	Parque Industrial El Coecillo
	Parque Industrial Exportec I
	Parque Industrial Exportec II
	Parque Industrial San Antonio Buenavista
	Parque Industrial San Cayetano
	Parque Industrial Toluca
	Parque Industrial Toluca 2000
	Parque Industrial Vesta Park Toluca
	Zona Industrial Toluca
Total	18

Elaboración propia con base en Secretaría de Economía, 2016.

Según GEM (2004), las emisiones de PM₁₀ en las industrias del municipio de Toluca ocupaban el segundo lugar, mientras que las emisiones de PM₁₀ de Lerma ocupaban el tercer lugar, estas posiciones respecto de los cuatro principales contaminantes que se emiten en las industrias mencionadas. Fue así como llegaron

a concentrarse las emisiones de PM₁₀ y PM_{2.5} con el 18.8% y 19.5% respectivamente.

De acuerdo con GEM (2004), las actividades de los parques industriales de la ZMVT abarcan los siguientes subsectores: productos alimenticios, bebidas y tabaco, textiles prendas de vestir e industria del cuero, Industria de la madera y productos de la madera, incluyendo muebles, papel, productos de papel, imprentas y editoriales, sustancias químicas y productos de hule y de plástico, productos minerales no metálicos, industrias metálicas básicos, productos metálicos, maquinaria y equipo. Incluye instrumentos quirúrgicos y de precisión y otras industrias manufactureras (GEM, 2004). Se hace mención de los subsectores de la ZMVT por la importancia que tienen en el sentido de que, dependiendo de la rama industrial, éstas tendrán un efecto directo en la contaminación generada en determinada región (Mercado-García & Fernández-Constantino, 2002).

Para el año 2004 los subsectores de la industria con mayor porcentaje de emisiones de PM₁₀ en el año 2004 fue el de los productos metálicos, maquinaria y equipo con 65.4% de emisiones, seguido de los productos alimenticios, bebidas y tabaco con 12.9% (GEM, 2004).

En la **Tabla 13** se presentan las emisiones de PM₁₀ provenientes de fuentes fijas y por sector en la ZMVT en el año 2010. Cabe resaltar que la estimación corresponde a los 22 municipios, pues no se cuenta con la información específica para los siete municipios de la RAMA-ZMVT. La estimación de las concentraciones de PM₁₀ se presenta en toneladas por año.

Tabla 13 Emisiones de PM₁₀ por fuentes fijas y sector en la ZMVT (2010)

Fuente fija y sector	PM₁₀ (ton/año)
Petróleo y petroquímica	18.2
Química	185.4
Pinturas y tintas	30.9
Metalúrgica (incluye la siderúrgica)	63.8
Automotriz	278.2
Celulosa y papel	75.3
Cemento y cal	0.0
Industria del asbesto	0.0
Industria del vidrio	222.5
Generación de energía eléctrica	24.7
Tratamiento de residuos peligrosos	4.2
Industria de alimentos y bebidas	10.8
Industria textil	7.2
Industria de la madera	0.0
Industria del asfalto	0.0
otros	11.9
Total	932.9

Elaboración propia con base en GEM, 2014.

Se observa que el sector de las fuentes fijas que generó mayores emisiones de PM₁₀ en el año 2010, fue la industria automotriz con 278.2 toneladas al año, seguido de la industria del vidrio con 222.5 toneladas al año y finalmente la industria química con 185.4 toneladas al año. Las emisiones totales de PM₁₀ por fuentes fijas fue de 932.9 toneladas al año.

La importancia de la industria es innegable económicamente hablando, sin embargo, las emisiones a la atmósfera derivadas de sus procesos de producción producen efectos ambientales y de salud, que debieran ser igual de importantes (GEM, 2012; Mercado-García & Fernández-Constantino, 2002).

Por otro lado, la consolidación del sector industrial en la ZMVT influyó en la construcción de infraestructura y vías de comunicación, las cuales también juegan un papel importante en la emisión de partículas PM₁₀ a la atmósfera. La existencia de vialidades que conectan a las zonas de importancia económica, como las zonas industriales y el centro, ocasiona una mayor carga del tránsito vehicular, lo que se traduce en procesos de combustión por el combustible de los vehículos, además de las condiciones de las vialidades, todo esto se reduce a contribuciones de PM₁₀ (PMDUT, 2013-2015).

En este contexto, es pertinente mencionar las principales vialidades alrededor de la RAMA-ZMVT que son: Prolongación Avenida Isidro Fabela, Paseo Adolfo López Mateos, Vía Alfredo del Mazo, Vía José López Portillo, Paseo Tollocan, Paseo Colón, Calzada al Pacífico, Avenida Salvador Díaz Mirón, Avenida Tecnológico, Avenida de las Partidas-Zona Industrial-Lerma-El Cerrillo y las (GEM, 2012).

La mayoría de las vialidades de la ZMVT, si no es que todas, son vialidades altamente transitadas por el parque vehicular y suelen saturarse, lo cual da lugar a puntos de conflicto vial.

En la **Tabla 14** se mencionan los puntos de las principales vialidades de la RAMA-ZMVT que frecuentemente se congestionan por el tráfico vehicular.

Tabla 14 Vialidades y puntos de conflicto vial alrededor de la RAMA-ZMVT

Vialidad	Punto de conflicto vial
Paseo Adolfo López Mateos	Torres chicas
	Paseo Vicente Guerrero
	Laguna del Volcán
Las Torres	Heriberto Enríquez
	José María Pino Suárez

Paseo Tollocan	5 de Mayo
	Salvador Díaz Mirón
	Paseo Colón
	José María Pino Suárez
	5 de Mayo
	Salvador Díaz Mirón
	Heriberto Enríquez
	Isidro Fabela
Alfredo del Mazo	José López Portillo
	Paseo Lombardo Toledano
	Paseo Tollocan
José María Morelos	José Vicente Villada
	Ignacio López Rayón
	Benito Juárez
	Isidro Fabela
Miguel Hidalgo	Ignacio López Rayón
	Benito Juárez
	Isidro Fabela
	Filiberto Gómez

Isidro Fabela	Río Papaloapan
	Primero de Mayo
	Independencia
Independencia	Sebastián Lerdo de Tejada
	Ignacio López Rayón
	Isidro Fabela
	Benito Juárez
	Sebastián Lerdo de Tejada
Sebastián Lerdo de Tejada	Ignacio López Rayón
	Paseo Vicente Guerrero
Heriberto Enríquez	Ceboruco

Elaboración propia con base en PMDUT, 2013-2015.

En la **Figura 11** se muestran los puntos de conflicto vial y el flujo de vehículos que circulan al día en dichos puntos alrededor de la RAMA-ZMVT.

Figura 11 Puntos de conflicto vial y carga vehicular en las principales vialidades alrededor de la RAMA- ZVMT



Fuente: PMDUT, 2013-2015.

Pese a la construcción de pasos vehiculares en las laterales para agilizar el tránsito vehicular, los problemas de congestión siguen presentes, en particular sobre el tramo del corredor Industrial Toluca-Lerma, circuito Tollocan (PMDUT, 2013-2015) dejando abierta la posibilidad de que en esta zona se generen emisiones considerables de PM₁₀ por el elevado flujo de vehículos y por las industrias establecidas en la zona.

En la **Tabla 15** se presentan las emisiones de PM₁₀ procedentes de fuentes móviles en la RAMA-ZMVT en el año 2010. La estimación de las concentraciones de PM₁₀ se presenta en toneladas por año.

Tabla 15 Emisiones de PM₁₀ por fuentes móviles en la RAMA-ZMVT, 2010

<i>Fuente móvil</i>	PM₁₀ (ton/año)
<i>Autos particulares</i>	74.9
<i>Taxis</i>	22.0
<i>Combis</i>	20.3
<i>Pick up</i>	20.2
<i>Microbús</i>	36.3
<i>Autobús</i>	75.5
<i>Tracto</i>	33.9
<i>Menores a tres toneladas</i>	3.5
<i>Mayores a tres toneladas</i>	320.7
<i>Motocicletas</i>	7.3
<i>Total</i>	614.6

Elaboración propia con base en GEM, 2014.

Como puede observarse, el transporte mayor a tres toneladas fue el que mayores emisiones de PM₁₀ aportó en el año 2010. En segundo lugar, los autobuses y tercer lugar los autos particulares. Las emisiones totales por fuentes móviles fueron de 614.6 toneladas por año.

A pesar de los esfuerzos realizados por los diferentes órdenes de gobierno y la iniciativa privada en cuanto a la medición y cumplimiento del marco jurídico vigente, la contaminación del aire continúa siendo uno de los problemas de salud pública más importantes que afecta a la población a nivel nacional (NOM-025-SSA1-2014, 2014).

2.7 Marco jurídico sobre contaminación atmosférica por PM₁₀.

En este apartado se tratan los instrumentos que fundamentan el marco jurídico sobre contaminación atmosférica traducido en normas y reglamentos que regulan la calidad del aire en el país.

México cuenta con instrumentos jurídicos para la prevención y control de la contaminación del aire, entre estos se encuentra la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), el Reglamento de la LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica; así como las Normas Oficiales Mexicanas en materia de contaminación atmosférica. El sustento de dichos instrumentos parte de algunos artículos de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

En la **Figura 12** se presenta un esquema del marco jurídico relativo a contaminación atmosférica en México.

Figura 12 Marco jurídico en materia de contaminación atmosférica



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen brevemente los aspectos con relación a contaminación atmosférica establecidos en los instrumentos presentados en el esquema anterior.

a) Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

- Artículo. 4° establece el derecho de toda persona a desarrollarse en un ambiente sano, y quien genere algún daño ambiental tendrá responsabilidad sobre el mismo.
- Artículo 27° establece los lineamientos para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales
- Artículo 73° determina las facultades del congreso para emitir leyes en materia ambiental (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2017).

b) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

La LGEEPA es un instrumento de la legislación ambiental publicada el 28 de enero de 1988 en el DOF. Tiene el objeto de promover el desarrollo sustentable a través de:

- Establecer las bases para prevenir y controlar la contaminación del aire, agua y suelo; entre otros temas ambientales.
- Comprende cinco títulos, de los cuales el título IV corresponde a “Protección al Ambiente”, y dentro de este, el capítulo II trata sobre la “Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera”. Este capítulo abarca del Artículo 110 al Artículo 116 y hacen referencia a las atribuciones de la Secretaría y coordinación de las autoridades correspondientes para controlar, reducir o evitar la contaminación atmosférica a través de la expedición de las normas oficiales mexicanas pertinentes y promover la gestión de la calidad del aire con la formulación de programas para mantener la calidad del aire como satisfactoria en todas las regiones del país (LGEEPA, 2012).

A su vez la LGEEPA cuenta con reglamentos en cuatro rubros ambientales diferentes. Entre ellos se encuentra el Reglamento en materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica que se integra de cuatro capítulos en los cuales se establecen las pautas para el cumplimiento de lo establecido en el capítulo II “Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera” de la LGEEPA

(Reglamento de la LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, 2014).

2.7.1 Normatividad sobre PM₁₀ en México

Desde la década de los 80 y 90's se han documentado estudios sobre los efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana en lugares que han registrado altos niveles de contaminación atmosférica (OMS, 2018).

En los apartados siguientes se presenta la normatividad aplicable en México que coadyuva a mantener la calidad del aire como satisfactoria con relación a las PM₁₀ y así mitigar sus efectos sobre la salud y el ambiente.

Un instrumento imprescindible para la gestión de la calidad del aire en cada país es la formulación de normas de calidad del aire para la protección de la salud de la población (OMS, 2005).

Las normas de calidad del aire determinan los valores máximos permisibles de concentración de los contaminantes criterio, para evitar que la población esté expuesta a niveles de contaminación que implican efectos adversos a su salud (RAMA, 2018). Sus especificaciones se formulan con base en las condiciones de desarrollo y capacidades de cada país para la gestión de la calidad del aire (OMS, 2005).

2.7.1.1 Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014

En México fue en el año de 1994 que el gobierno federal estableció normas de calidad del aire enfocadas en los contaminantes criterio, entre ellos las partículas PM₁₀. Pese a que el país no contaba con los recursos necesarios para realizar las investigaciones necesarias sobre los efectos por la exposición a los contaminantes de los animales y los seres humanos, las normas se formularon con base en los criterios adoptados en otros países (De la Luz-González, 2000).

Las normas mexicanas de calidad del aire son publicadas por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación (DOF) (RAMA, 2018).

En la **Tabla 16** se presenta un cuadro con la NOM-025-SSA1-2014 que establece los límites máximos permisibles de concentraciones de PM₁₀ para la protección de la salud y las modificaciones que ha sufrido en el tiempo.

Con base en GEM (2007), se entiende por exposición aguda a la exposición de la población a las PM₁₀ en 24 horas, mientras que la exposición crónica se refiere a la exposición de la población anual.

Tabla 16 Norma Oficial Mexicana de partículas PM₁₀

NOM-025-SSA1 DE PM₁₀			
CONTAMINANTE	EXPOSICIÓN AGUDA	EXPOSICIÓN CRÓNICA	NOM
	Concentración y tiempo promedio de exposición	Concentración y tiempo promedio de exposición	
Material Particulado (PM₁₀)	150 µg/m ³ (24 horas)	50 µg/m ³ Promedio aritmético anual	NOM-025-SSA1-1993
Material Particulado (PM₁₀)	120 µg/m ³ (24 horas)	50 µg/m ³ Promedio aritmético anual	Modificación a la NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005)
Material Particulado (PM₁₀)	75 µg/m ³ (24 horas)	40 µg/m ³ Promedio aritmético anual	Modificación a la NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014)

Elaboración propia con base en (NOM-025-SSA1-2014, 2014; GEM, 2007).

Como se observa en la Tabla 16, con el tiempo los estándares permisibles de concentración de partículas PM₁₀ han disminuido.

Como se mencionó al inicio de este apartado, cuando se crearon las Normas Oficiales Mexicanas (NOM's), México no contaba aún con la infraestructura ni con la información suficientes para establecer y fundamentar los estándares adecuados para la protección de la salud. No obstante, durante el paso de los años se ha generado más información sobre los efectos nocivos de las partículas PM₁₀ y otros contaminantes, ajustando las NOM's, con el fin de garantizar la protección de la salud de la población.

Es así como la NOM fue sometida a dos modificaciones desde su publicación. La primera en 2005, y la segunda en 2014, esta última es la actualmente vigente.

Vega y otros (2004), argumenta que si bien, el gobierno mexicano ha invertido esfuerzos para controlar la contaminación del aire, es necesario trazar medidas más exigentes para el control de las fuentes de emisión y mantener la vigilancia de su cumplimiento, esto en el sentido de que los límites máximo permisibles en México están por encima a los recomendados por organismos internacionales como la OMS.

2.7.1.2 Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993

La aplicación de la NOM-025-SSA1-2014 va de la mano con la NOM-035-SEMARNAT-1993. Esta última establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición (NOM-025-SSA1-2014).

2.7.2 Normatividad a nivel internacional sobre PM₁₀

En el siguiente apartado se presentan las normas existentes en otras regiones del mundo en materia de PM₁₀, con el fin de establecer una comparación entre los límites máximos permisibles de estas con los establecidos en la norma oficial mexicana.

2.7.2.1 Guías de Calidad del Aire (AQG) de la OMS

Desde 1987 la Organización Mundial de la Salud publicó directrices sobre la calidad del aire fundamentadas en investigaciones científicas (OMS, 2018).

Las guías de calidad del aire propuestas por la OMS (AQG- *Air Quality Guidelines*), brindan orientación e información a las autoridades para el diseño de su normativa nacional con relación a los contaminantes criterio y se reduzcan los efectos de la contaminación del aire sobre la salud (OMS, 2018).

Los valores propuestos para las AQG están en función de la exposición breve (24 horas); y prolongada, (media anual) para partículas PM_{2.5} y PM₁₀, por sus efectos sobre la salud a corto y largo plazo (OMS, 2005).

En la **Tabla 17** se presentan los valores de las directrices de la calidad del aire (AQG) de la OMS para partículas junto con los niveles de concentración de PM₁₀ en µg/m³ bajo los cuales aún representan un porcentaje de riesgo para la salud de la población.

Tabla 17 Directrices de la calidad del aire (AQG) de la OMS

	PM₁₀ (µg/m³)	PM_{2.5} (µg/m³)	
Nivel-1	70	35	15% mayor riesgo de mortalidad a largo plazo en relación con los niveles de AQG
Nivel-2	50	25	6% menor riesgo de mortalidad a largo plazo en relación con el Nivel 1
Nivel-3	30	15	6% menor riesgo de mortalidad a largo plazo en relación con el Nivel 2
WHO AQG	20	10	Nivel más bajo en presentar aumento al riesgo a la salud en respuesta a la exposición a largo plazo a PM _{2.5}

Elaboración propia con base en OPS, 2017.

2.7.2.2 Unión Europea (UE)

Según la EEA (2017), aproximadamente el 90 % de la población urbana de la Unión Europea se encuentra expuesta a concentraciones de contaminantes atmosféricos nocivos para la salud. En este contexto, la UE se ha planteado objetivos de calidad del aire a largo plazo de reducir los niveles de contaminación atmosférica específicamente para la protección de la salud y del ambiente; no obstante, se siguen presentando altas concentraciones de contaminantes como Ozono, Dióxido de Nitrógeno y Partículas o PM (EEA, 2017).

La Unión Europea (UE) tiene diversos niveles de actuación legislativa para mejorar la calidad del aire.

- Mantiene la cooperación entre los sectores encargados de la contaminación atmosférica y autoridades nacionales y regionales; con organizaciones no gubernamentales y con la comunidad científica.
- Emite la normatividad ambiental pertinente a través de la **Comisión Europea** (EC, *European Commission*), la cual expide las políticas y la legislación en materia de protección de la calidad del aire, al mismo tiempo de vigilar su cumplimiento por parte de los países de la Unión Europea (EC, 2017). La norma de la EC establece los siguientes valores límite permisibles:

Tabla 18 Valores Límite Permisibles de PM₁₀ (UE-EC)

Contaminante	Exposición	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM ₁₀	(24 horas)	50
	(Media anual)	40

Elaboración propia con base en EC, 2017.

2.7.2.3 EPA

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (**U.S. EPA**, Environmental Protection Agency) es un organismo federal de los Estados Unidos que tiene como misión resolver problemas ambientales, por ejemplo, la contaminación del aire. Este organismo establece las normas de calidad del aire para diferentes contaminantes en aquel país (Dickson, 2000).

Tabla 19 Valores Límite permisibles de PM₁₀ (U.S. EPA)

Contaminante	Exposición	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM ₁₀	(24 horas)	150
	(Media anual)	50

Elaboración propia con base en Dickson, 2000.

Para concluir este apartado en la **Tabla 20** se presenta a manera de resumen, los límites máximos permisibles (LMP) de PM₁₀ en la norma mexicana y en las normas de otros países.

Tabla 20 Resumen de las normas para partículas PM₁₀ en México y el mundo, 2018

Contaminante		OMS	EPA	UE	México
PM ₁₀	Promedio 24 horas	50 µg/m ³	150 µg/m ³	50 µg/m ³	75 µg/m ³
	Promedio anual	20 µg/m ³	50 µg/m ³	40 µg/m ³	40 µg/m ³

Elaboración propia con base en (OMS, 2005; Dickson, 2000; EC, 2017; GEM, 2007).

Como se puede observar en la tabla anterior los valores del LMP para PM₁₀ en la NOM sigue estando por encima del LMP en otros países, excepto los de la EPA, que están incluso por encima de los valores de la norma mexicana.

Es importante señalar que estos límites no aseguran una protección total a la salud de la población expuesta (OMS, 2005). De acuerdo con la OMS (2005), la posibilidad de efectos adversos en la salud persiste aun cuando se alcance el valor guía, por lo cual sugiere adoptar concentraciones inferiores a los valores de la OMS como normas nacionales de calidad del aire, además de que es poco probable que una norma o un valor guía ofrezca una protección completa a todas las personas frente a todos los posibles efectos adversos del material particulado en la salud.

Epílogo

Las PM_{10} han sido consideradas como un contaminante importante de analizar, ya que como se mencionó en este apartado, el Material Particulado (PM) en general, es un contaminante complejo por la variedad de características que pueden adquirir según las fuentes de emisión.

Las PM_{10} se emiten de fuentes que pueden ser antropogénicas, pero también naturales en algunos casos incrementando las concentraciones de este contaminante en el aire, sin embargo, es preciso mencionar que se identificaron factores que determinan el tiempo de permanencia y/o dispersión en el aire de las PM_{10} , entre ellas, las variables meteorológicas y las características físicas de un determinado lugar.

Dichas variables contribuyen a limpiar, de cierta manera el aire que se respira, no obstante como se vio en este apartado, en la zona de estudio aplican instrumentos que motivan el cumplimiento de las normas de calidad del aire y como resultado, mantengan bajo control la contaminación del aire por PM_{10} y contaminantes criterio que son los que representan mayor riesgo para la salud humana.

De entre dichos instrumentos, se encuentra el monitoreo atmosférico a través de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT), la cual colabora a la medición de las concentraciones de los contaminantes criterio aportando información importante para conocer el nivel de concentraciones de cada contaminante. Este instrumento se considera más bien técnico. En ese sentido, la forma más práctica de informar a la población sobre la calidad del aire es por medio del índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), el cual simplifica la información de acuerdo con un cierto puntaje que determina si la calidad del aire es satisfactoria en la zona de estudio para que la población tome las medidas pertinentes. Por otro lado, están los ProAire¹ que emiten medidas a corto, mediano y largo plazo para reducir los efectos de la

¹ Programa de Gestión para mejorar la calidad del Aire

contaminación del aire, éstos son un instrumento más bien preventivo y correctivo (SEMARNAT, 2018).

Si bien, se han implementado los instrumentos mencionados anteriormente, cabe señalar que los LMP¹ establecidos en las normas oficiales mexicanas se encuentran por encima de los que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS), aunque estos no son necesariamente obligatorios, se considera que al ser un organismo internacional, se da por hecho que éste ha integrado la evidencia y fundamento suficiente para proponer límites máximos bajo los cuales sea mínimo el riesgo de que las PM₁₀ ocasionen daños en la salud humana. La misma OMS (2005), afirma que dichos límites permisibles no aseguran una protección total para la salud de la población.

¹ Límite Máximo Permisible

Capítulo 3

Marco contextual



Capítulo 3. Marco contextual

En el presente capítulo se abordan algunas de las características físicas y aspectos socioeconómicos de los municipios de la RAMA-ZMVT para contextualizar el objeto de estudio. El capítulo se integra de tres apartados. El primer apartado corresponde a la localización de la RAMA-ZMVT; en el segundo apartado se abordan las características físicas propias de la RAMA-ZMVT tales como la orografía, el relieve, el clima, la meteorología y la dinámica de vientos. Finalmente, en el tercer apartado se describen los aspectos socioeconómicos de la RAMA-ZMVT, entre estos, la dinámica poblacional, la distribución de la población sensible, las actividades económicas que se desarrollan en la RAMA-ZMVT, así como las vías de comunicación y finalmente los usos de suelo.

3.1 Localización

La ZMVT está comprendida por 22 municipios (GEM, 2012), sin embargo, para el tema de la gestión de la calidad del aire se consideran 7 municipios de este a oeste y de norte a sur, estos son: Xonacatlán, Lerma, Ocoyoacac, San Mateo Atenco, Metepec, Toluca y Zinacantepec (GEM, 2007).

Se consideran estos siete municipios debido a que son los que mayormente deterioran la calidad del aire por su dinámica urbana y las actividades económicas que desarrollan. Juntos abarcan un total de 1,208.55 km² y corresponden al 5.3% del territorio estatal; mientras que la superficie urbana de los mismos comprende 315.80 km² del territorio estatal (GEM, 2007).

Para fines de la presente investigación se trabajará con esta especificación de la RAMA-ZMVT comprendida por los siete municipios ya mencionados, y dentro de los cuales se encuentran las siete estaciones de monitoreo de ésta.

En la **Tabla 21** se presenta la cabecera municipal de cada uno de los siete municipios, así como la superficie en km² y en porcentaje que éstos abarcan.

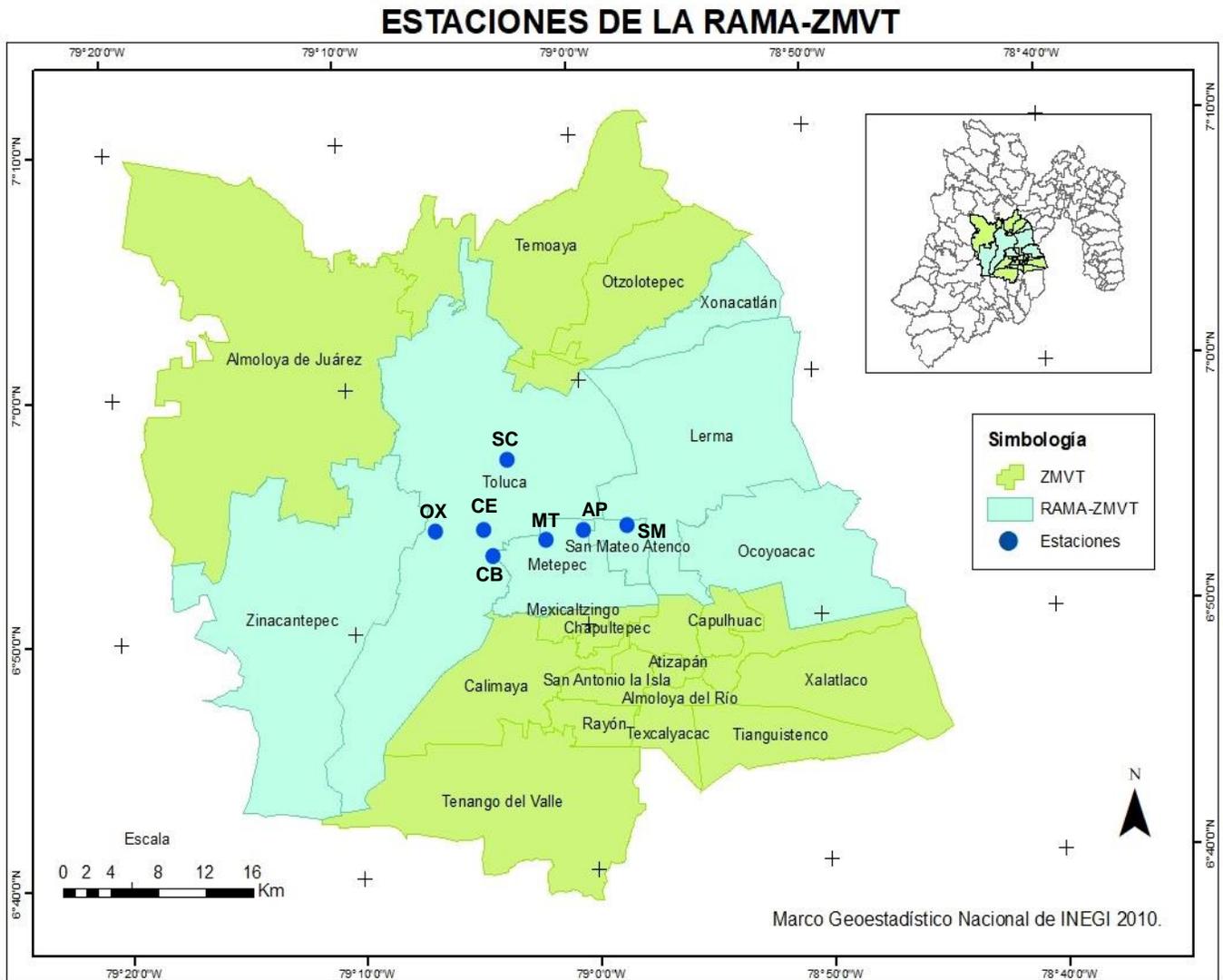
Tabla 21 Municipios considerados para la calidad del aire en la ZMVT

No.	Municipio	Cabecera municipal	Superficie (km²)	%
1	Lerma	Lerma de Villada	228.64	19.0
2	Metepéc	Metepéc	70.43	5.9
3	Ocoyoacac	Ocoyoacac	134.71	11.2
4	San Mateo Atenco	San Mateo Atenco	12.58	1.0
5	Toluca	Toluca de Lerdo	420.14	35.0
6	Xonacatlán	Xonacatlán de Vicencio	32.87	2.7
7	Zinacantepec	San Miguel Zinacantepec	309.18	25.1
Total			1,208.55	100.00

Elaboración propia con base en GEM, 2007.

En la **Figura 13** se presenta la localización de los siete municipios considerados para la calidad del aire y las estaciones de la RAMA-ZMVT.

Figura 13. Mapa de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca



Elaboración propia con base en INEGI, 2018.

Cómo se aprecia en la figura 13, la zona de estudio colinda al norte con los municipios de Almoloya de Juárez, Temoaya y Ocotlán. Al sur tiene colindancia con los municipios de Tenango del Valle, Calimaya, Mexicaltzingo, Capulhuac, entre otros.

3.2 Características físicas

En el presente apartado se describen las características físicas de la zona en la que se encuentra la RAMA-ZMVT, ya que la dispersión de contaminantes depende de factores como el relieve (Unal, et al., 2011) entre otros.

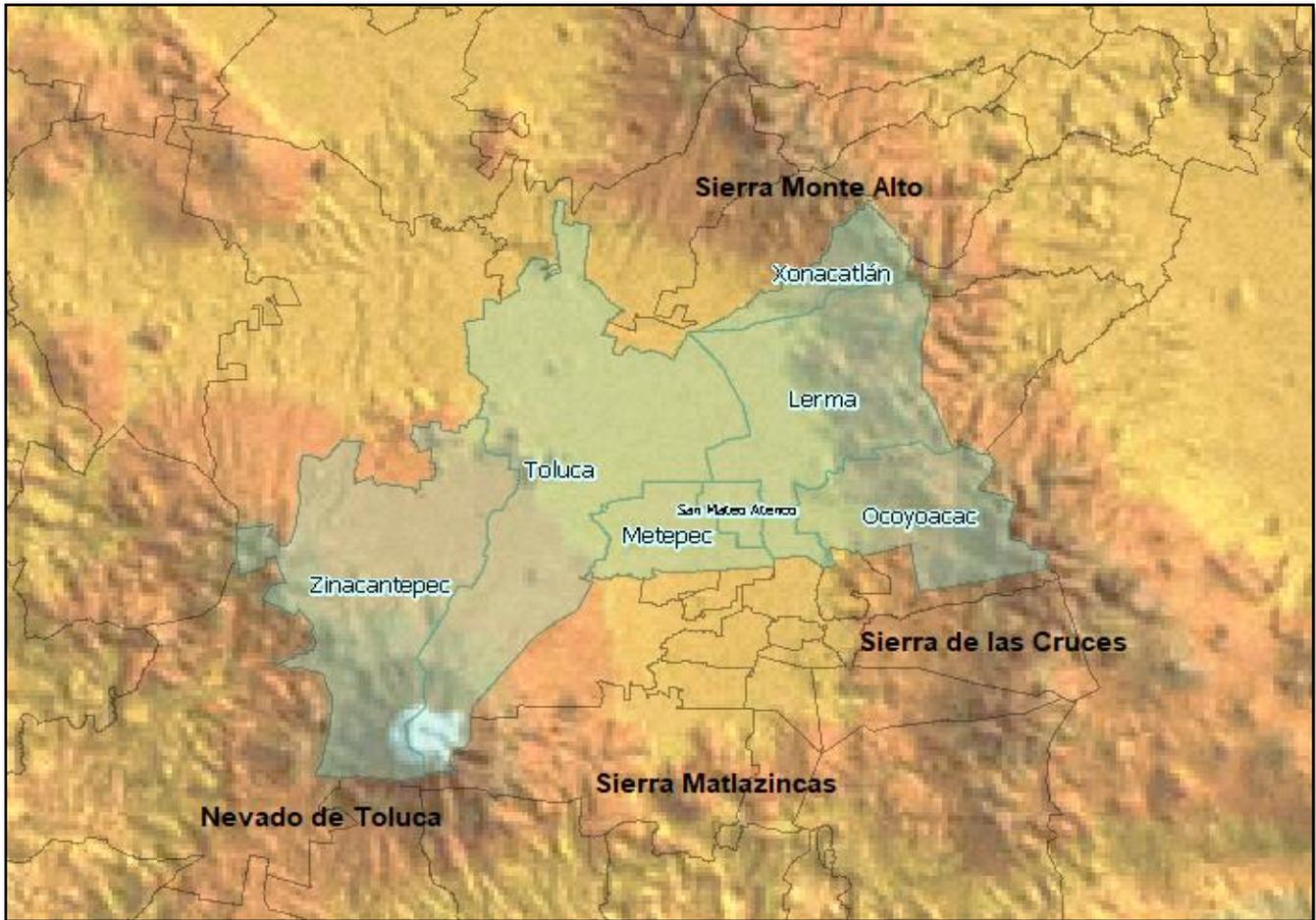
En ese contexto, se describe la orografía y el relieve, el clima, la meteorología y la dinámica de vientos en la zona de estudio.

3.2.1 Orografía y relieve

Los 7 municipios que abarca la RAMA-ZMVT están rodeados por sierras y volcanes individuales. Al Suroeste, la Sierra Nevado de Toluca; al Este, la Sierra de las Cruces; al Noreste, la Sierra de Monte Alto y al Sur, la Sierra Matlazinca (GEM, 2012). La zona central representa el terreno de menor elevación de toda el área y comprende la zona urbana de la ciudad de Toluca de Lerdo, ubicada en un rango que va de los 2,500m a los 2,7000m de elevación (Versañez-Vences, 2014).

En la **Figura 14** se observan las principales elevaciones dentro de los siete municipios de la RAMA-ZMVT.

Figura 14. Principales elevaciones dentro de los municipios de la RAMA-ZMVT



Elaboración propia con base en INEGI, 2018.

Particularmente, el volcán Nevado de Toluca, el cual abarca una parte del municipio de Zinacantepec, juega un papel determinante en la dinámica del viento de la zona de estudio. Existen elevaciones menores dentro del municipio de Zinacantepec como el cerro la Calera y el volcán Gordo que también influyen en la dirección del viento que sopla del Sur (GEM, 2012).

Por otro lado, abarcando los municipios de Xonacatlán y Lerma, se encuentra la parte correspondiente a la Sierra de Monte Alto, entre las principales elevaciones está el cerro Xeshadi, y en la Sierra de las Cruces que comprende parte del municipio de Ocoyoacac, destacan el cerro El Gavilán, y los volcanes: La Palma y

La Campana, los cuales forman una obstrucción para los vientos alisios a su arribo sobre la zona de estudio (GEM, 2012).

En la **Tabla 22** se presentan las elevaciones que por su altitud influyen en la dinámica de los vientos de los siete municipios considerados para la calidad del aire.

Tabla 22 Elevaciones de los municipios de la RAMA-ZMVT

Municipio	Elevación	Ubicación	Altura (m.s.n.m)
Lerma	La Campana	Sierra Monte Alto	3300
Lerma	Xeshadi	Sierra Monte Alto	3400
Ocoyoacac	El Gavilán	Sierra de las Cruces	3000
Toluca	Molcajete	Sierra Morelos	2900
Toluca	El Ombligo	Nevado de Toluca	4600
Toluca	Pico del Fraile	Nevado de Toluca	4600
Zinacantepec	Volcán Gordo	Nevado de Toluca	3700
Zinacantepec	La Calera	Nevado de Toluca	3740

Fuente: GEM, 2012.

3.2.2 Clima

En la zona de estudio, están presentes tres tipos de clima: templado húmedo, semifrío subhúmedo y frío (GEM, 2012).

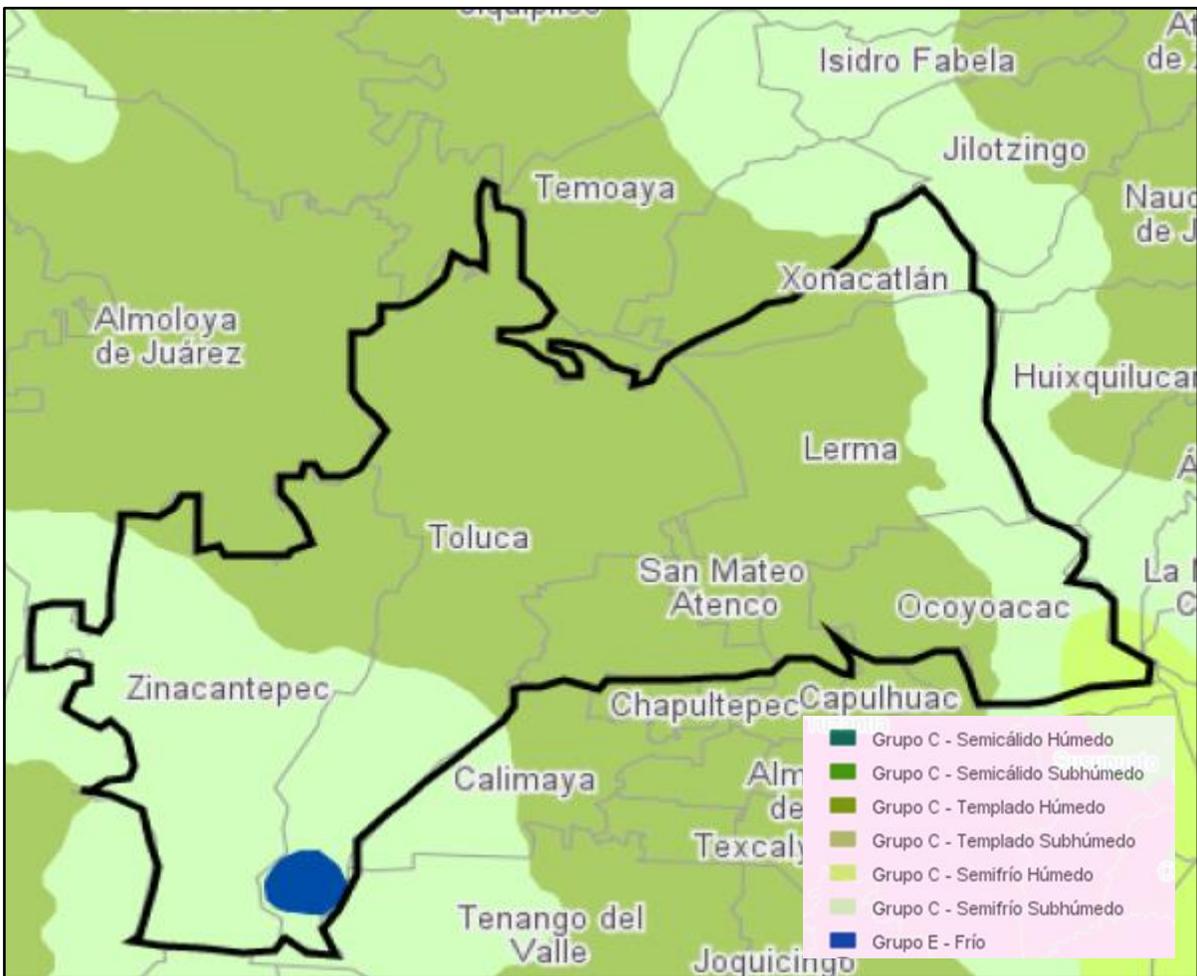
- **Templado húmedo [C(W2)(w)b(i)g]:** abarca la mayor parte de los municipios que corresponden a la RAMA-ZMVT.
- **Semifrío [C(E)]:** presenta dos subtipos: El semifrío subhúmedo [C(E)(W2)(w)b(i)g], característico de aquellas zonas con altitud considerable,

como el Nevado de Toluca, la Sierra de Monte Alto y la Sierra de las Cruces y el semi frío húmedo [C(E)(m)(w)b(i)g].

- **Frío [E(T)H]:** es característico de zonas altas, como en el volcán Nevado de Toluca (GEM, 2012).

En la **Figura 15** se observan los tipos de clima en los municipios de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Figura 15 Tipos de clima en los municipios de la RAMA-ZMVT



Elaboración propia con base en INEGI, 2018.

En este contexto del clima, se presentan tres épocas climatológicas:

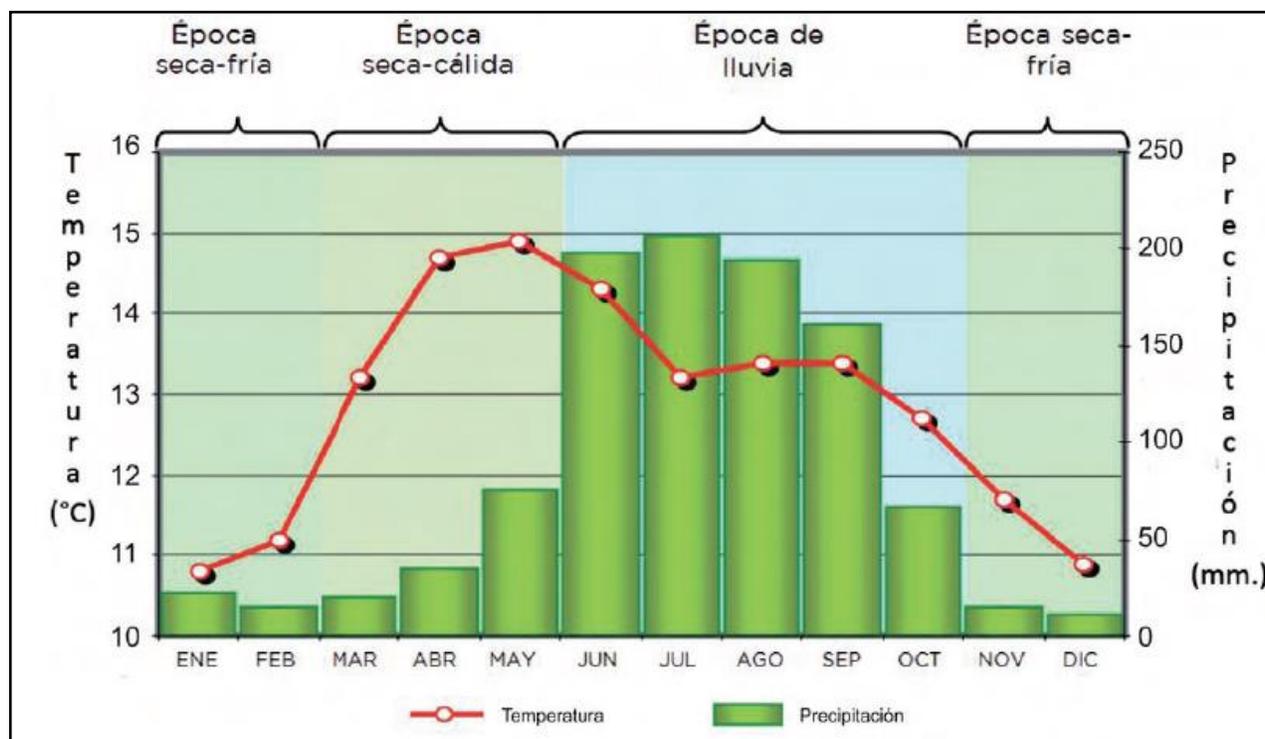
1. Época seca-fría (noviembre-febrero): presenta la temperatura promedio mensual más baja durante el año con un rango de entre 9° y 11° C.

2. Época seca-cálida (marzo-mayo): presenta un ascenso en la temperatura hasta llegar a los 15° C, siendo la temperatura máxima a lo largo del año. La precipitación pluvial es poco significativa presentando registros inferiores a los 40 mm de precipitación.

3. Época de lluvia (junio-octubre): presenta precipitaciones que se desarrollan con un rango de entre 160 y 210 mm. Se registra un descenso de la temperatura para mantenerse entre los 11° y 13° C (GEM, 2012).

En la **Figura 16** se muestra el climograma de las épocas climatológicas que se manifiestan en la zona de estudio.

Figura 16 Climograma de la RAMA-ZMVT



Fuente: GEM, 2012.

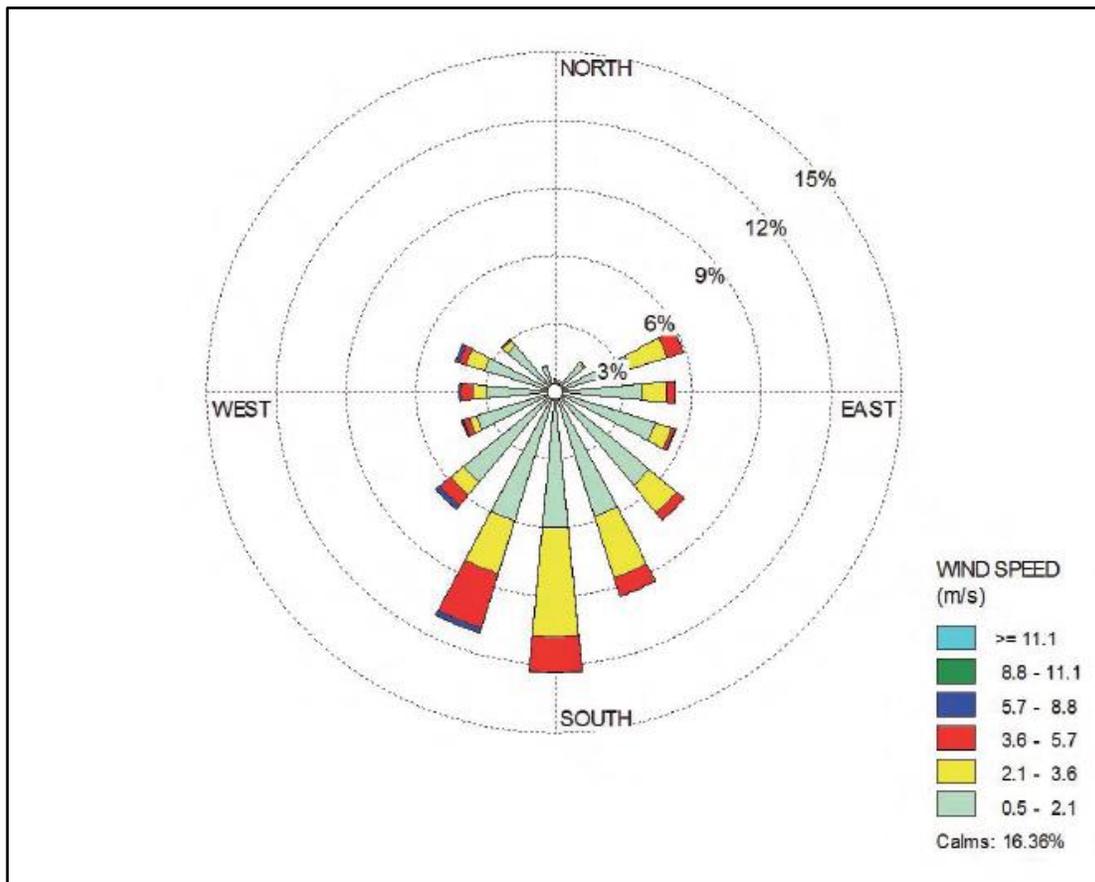
3.2.3 Meteorología

Por la posición geográfica de los siete municipios que abarca la RAMA-ZMVT, estos se encuentran bajo la influencia de sistemas meteorológicos tropicales (GEM, 2012) como ondas y ciclones (GEM, 2007) durante la época de lluvia, los cuales aportan la humedad más importante del año en forma de nublados y lluvias abundantes contribuyendo significativamente a la remoción de los contaminantes presentes en la atmósfera (GEM, 2012).

Caso contrario ocurre en la época seca-fría, en la cual se presentan desplazamientos de frentes fríos y masas de aire polar; presentándose sistemas anticiclónicos (tiempo atmosférico estable y seco) dando lugar a inversiones térmicas, que desde luego van a originar condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes (GEM, 2012). Sin embargo, una característica importante de la zona de estudio es que no se encuentra encerrada por completo por barreras naturales como sucede en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), favoreciendo la circulación del viento la mayor parte del año y en consecuencia el transporte y dispersión de los contaminantes (GEM, 2012).

En la **Figura 17** se presenta la rosa anual de los vientos en la que se observa que el comportamiento de los vientos en la zona de estudio tiene una marcada dominancia de los vientos del Sur y Sureste (GEM, 2012).

Figura 17 Rosa Anual de los Vientos de la RAMA-ZMVT



Fuente: GEM, 2012.

3.2.4 Dinámica de vientos

La dinámica de los vientos es un factor de suma importancia, ya que se encarga de dispersar los contaminantes, extendiendo sus efectos desde donde son emitidos hacia las áreas colindantes, sumando esta contaminación a la ya producida por las fuentes locales (Aldunate, et al., 2006).

La circulación del viento en la zona de estudio presenta variaciones en dirección y frecuencia dependiendo del relieve, pero en general, los siete municipios de la RAMA-ZMVT se encuentran en la zona de influencia de los vientos alisios (PMDUT, 2013-2015).

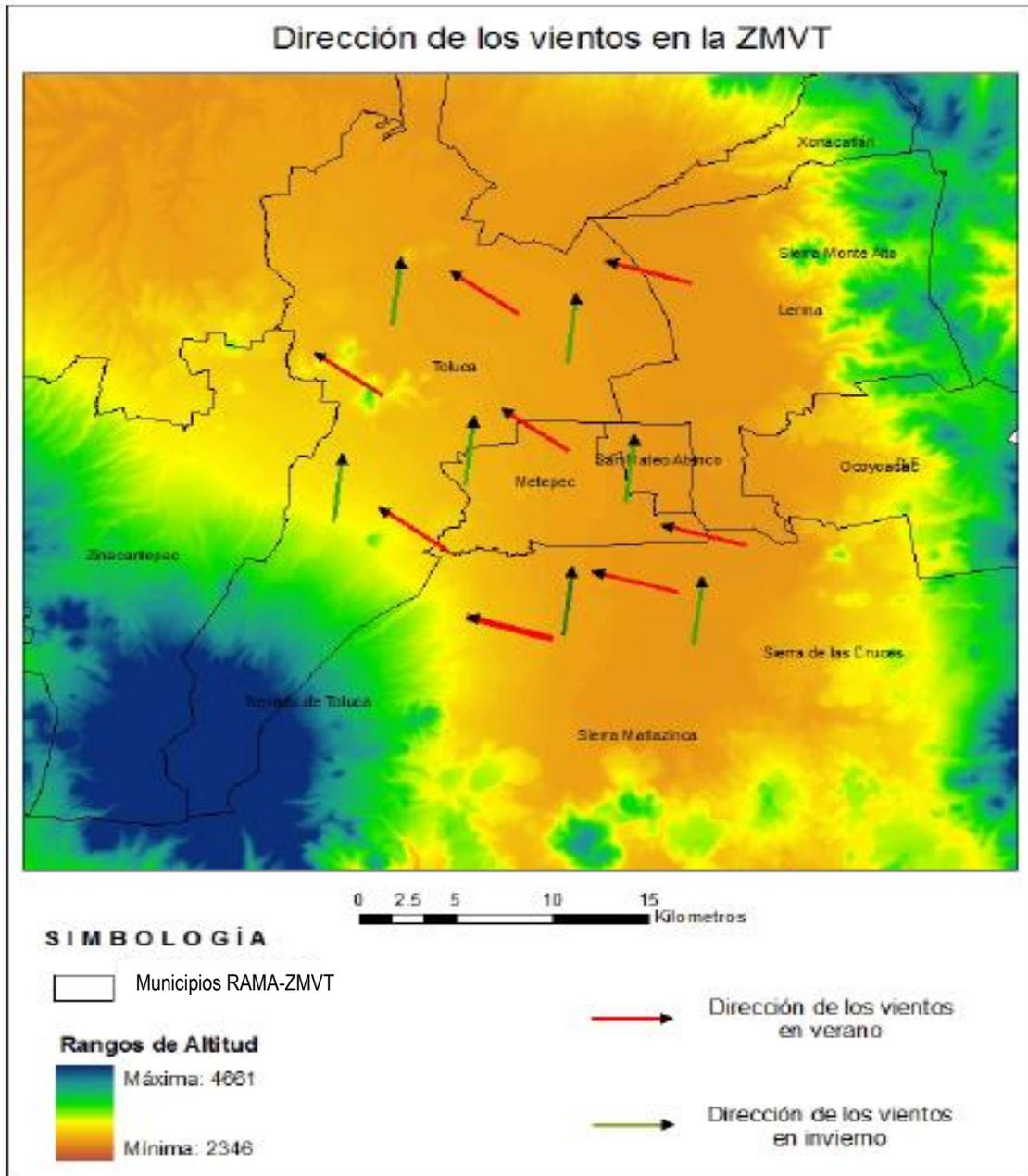
El comportamiento de los vientos alisios es diferente respecto de la temporada. La intensidad de éstos es débil y estable durante la época fría con vientos provenientes del Sur y con dirección Norte, con una ligera curvatura desviada a favor de las manecillas del reloj (PMDUT, 2013-2015).

Por otro lado, durante la época seca-cálida la rapidez de los vientos alisios intensifican y modifican el curso del viento; sin embargo, la influencia de la Sierra de las Cruces orientada de Norte a Sur, obstruye el paso libre de los vientos alisios; es así como estos vientos del Este se encuentran con los del Sur para girar ligeramente hacia el Noroeste (GEM, 2007).

Finalmente, durante la época de lluvia, la dinámica de los vientos alisios van del Este y Sureste con dirección Norte y Noroeste (PMDUT, 2013-2015), favoreciendo la transportación y el depósito de contaminantes generados en lugares como la zona industrial del municipio de Lerma (GEM, 2007).

Como se puede observar en la **Figura 18**, el volcán “Nevado de Toluca” representa una barrera importante que impide la libre circulación de los vientos y ocasiona un cambio de su trayectoria hacia el flanco Sureste (GEM, 2007).

Figura 18 Dinámica de vientos en los municipios que abarca la RAMA-ZMVT



Fuente: García-Chávez, 2014 con modificación propia.

3.3 Aspectos socioeconómicos de los municipios de la RAMA-ZMVT

Las ciudades con una notable concentración demográfica desarrollan relaciones entre las actividades económicas, laborales y de servicios, mismas que pueden contribuir a la contaminación del aire (GEM, 2012). En este contexto, se desarrollan en este apartado las características socioeconómicas de la zona de estudio.

3.3.1 Dinámica poblacional

De acuerdo con el Censo General de Población y Vivienda 2010 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) la población total de los municipios que abarca la RAMA-ZMVT pasó de 1,516,996 habitantes en el año 2010; a 1,630,291 habitantes para el año 2015.

En la **Tabla 23** se muestra la población de los siete municipios de que abarca la RAMA-ZMVT.

Tabla 23 Población de los siete municipios que abarca la RAMA-ZMVT

No.	Municipio	Hombres	Mujeres	2010	2015
1	Lerma	66,669	68,130	134,799	146,654
2	Metepec	103,059	111,103	214,162	227,827
3	Ocoyoacac	30,365	31,440	61,805	66,190
4	San Mateo Atenco	35,597	36,982	72,579	75,511
5	Toluca	394,836	424,725	819,561	873,536
6	Xonacatlán	22,871	23,460	46,331	51,646
7	Zinacantepec	82,109	85,650	167,759	188,927
Total				1,516,996	1,630,291

Fuente: (INEGI, 2010; INEGI, 2015)

La densidad de población de los municipios de la RAMA-ZMVT difiere respecto de la extensión territorial (GEM, 2012). Los municipios con un mayor número de población son Toluca, Metepec, Zinacantepec y Lerma.

3.3.2 Distribución de la población sensible

Según INEGI (2010), los grupos vulnerables de la población se estructuran respecto a la edad, de la siguiente manera:

1. Grupo A (0 a 14 años)
2. Grupo B (15 a 64 años)
3. Grupo C (65 y más años)

Tabla 24 Grupos de edad de la población sensible

Municipio	Población	Grupo de edad			Población sensible	%
		A:0-14	B:15-64	C:65 y más		
Lerma	134,799	40,848	85,975	6,326	47,174	34.9
Metepec	214,162	53,488	145,803	10,685	64,173	29.9
Ocoyoacac	61,805	18,047	40,378	3,126	21,173	34.2
San Mateo Atenco	66,568	22,500	40,212	2,742	25,242	37.9
Toluca	819,561	230,416	535,838	38,063	268,479	32.7
Xonacatlán	46,331	14,435	29,741	2,067	16,502	35.6
Zinacantepec	167,759	52,960	106,790	6,598	59,558	35.5
Total	1,510,985	432,694	984,737	69,607	502,301	34.4

Elaboración propia con base en GEM, 2012.

3.3.3 Actividades económicas

Dentro de las actividades económicas de los siete municipios de la RAMA-ZMVT prevalecen la industrial y de servicios., las cuales se han ampliado en diversidad, competitividad y tamaño. El municipio de Lerma destaca en las actividades económicas terciaria y secundaria; San Mateo Atenco en el sector secundario; Toluca y Metepec como generadores de empleos y servicios en los sectores secundario y terciario compitiendo entre sí (GEM, 2012).

3.3.3.1 Actividades del sector primario

Una de las características de la ZMVT es que en las laderas de las montañas y en la planicie se desarrolla la actividad agrícola principalmente de temporal. Dichas montañas cuentan con suelos susceptibles a la erosión ocasionando la emisión de partículas de origen natural (GEM, 2012).

Por otro lado, se desarrolla la ganadería, actividad responsable de emisiones de partículas por la erosión del suelo y la pérdida de cubierta vegetal al irrumpir en áreas forestales con la deforestación y con incendios provocados para la regeneración de la vegetación con el fin de pastorear rebaños (GEM, 2012).

3.3.3.2 Actividades del sector secundario

En los municipios de la RAMA-ZMVT la industria manufacturera es la actividad dominante del sector secundario. La zona industrial se concentra en el municipio de Toluca, y cuenta con aproximadamente 3 mil 464 unidades económicas, representando un 30.49% de la planta industrial de la ZMVT en su totalidad (GEM, 2012).

El sector secundario ha presentado un crecimiento hacia el norte del municipio (PMDUT, 2013-2015).

Según datos del INEGI, la industria manufacturera de la entidad está compuesta por el 93.9% de microindustrias; 3.1% por pequeñas industrias; 2.5% por industrias medianas y el 0.5% por grandes industrias (GEM, 2012).

Los subsectores de la industria manufacturera de mayor relevancia son: productos alimenticios, bebidas y tabaco, textiles, prendas de vestir e industria del cuero; productos metálicos, maquinaria y equipo; productos minerales no metálicos excepto los derivados del petróleo y carbón; y la industria de la madera (GEM, 2007).

3.3.3.3 Actividades del sector terciario

La urbanización y la expansión del mercado interno han contribuido al incremento de las actividades del sector terciario en los últimos años. Destacan las actividades de comercio al por menor de alimentos, bebidas y tabaco, servicios de apoyo a los negocios, manejo de desechos, servicios de remediación, servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (GEM, 2012).

La mayor parte de los comercios se concentra en los municipios de Metepec, Toluca, Lerma y Zinacantepec. En el caso del primero destaca en ventas al mayoreo y menudeo de abarrotes y perecederos, mientras que la mayor concentración de servicios se presenta en Toluca, Metepec y Zinacantepec (GEM, 2012; PMDUT, 2013-2015).

3.3.4 Vías de comunicación

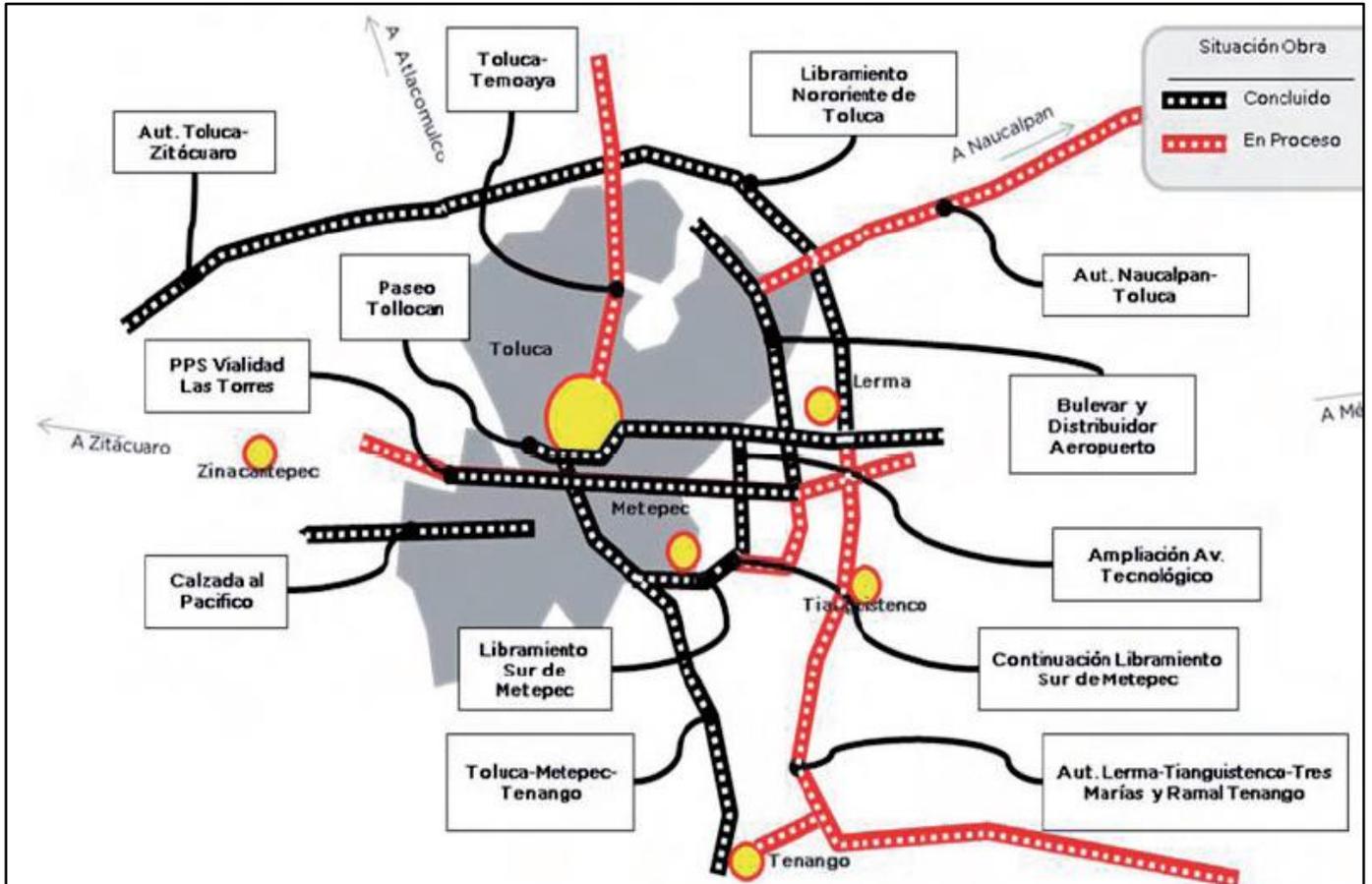
Dentro del municipio de Toluca se encuentra el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Toluca, considerado como la quinta terminal aérea del país en número de pasajeros, el índice de más alto crecimiento en los últimos años. El municipio cuenta con una extensa red de carreteras, modernos libramientos, autopistas y vialidades han mejorado, la conectividad, los tiempos de traslado y la imagen urbana de las vialidades (GEM, 2012).

Las principales vías de comunicación son el Libramiento Nororiente de Toluca y Sur de Metepec; el Boulevard y Distribuidor Aeropuerto; las Autopistas: Toluca–Zitácuaro; Toluca–Naucalpan y Lerma-Santiago Tianguistenco-Tres Marías y Ramal a Tenango del Valle. Las Vialidades: Prolongación Avenida Isidro Fabela, Paseo Adolfo López Mateos, Vía Alfredo del Mazo, Vía José López Portillo, Paseo Tollocan, Paseo Colón, Calzada al Pacífico, Avenida Salvador Díaz Mirón, Avenida Tecnológico, Avenida de las Partidas-Zona Industrial-Lerma-El Cerrillo y las Carreteras: Toluca-Metepec-Tenango del Valle, Toluca-Temascaltepec-Valle de Bravo, Toluca- Temoaya, Toluca Amanalco de Becerra-Valle de Bravo, Toluca-San Felipe Tlalmimilpan, Santiago Tianguistenco Chalma, Amomolulco- Xonacatlán, Xonacatlán-Presa José Antonio Álzate, Ocoyoacac-Santiago Tianguistenco, Tenango-Joquicingo, a Marquesa-Santiago Tianguistenco, Mexicaltzingo Tianguistenco- Xalatlaco, Almoloya de Juárez; San Mateo Atenco-San Pedro Tultepec y Santiago Tianguistenco-Tenango del Valle (GEM, 2012).

La Carretera México-Toluca es el principal acceso a Toluca, donde predominan las zonas industriales en sentido Oriente-Poniente, mientras que el comercio y servicios en sentido opuesto; en este último se nota la conformación de un corredor urbano. Dicho acceso presenta buenas condiciones físicas de pavimentación (PMDUT, 2013-2015).

En la **Figura 19** se observan las principales vialidades de la zona de estudio.

Figura 19 Vías de comunicación que abarcan la RAMA-ZMVT



Fuente: GEM, 2012.

3.3.5 Usos de suelo

El uso de suelo destinado para la agricultura es del 63.6%, le sigue en importancia el uso de suelo forestal con el 19.4%, el uso de suelo urbano con 4.2% y otros usos de suelo (áreas sin vegetación aparente, cuerpos de agua y carreteras) ocupan un 12.8%: Cabe destacar que la superficie de suelo forestal sufre una gran presión por el cambio de uso del suelo a agrícola pecuario, y a su vez, de agrícola a urbano, mientras que el segundo uso urbano corresponde al industrial, el cual comprende

una superficie de 1,780.35 ha (10% del suelo urbano), y se encuentra ubicado principalmente en la zona oriente y norte del Municipio (GEM, 2012).

Epílogo

La zona de estudio cuenta con aproximadamente 1,630,291 habitantes (INEGI, 2015) que se encuentran expuestos a concentraciones de PM₁₀ en el aire perjudiciales para su salud.

Según datos de GEM¹ (2012), la población más sensible a la contaminación atmosférica se concentra en cuatro de los siete municipios de la RAMA-ZMVT², en primer lugar, el municipio de Toluca (268,479 hab.³ sensibles), seguido de Metepec (64,173 hab. sensibles), Zinacantepec (59,558 hab. sensibles) y Lerma (47,147 hab. sensibles). Cabe destacar que las actividades económicas de dichos municipios pueden generar partículas PM₁₀; entre Toluca y Lerma se encuentra el corredor industrial Toluca-Lerma, mientras que Metepec y Zinacantepec destacan como municipios con actividades económicas del sector terciario, principalmente comercio y servicios (GEM, 2012; PMDUT, 2013-2015)⁴.

Si bien, representa una zona importante económicamente hablando, a nivel estatal y nacional, esto al mismo tiempo ha repercutido en la contaminación del aire en la zona de estudio. Pese a que las características físicas y meteorológicas de la zona de estudio resultan favorables para la dispersión de los contaminantes a través de la circulación de los vientos que se presentan en la zona de estudio por ser un valle abierto, no debe subestimarse implementar medidas para reducir las emisiones originadas por las actividades antropogénicas, como la actividad vehicular e industrial presentes en los municipios de la RAMA-ZMVT, sobre todo en el caso de Toluca y Lerma que presentan por un lado, un mayor número de población sensible a la contaminación y por otro, actividades industriales.

¹ Gobierno del Estado de México

² Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

³ Habitantes

⁴ PMDUT = Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca

Capítulo 4

Resultados



Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se presenta gráfica y estadísticamente el análisis de las concentraciones de PM_{10} registradas en las siete estaciones que integran la RAMA-ZMVT. El capítulo se compone de cuatro apartados. El primer apartado presenta los promedios horarios de las concentraciones de PM_{10} por estación, durante el periodo 2011-2017. En el segundo apartado se presentan los promedios mensuales de las concentraciones de PM_{10} por estación para el mismo periodo, así como la correlación entre las concentraciones de PM_{10} y la precipitación media anual durante los meses de junio a octubre (época de lluvias). En el tercer apartado se presentan los promedios anuales de las concentraciones de PM_{10} por estación y por año durante el periodo 2011-2017. En el cuarto apartado se presenta un análisis del número de días de incumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 en cada estación durante el periodo 2011-2017.

Cabe mencionar que, debido a la cantidad de gráficas obtenidas, se presenta sólo una breve descripción conforme a lo observado en éstas. Posteriormente, en las gráficas que representan las concentraciones totales de PM_{10} durante el periodo de estudio 2011-2017, se lleva a cabo un análisis de los resultados en conjunto.

Las concentraciones de PM_{10} se presentan en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), puesto que las mediciones de la calidad del aire son reportadas en concentraciones medias diarias o anuales de partículas PM_{10} por metro cúbico (m^3) de aire, a su vez las mediciones técnicas de la calidad del aire describen esas concentraciones expresadas en microgramos (μ/m^3) (Mogrovejo-Tenecela, 2015).

4.1 Concentraciones horarias de PM₁₀ en la RAMA-ZMVT durante 2011-2017

En este apartado se presentan las gráficas de las concentraciones horarias de PM₁₀ en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT. Para todas las gráficas se identifican las horas de concentraciones máximas tomando como referencia el límite máximo permisible (línea roja continua) establecido en la Norma Oficial Mexicana de PM₁₀ (vigente 2014), no obstante, solo para fines ilustrativos se señala en las gráficas el valor límite establecido en la NOM de PM₁₀ anterior (modificación 2005) (línea roja punteada).

Límites Máximos Permisibles (LMP):

- 120 µg/m³ promedio 24 horas NOM-025-SSA1-1993 (modificación 2005):
- 75 µg/m³ promedio 24 horas NOM-025-SSA1-2014 (vigente).

Seis de las siete estaciones reportaron datos para el periodo de estudio 2011-2017, la estación Aeropuerto (AP) no registró datos para los años 2016 y 2017, ya que ésta fue desconectada a finales del 2015, registrando así, datos hasta el mes de septiembre del año en mención.

Cada estación tiene un color de identificación:

- **AP** Azul cielo
- **CB** Anaranjado
- **CE** Gris
- **MT** Amarillo
- **OX** Azul claro
- **SC** Verde
- **SM** Azul marino

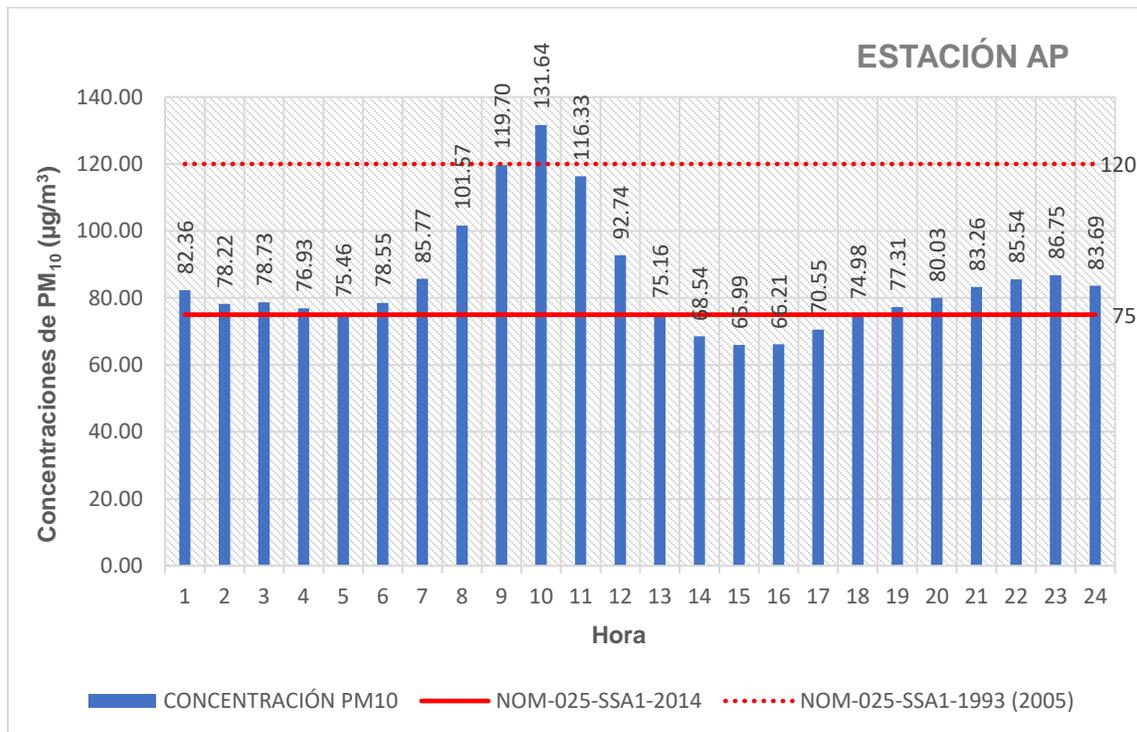
4.1.1 PM₁₀/hora por estación en el año 2011

Se presentan las gráficas de cada estación de la RAMA-ZMVT, para observar el comportamiento de las concentraciones por hora de PM₁₀ durante las 24 horas en el año 2011 identificando las estaciones que registran las concentraciones fuera de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un LMP de 75 µg/m³ (promedio 24 horas) de PM₁₀ para la protección de la salud humana.

4.1.1.1. Estación AP

La gráfica 1 representa el promedio horario de concentración de PM₁₀ en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación AP respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 1 Concentraciones PM₁₀ por hora estación AP en el año 2011



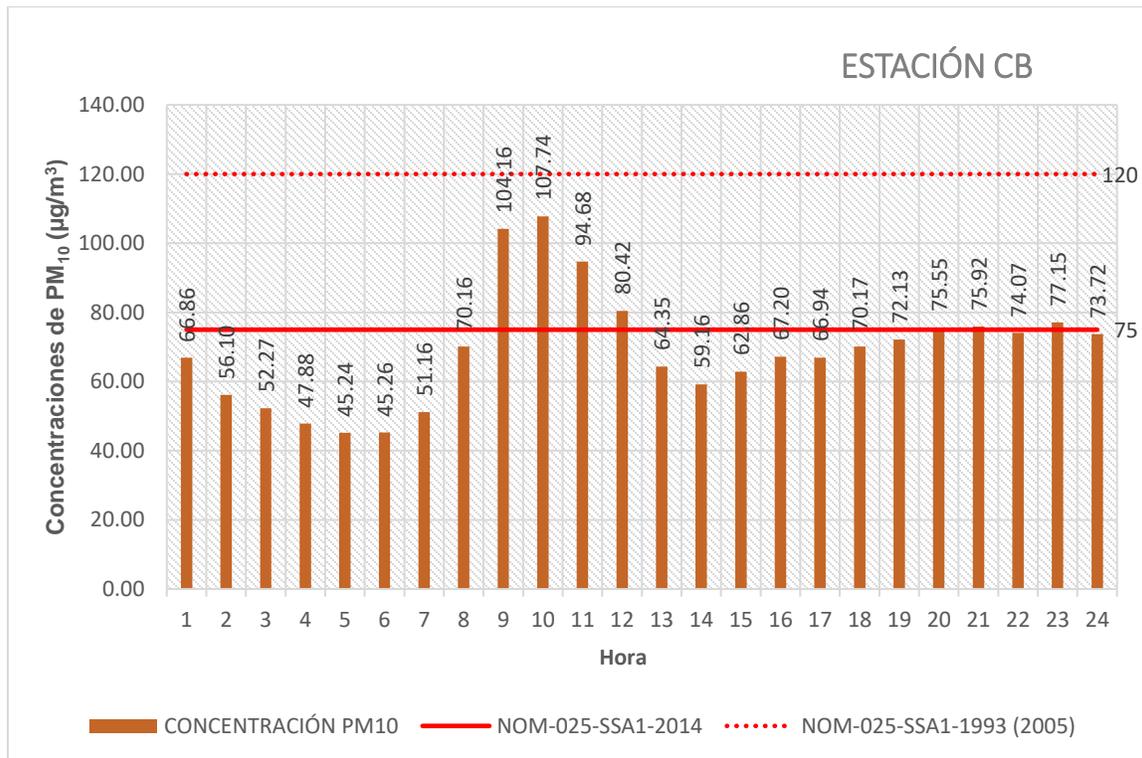
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 1 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 8 valores/hora, entre las 6:00 y 13:00 horas. Las concentraciones disminuyeron de 14:00 a 18:00 horas, incrementándose nuevamente a partir de las 19:00 hasta las 24:00 horas. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas con 131.64 µg/m³, mientras que la concentración mínima se registró a las 15:00 horas con 65.99 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.1.2. Estación CB

La gráfica 2 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CB respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 2 Concentraciones PM₁₀ por hora estación CB en el año 2011



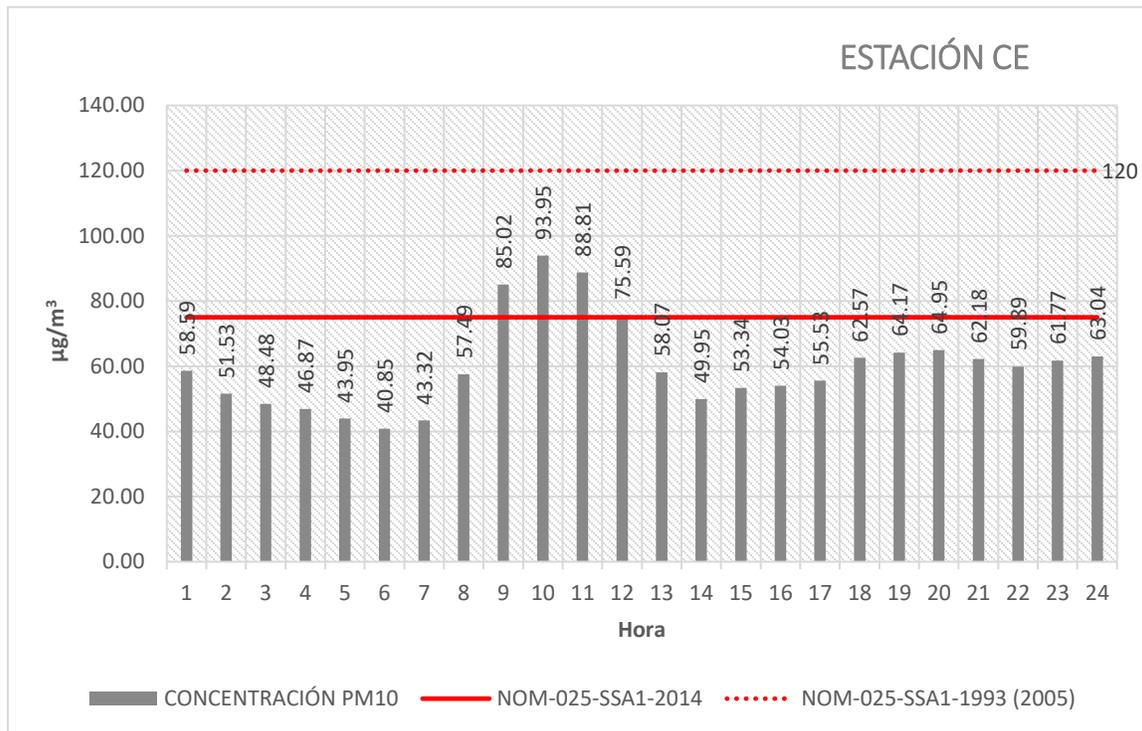
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 2 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 4 valores/hora, entre las 9:00 y 12:00 horas. La concentración máxima se registró a las 9:00 y 10:00 horas con 104.16 µg/m³ y 107.74 µg/m³ respectivamente. Las concentraciones más bajas se registraron de 1:00 a 7:00 horas; la concentración mínima se registró a las 5:00 horas con 45.24 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.1.3. Estación CE

La gráfica 3 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Centro (CE) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CE respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 3 Concentraciones PM₁₀ por hora estación CE en el año 2011



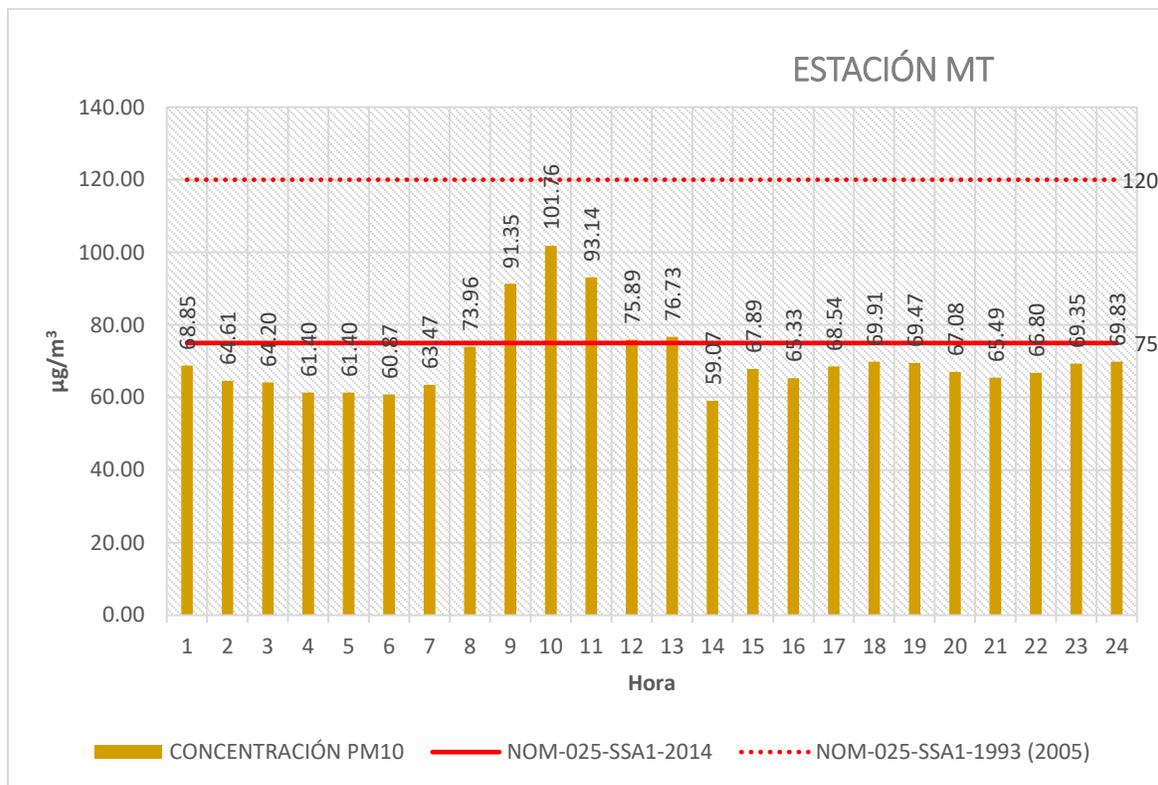
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 3 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 4 valores/hora, entre las 9:00 y 12:00 horas. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas con 93.95 µg/m³ de PM₁₀. Las concentraciones más bajas se registraron entre la 1:00 y 8:00 horas; y entre las 13:00 horas y 17:00 horas. La mínima concentración se registró a las 6:00 horas con 40.85 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.1.4 Estación MT

La gráfica 4 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Metepec (MT) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación MT respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 4 Concentraciones PM₁₀ por hora estación MT en el año 2011



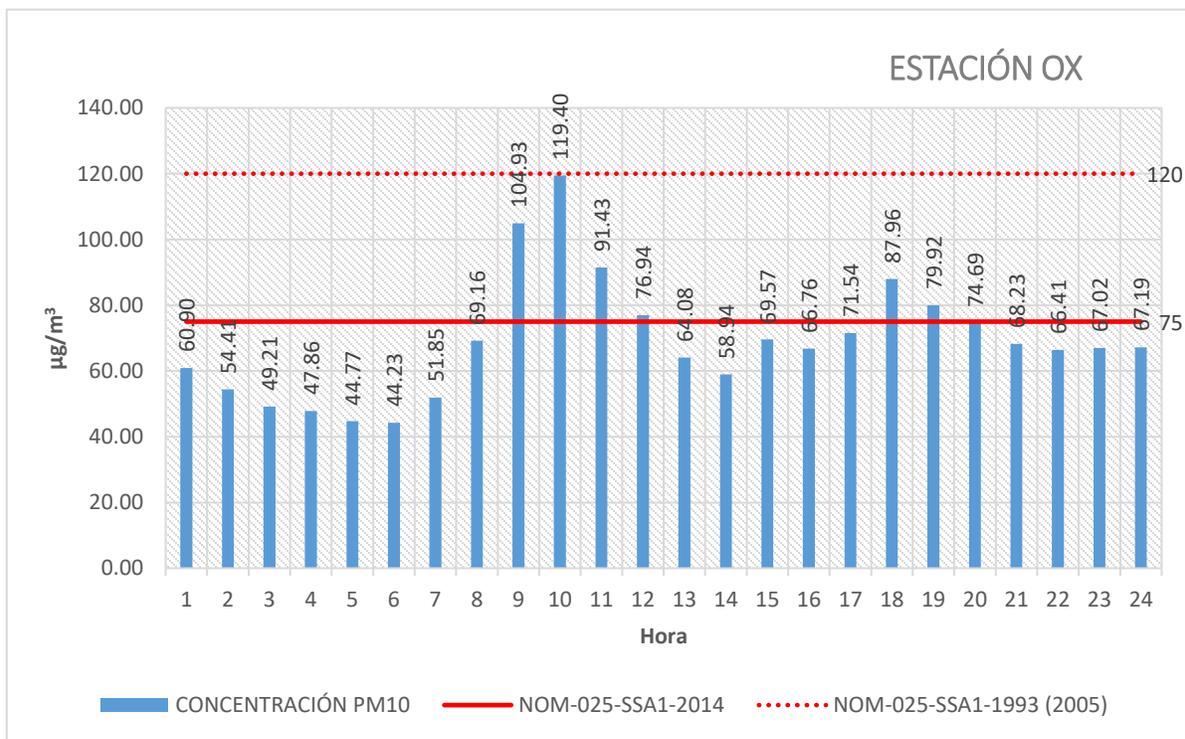
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 4 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 4 valores/hora, entre las 9:00 y 13:00 horas. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas con 101.76 µg/m³. Mientras que las concentraciones por debajo de la NOM se registraron entre la 1:00 y 7:00 horas. La concentración mínima se registró a las 14:00 horas con 59.07 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.1.5 Estación OX

La gráfica 5 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación OX respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 5 Concentraciones PM₁₀ por hora estación OX en el año 2011



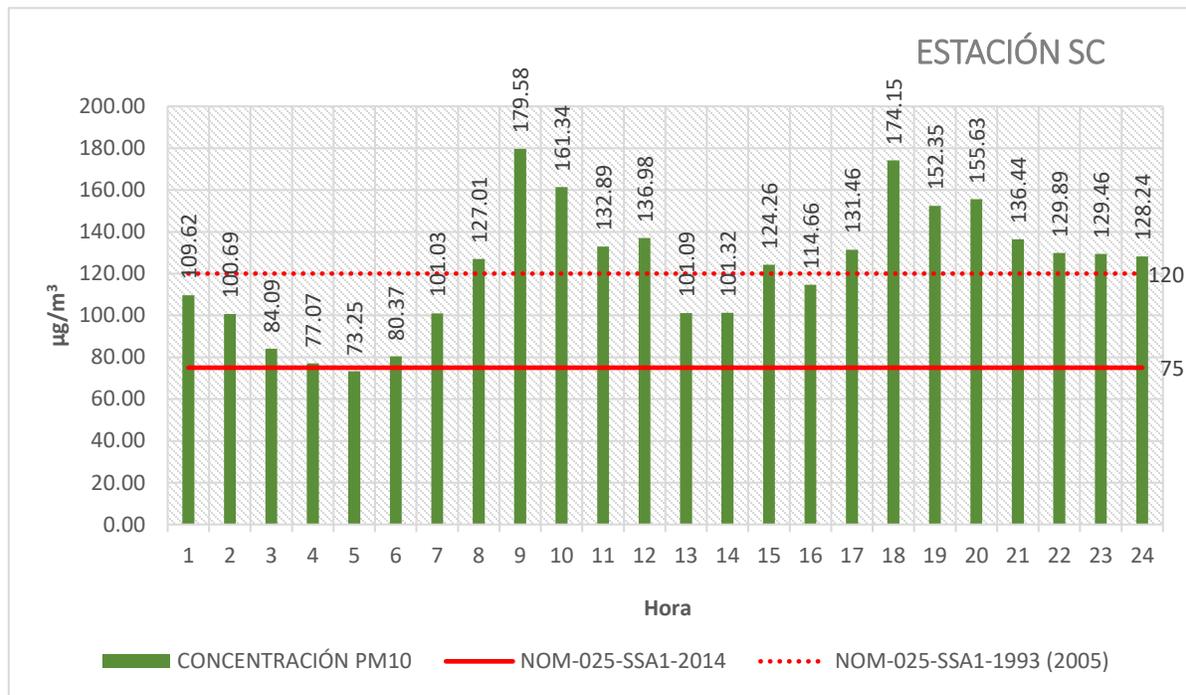
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 5 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 4 valores/hora, entre las 9:00 y 12:00 horas, y posteriormente entre las 18:00 y 19:00 horas. La máxima concentración de PM₁₀ se registró a las 10:00 horas con 119.40 µg/m³. Mientras que las concentraciones por debajo de la NOM se registraron de 2:00 a 6:00 horas. La mínima concentración se registró a las 5:00 horas con 44.23 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.1.6 Estación SC

La gráfica 6 representa el promedio de concentración por hora de PM_{10} en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SC respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-1993 (modificación 2005) y la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 6 Concentraciones PM_{10} por hora estación SC en el año 2011



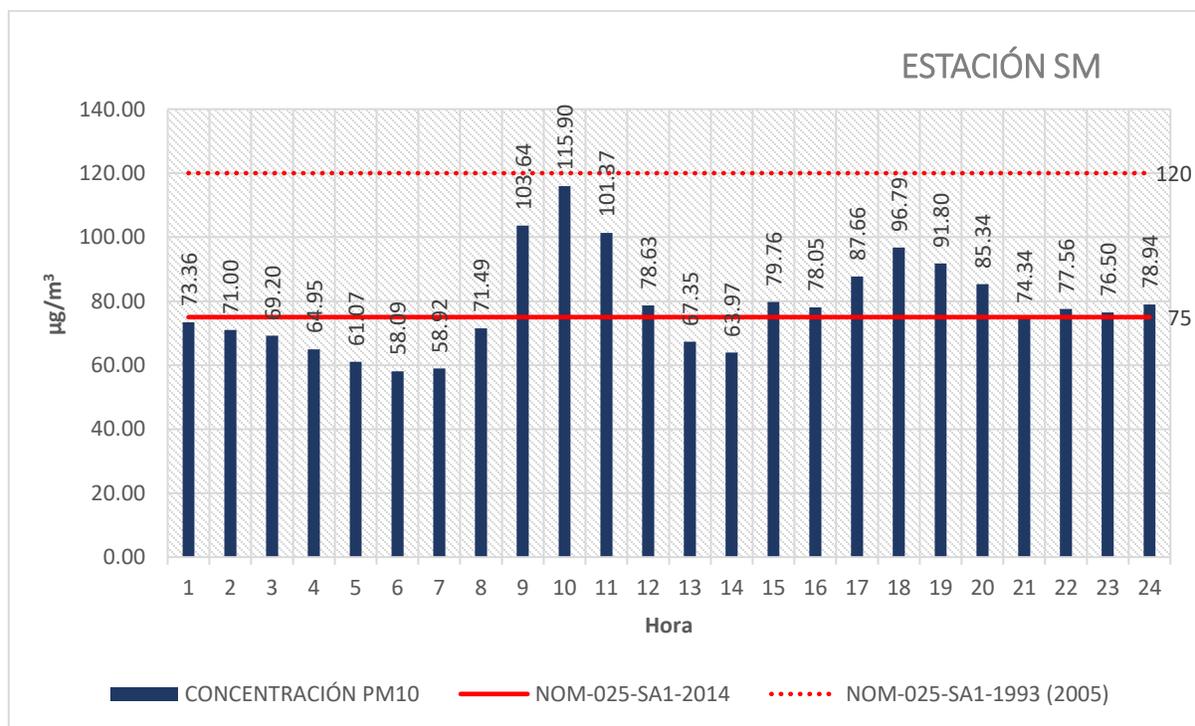
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 6 es notorio que las concentraciones de PM_{10} rebasaron el LMP establecido por la NOM con 23 valores/hora. Las máximas concentraciones de PM_{10} se registraron a las 9:00 y 18:00 horas con $179.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $174.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, sin embargo, durante las horas restantes las concentraciones se presentaron aún por encima de la NOM. La única hora que registró concentraciones por debajo de la NOM fue a las 5:00 horas con $73.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} .

4.1.1.7 Estación SM

La gráfica 7 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Mateo (SM) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SM respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 7 Concentraciones PM₁₀ por hora estación SM en el año 2011



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 7 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 4 valores/hora, entre las 9:00 y 12:00 horas; posteriormente con 4 valores/hora, entre 17:00 y 20:00 horas. La concentración máxima de PM₁₀ se registró a las 10:00 horas con 115.90 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00 horas, y entre 13:00 y 14:00 horas. La concentración mínima se registró a las 6:00 horas con un valor de 58.09 µg/m³ de PM₁₀.

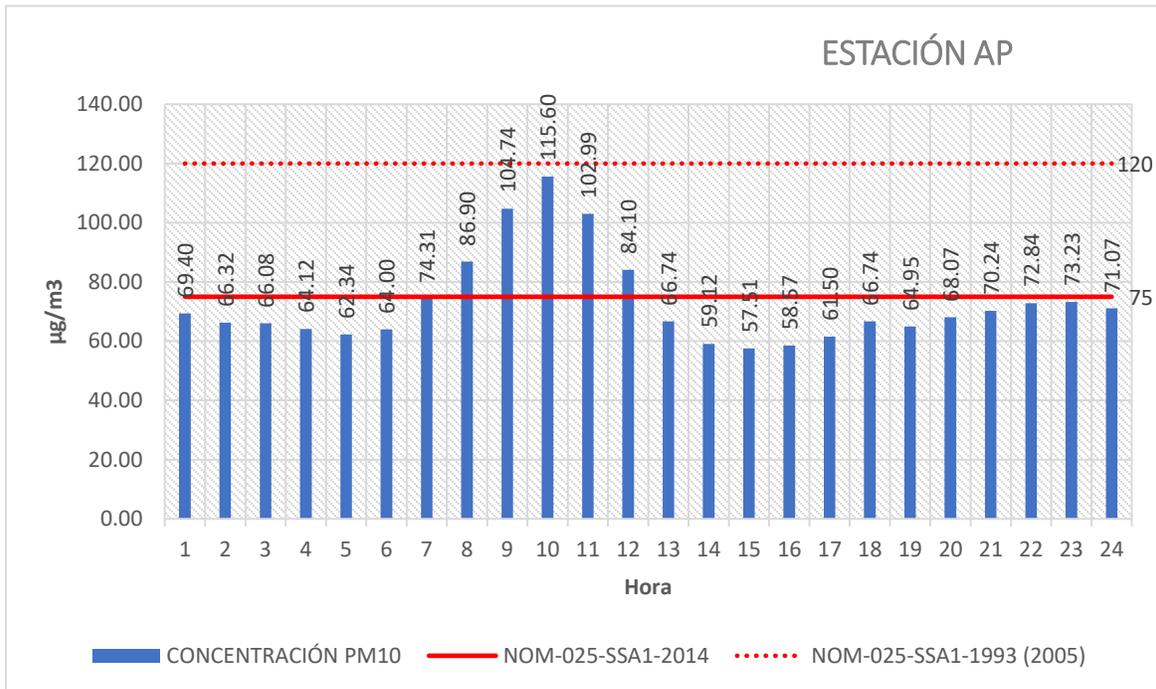
4.1.2 PM₁₀/hora por estación en el año 2012

Se presentan las gráficas de cada una de las estaciones de la RAMA-ZMVT, para observar el comportamiento de las concentraciones por hora de PM₁₀ durante las 24 horas en el año 2012, identificando las estaciones que registran las concentraciones fuera de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un Límite Máximo Permisible de 75 µg/m³ (promedio 24 horas) para la protección de la salud humana.

4.1.2.1 Estación AP

La gráfica 8 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación AP respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 8 Concentraciones PM₁₀ por hora estación AP en el año 2012



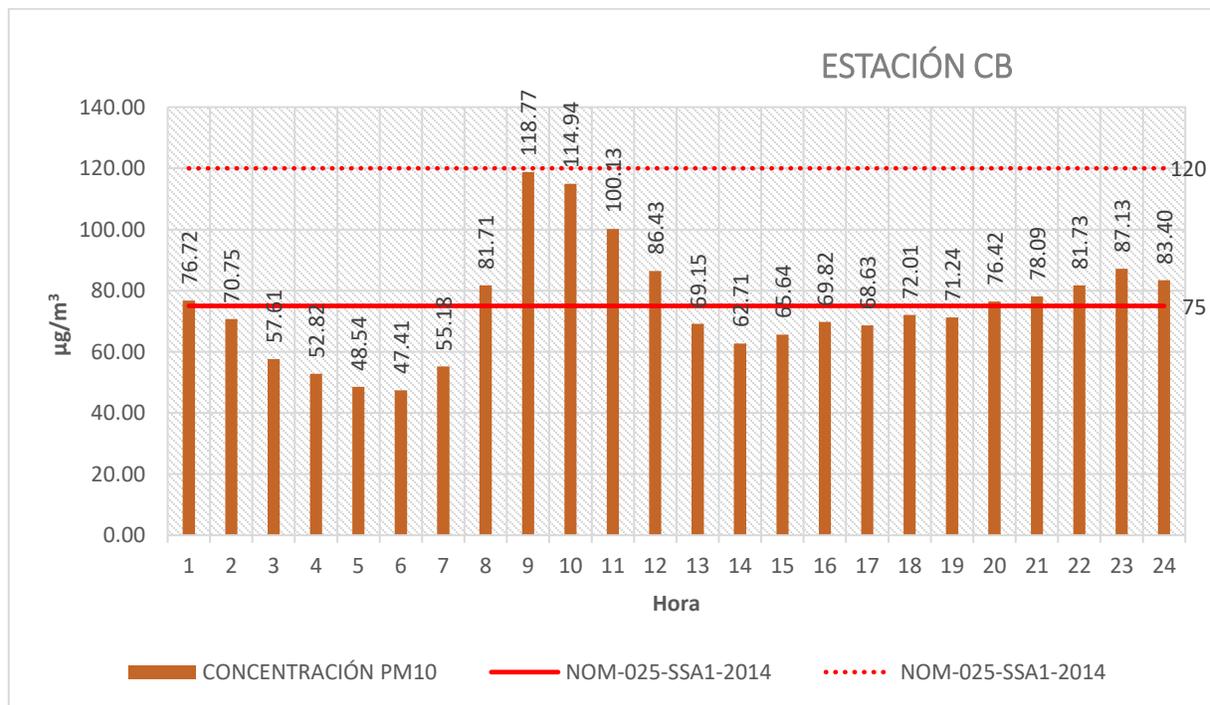
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 8 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 4 valores/hora, entre las 8:00 y 12:00 horas. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas con 115.60 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se presentaron en la madrugada, de 1:00 a 6:00 horas, y por la tarde, de 14:00 a 17:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se presentó a las 15:00 horas con un valor de 57.51 µg/m³.

4.1.2.2 Estación CB

La gráfica 9 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1 a la hora 24, respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 9 Promedio PM₁₀ por hora estación CB en el año 2012



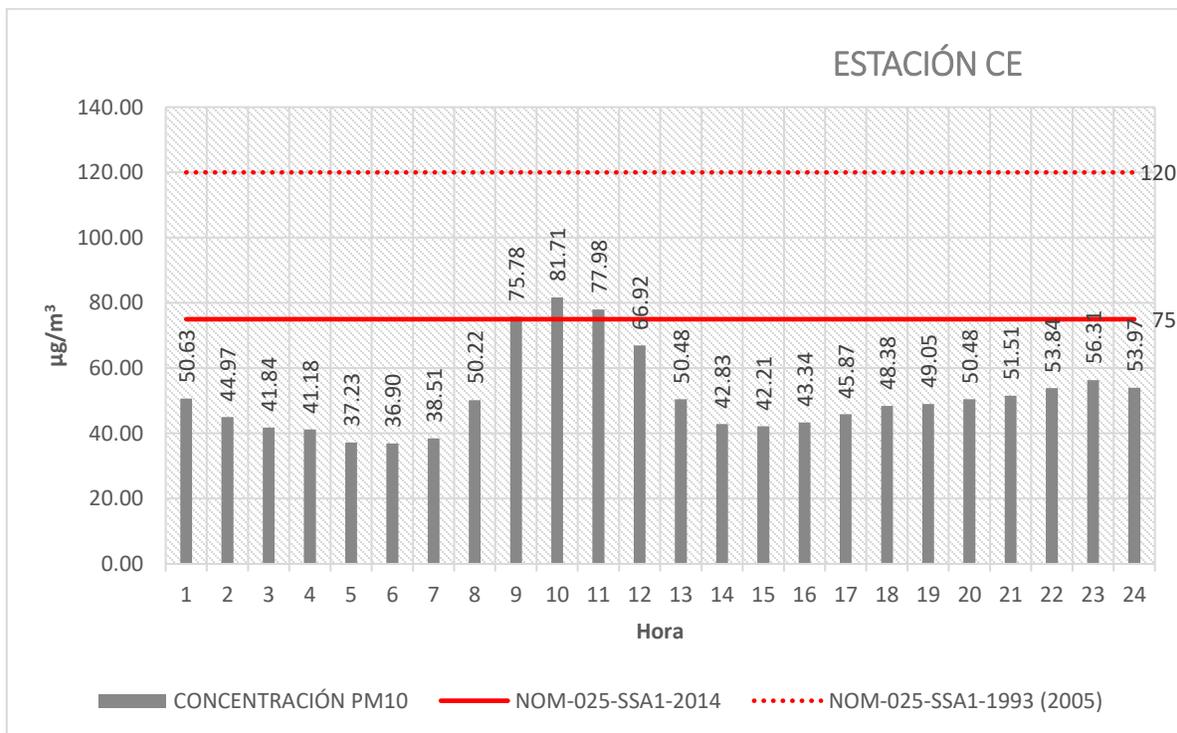
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 9 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasan el LMP establecido por la NOM con 4 valores/hora, entre las 8:00 y 12:00 horas. Posteriormente se registraron concentraciones fuera de la NOM, entre 20:00 y 24:00 horas. La máxima concentración de PM₁₀ se registró a las 9:00 con 118.77 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones de PM₁₀ por debajo de la NOM se registraron de 3:00 a 7:00 horas de la mañana, entre las cuales la concentración mínima se registró a las 6:00 horas con 47.41 µg/m³.

4.1.2.3 Estación CE

La gráfica 10 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Toluca Centro (CE) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones de PM₁₀ registrados desde la hora 1, a la hora 24 respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 10 Concentraciones PM₁₀ estación CE en el año 2012



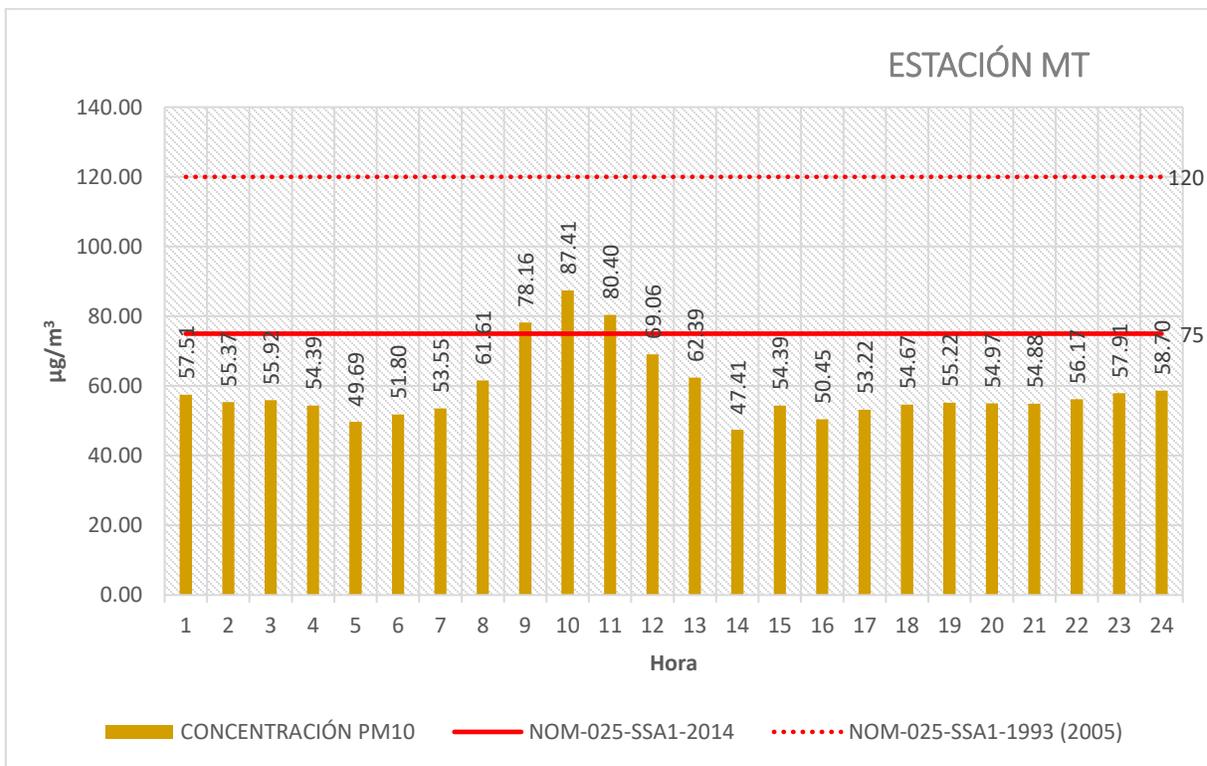
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 10 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasan el LMP establecido por la NOM con 3 valores/hora, de 9:00 a 11:00 horas de la mañana. La máxima concentración de PM₁₀ se registró a las 10:00 horas con 81.71 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00, entre las cuales la mínima concentración de PM₁₀ se registró a las 6:00 horas con 36.90 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.2.4 Estación MT

La gráfica 11 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Metepec (MT) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación MT durante el año 2012, respecto de la NOM-024-SSA1-2014.

Gráfica 11 Concentraciones PM₁₀ por hora estación MT en el año 2012



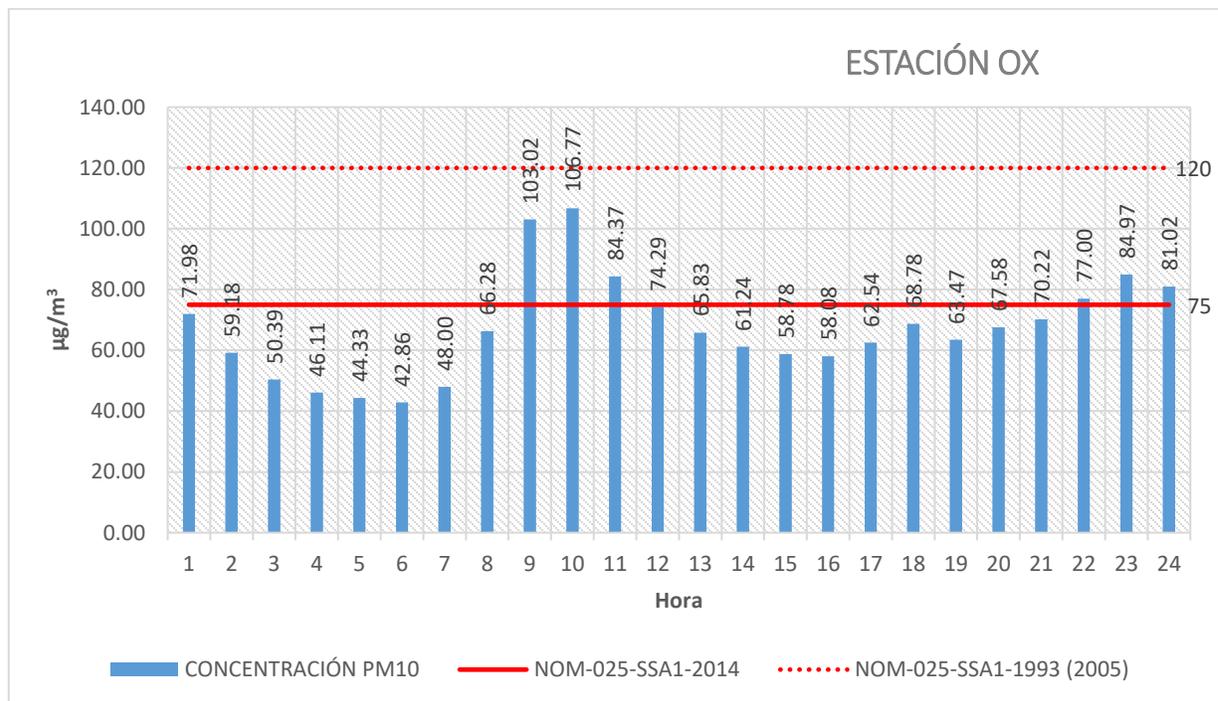
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 11 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasan el LMP establecido por la NOM con 3 valores/hora, de 9:00 a 11:00 horas de la mañana. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas 87.41 µg/m³. Por otro lado, la mínima concentración de PM₁₀ se presentó a las 14:00 horas con un valor de 47.41 µg/m³.

4.1.2.5 Estación OX

La gráfica 12 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación OX respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 12 Promedio horario de PM₁₀ en la estación OX en el año 2012



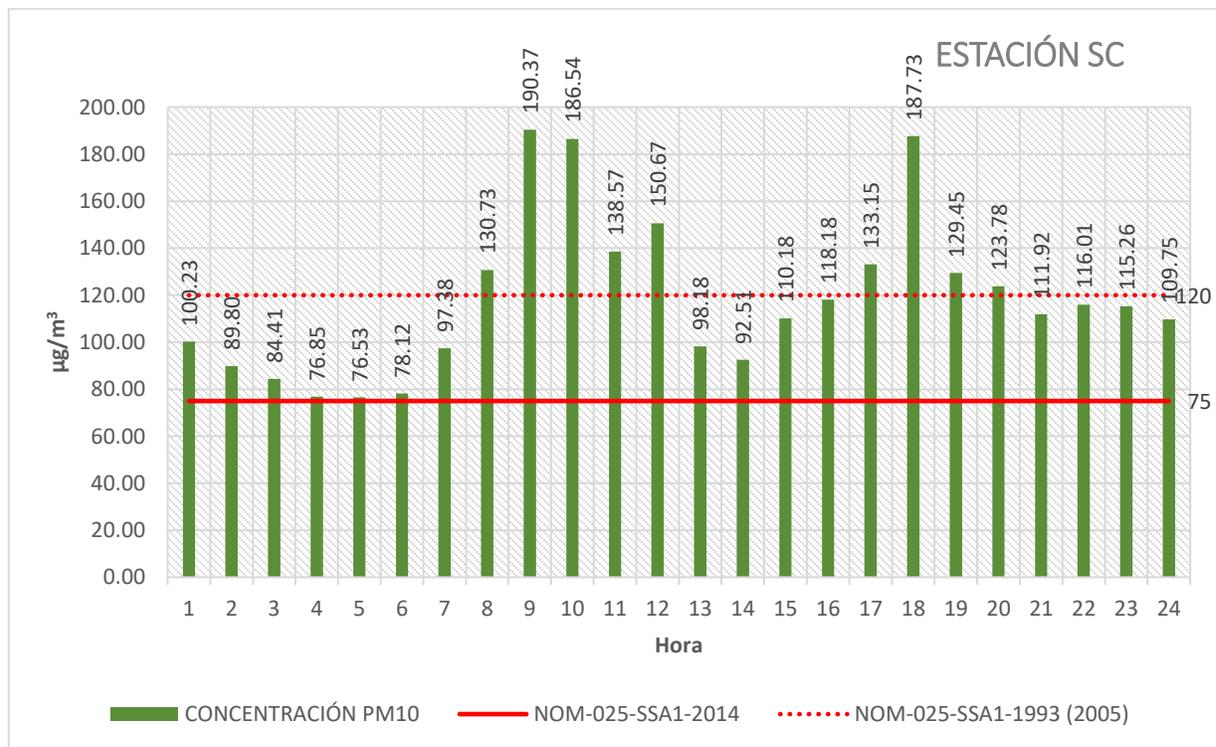
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 12 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 6 valores/hora, primero de 9:00 a 11:00 horas de la mañana y posteriormente de 22:00 a 24:00 horas. La concentración máxima de PM₁₀ se registró a las 10:00 horas con 106.77 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones de PM₁₀ por debajo de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00 horas; así como de 12:00 a 21:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se presentó a las 6:00 horas con 42.86 µg/m³.

4.1.2.6 Estación SC

La gráfica 13 representa el promedio de concentración por hora de PM_{10} en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SC durante el año 2012 respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 13 Concentraciones PM_{10} por hora estación SC en el año 2012



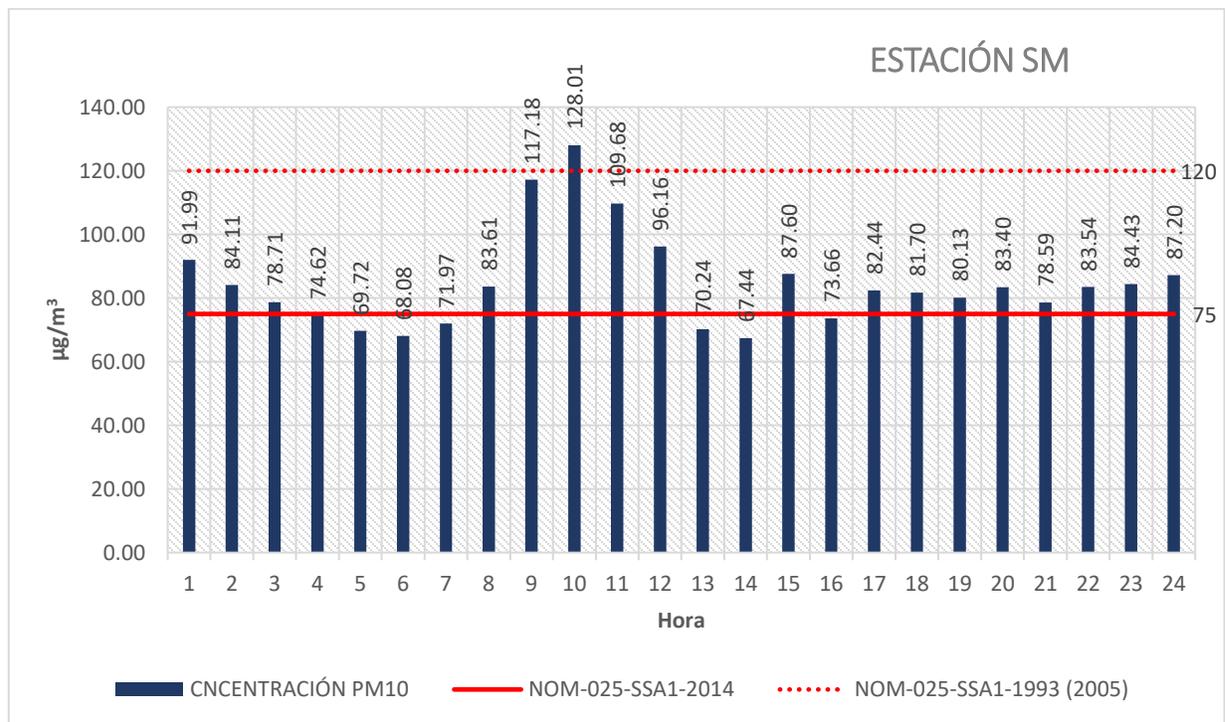
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 13 se observa que las concentraciones de PM_{10} en la estación SC, rebasaron el LMP establecido por la NOM con 24 valores/hora. Las concentraciones máximas se presentaron a las 9:00, 10:00 y 18:00 con $190.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $186.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $187.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ horas respectivamente. Las concentraciones más bajas se presentan de 4:00 a 6:00 horas, sin embargo, aún fuera de la NOM.

4.1.2.7. Estación SM

La gráfica 14 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Mateo (SM) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SM durante el año 2012, respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 14 Concentraciones PM₁₀ por hora estación SM en el año 2012



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 14 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 17 valores/hora, de 1:00 a 3:00 horas, de 8:00 a 12:00 horas y finalmente de 17:00 a 24:00 horas. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas con un valor de 128.01 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones de PM₁₀ por debajo de la NOM se registraron de 4:00 a 7:00; posteriormente a las 13:00, 14:00 y 16:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se presentó a las 14:00 horas con 67.44 µg/m³.

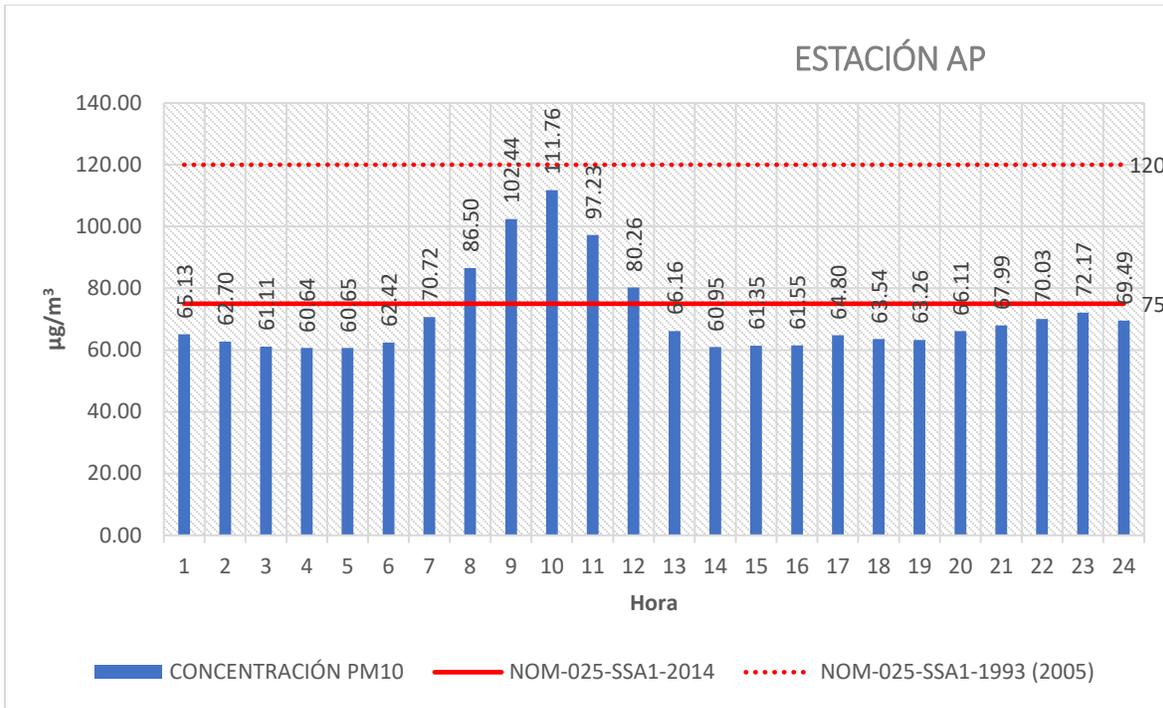
4.1.3 PM₁₀/hora por estación en el año 2013

Se presentan las gráficas de cada una de las estaciones de la RAMA-ZMVT, para observar el comportamiento de las concentraciones por hora de PM₁₀ durante las 24 horas en el año 2013, identificando las estaciones que registran las concentraciones fuera de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un Límite Máximo Permisible de 75 µg/m³ (promedio 24 horas) para la protección de la salud humana.

4.1.3.1 Estación AP

La gráfica 15 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación AP durante el año 2013, respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 15 Concentraciones PM₁₀ estación AP en el año 2013



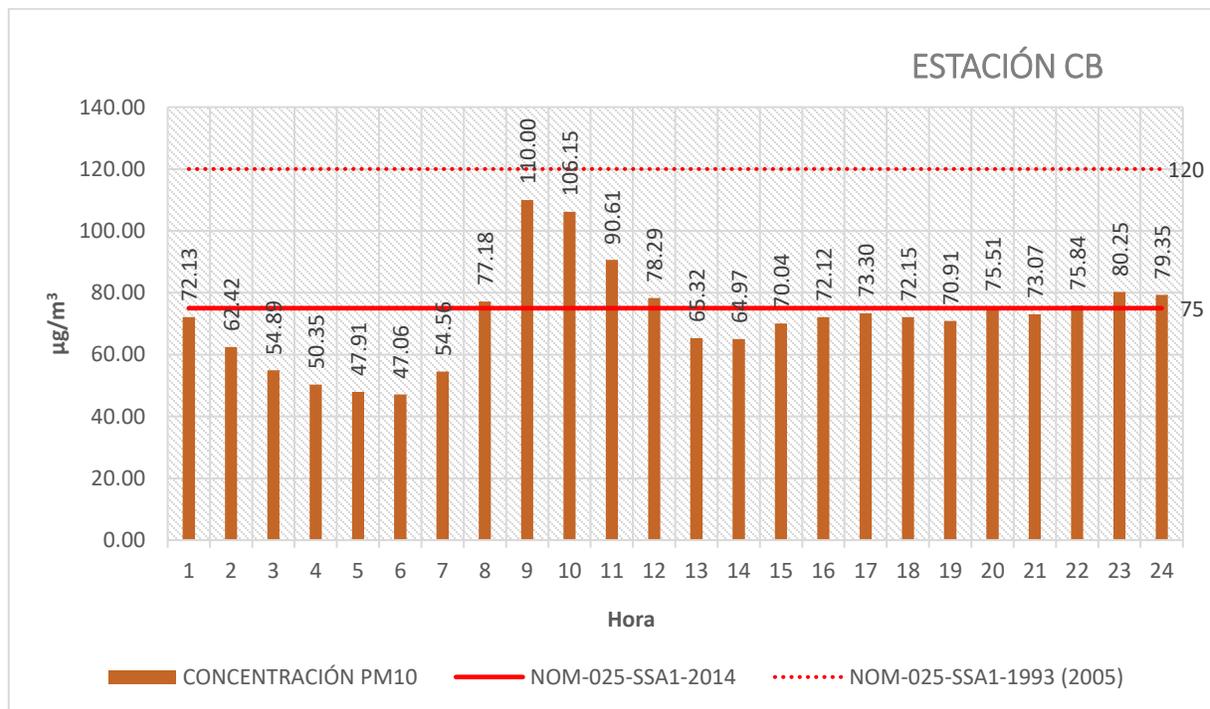
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 15 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP de la NOM con 5 valores/hora, de 8:00 a 12:00 horas. La concentración máxima de PM₁₀ se registró a las 10:00 horas con un valor de 111.76 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM, de 1:00 a 7:00 horas, y de 13:00 a 24:00 horas. La concentración mínima fue registrada las 4:00 horas con 60.64 µg/m³.

4.1.3.2 Estación CB

La gráfica 16 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CB durante el año 2013, respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 16 Concentración PM₁₀ estación CB en el año 2013



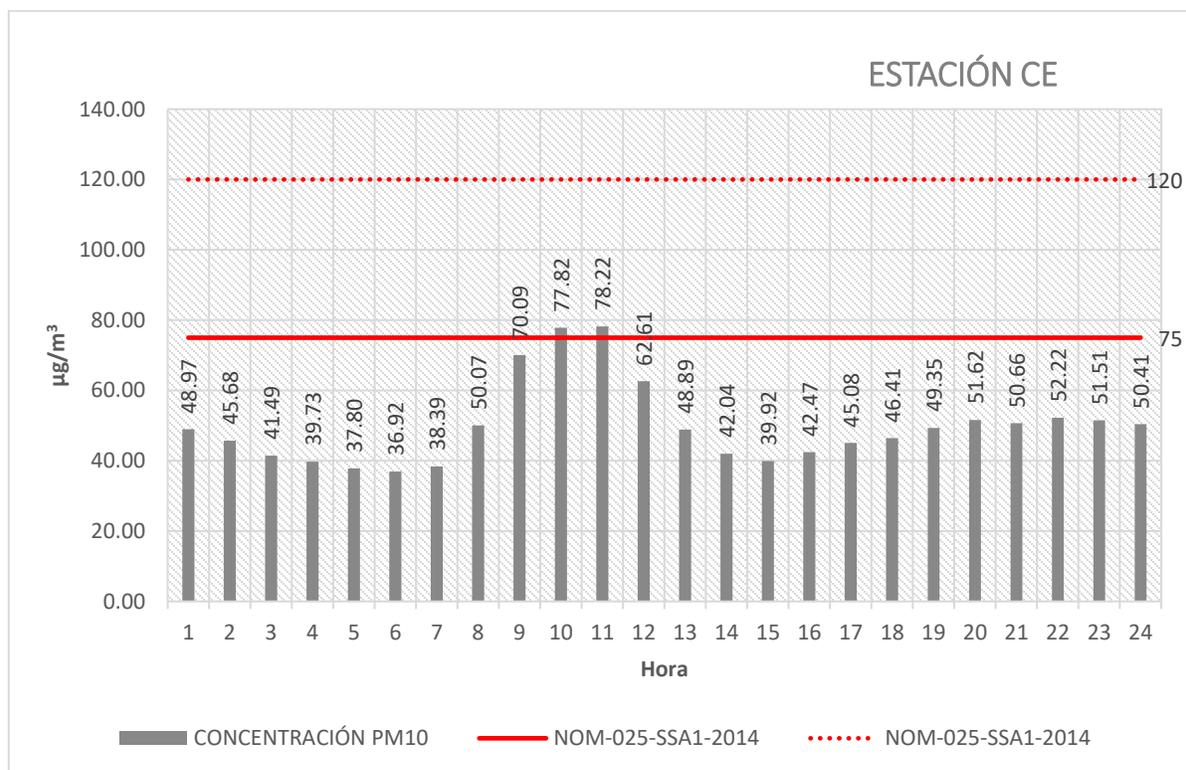
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 16 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP de la NOM con 5 valores/hora, de 8:00 a 12:00 horas. La concentración máxima de PM₁₀ se registró a las 9:00 horas con 110 µg/m³, seguido de 106.15 µg/m³ a las 10:00 horas. Por otro lado, las concentraciones de PM₁₀ por debajo de la NOM, se registraron de 1:00 a 7:00 horas y de 13:00 a 15:00 horas. La mínima concentración se registró a las 5:00 horas con 47.06 µg/m³

4.1.3.3 Estación CE

La gráfica 17 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Centro (CE) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CE durante el año 2013, respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 17 Concentraciones PM₁₀ por hora estación CE en el año 2013



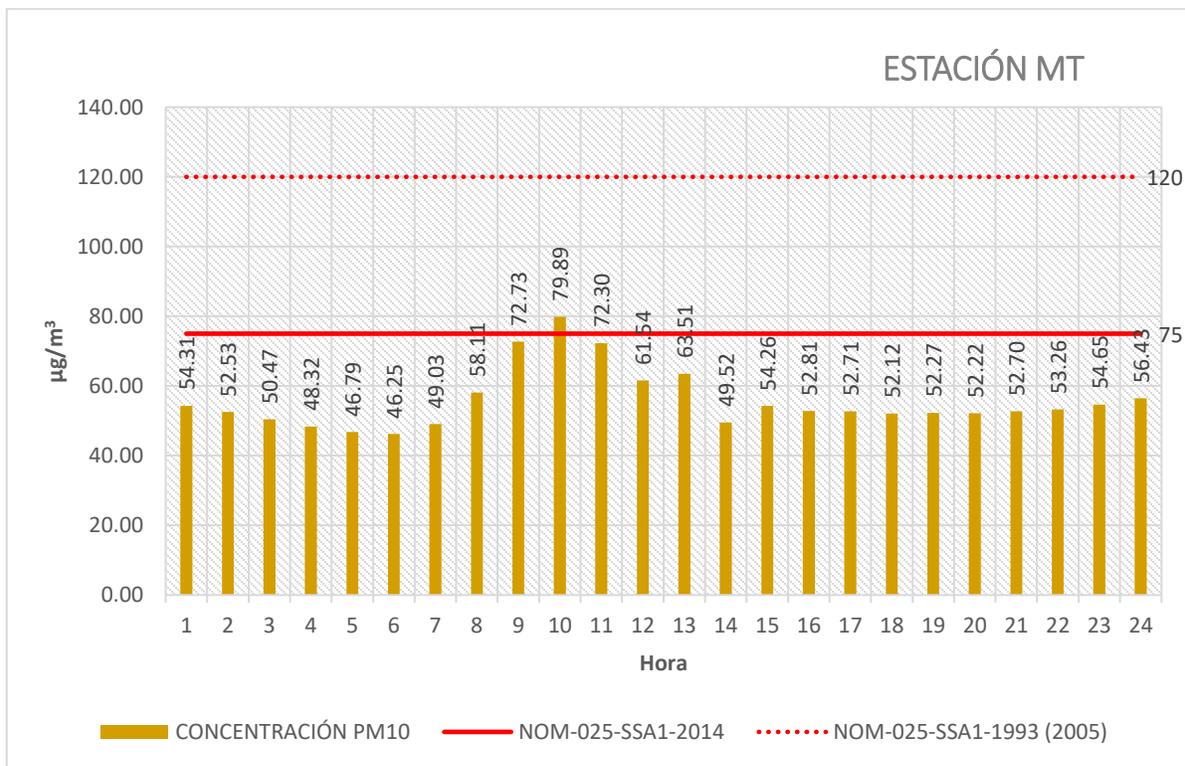
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 17 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron la NOM con 2 valores, entre 10:00 y 11:00 horas. La concentración máxima se registró a las 11:00 horas con 78.22 µg/m³. La estación CE registró concentraciones de PM₁₀ por debajo de la NOM de 1:00 a 9:00 horas; y más tarde de 12:00 a 24:00 horas. La concentración mínima se presentó a las 6:00 horas con un valor de 36.92 µg/m³.

4.1.3.4 Estación MT

La gráfica 18 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Metepec (MT) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones de PM₁₀ desde la hora 1, a la hora 24 en la estación AP durante el año 2013, respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 18 Concentraciones PM₁₀ estación MT en el año 2013



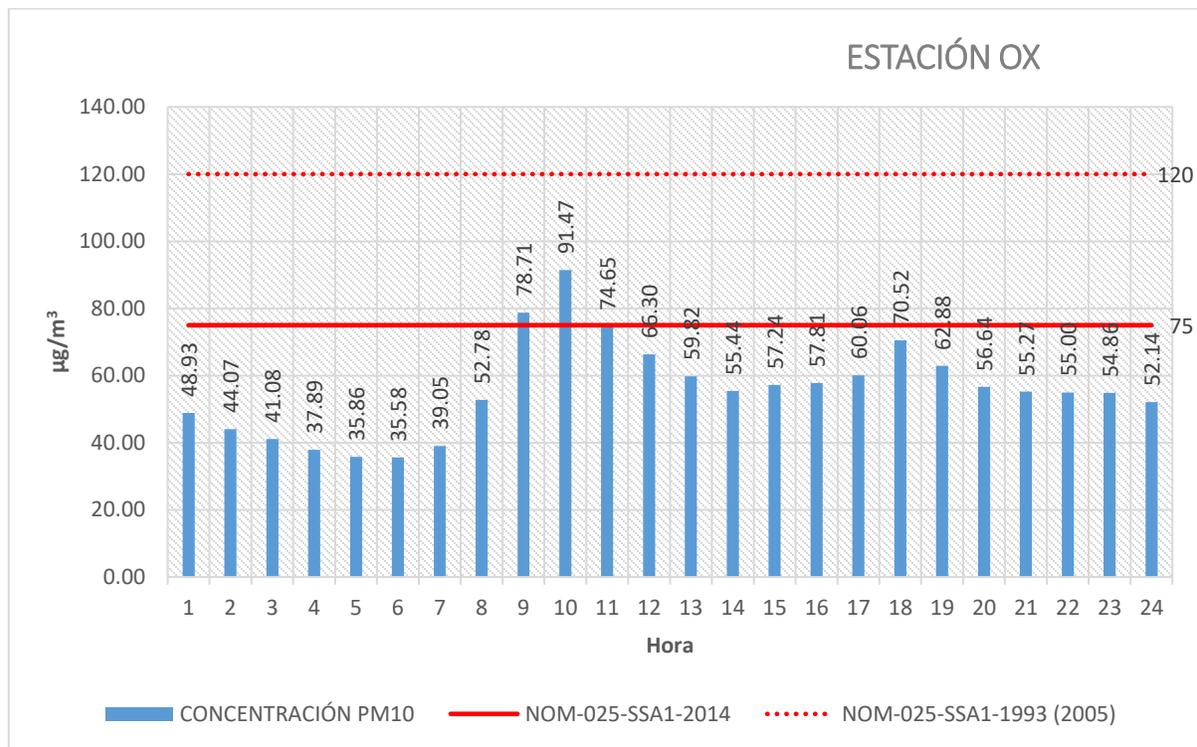
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 18 se observa que se registraron concentraciones que rebasaron el LMP de la NOM con 1 valor/hora, esto a las 10:00 horas y alcanzando la concentración máxima de 79.89 µg/m³ de PM₁₀. Durante las horas restantes las concentraciones disminuyeron y todas se encontraron por debajo del LMP de la NOM. La concentración mínima se registró a las 6:00 horas con 46.25 µg/m³.

5.1.3.5 Estación OX

La gráfica 19 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones de PM₁₀ desde la hora 1, a la hora 24 en la estación OX durante el año 2013, respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 19 Concentraciones PM₁₀ estación OX en el año 2013



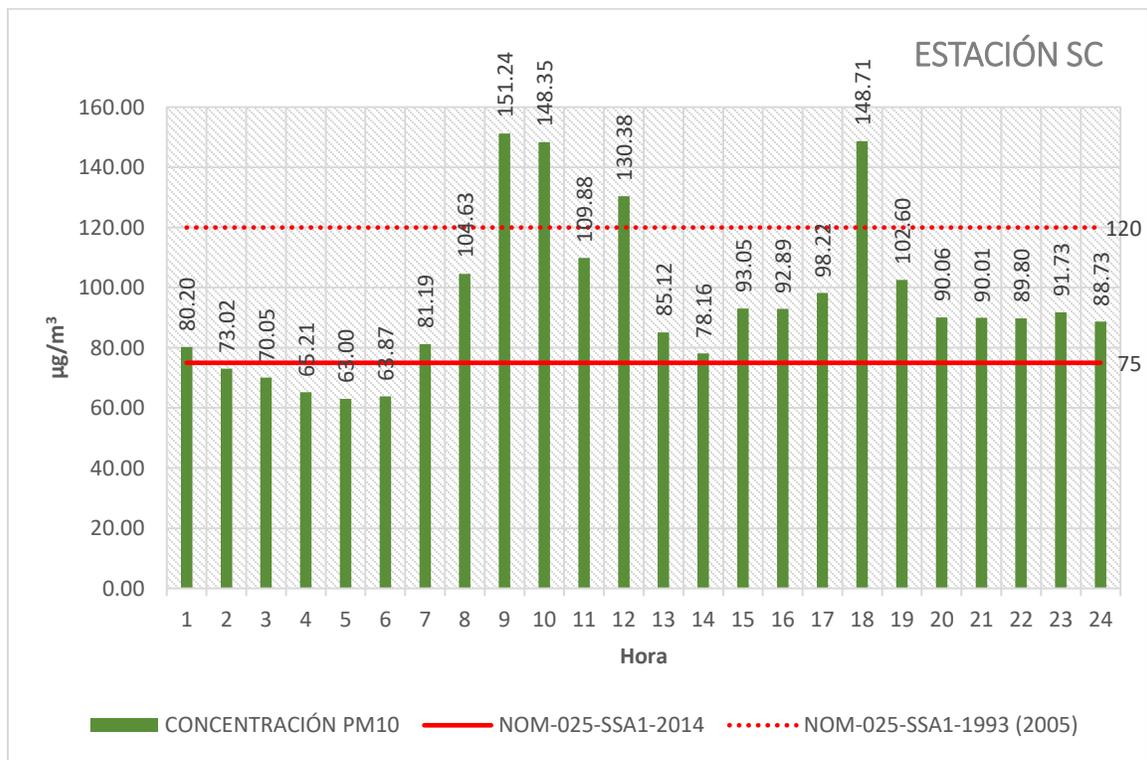
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 19 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP de la NOM con 2 valores/hora, entre 9:00 y 10:00 horas. A las 11:00 y 18:00 horas, las concentraciones estuvieron cercanas al límite de la NOM. La máxima concentración se registró a las 10:00 horas con 91.47 µg/m³ respectivamente. Por otro lado, las concentraciones por debajo del LMP de la NOM se presentaron de 1:00 a 8:00 horas y durante la tarde, de 12:00 a 24:00 horas. La concentración mínima se registró a las 6:00 horas con 35.58 µg/m³.

4.1.3.6 Estación SC

La gráfica 20 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SC durante el año 2013, respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 20 Concentración PM₁₀ estación SC en el año 2013



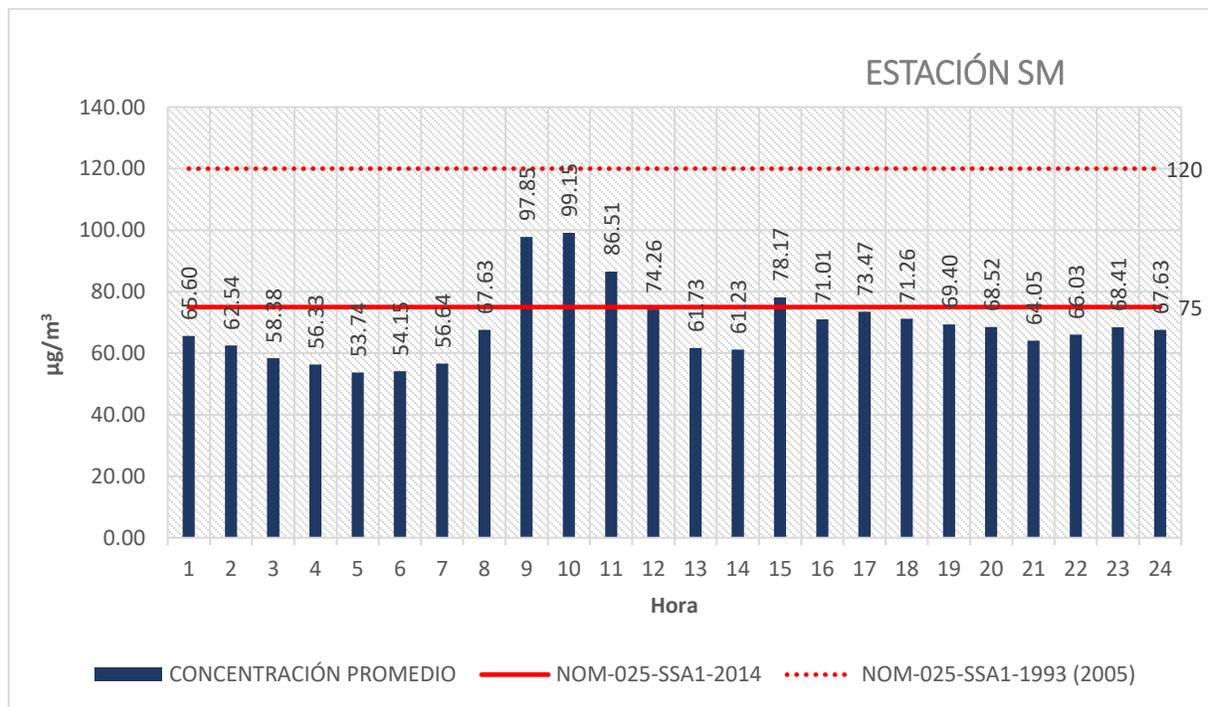
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 20 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP de la NOM con 19 valores/hora. A la 1:00 de la mañana; y posteriormente de las 7:00 a 24:00 horas. Es notorio que se registraron concentraciones elevadas durante la mayoría de las horas, pero resaltan las 9:00, 10:00 y 12:00 horas con 151.24 µg/m³, 148.35 µg/m³ y 130.38 µg/m³ respectivamente., Mientras que durante la tarde la máxima se registró a las 18:00 horas hasta con 148.71 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.3.6 Estación SM

La gráfica 21 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Mateo (SM) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SC durante el año 2013, respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 21 Concentración PM₁₀ estación SM en el año 2013



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 21 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM con 4 valores/hora, primero entre 9:00, 10:00 y 11:00 horas; y más tarde a las 15:00 horas. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas con 99.15 µg/m³. Las concentraciones por debajo de la NOM se registraron durante las primeras horas de la mañana, de 1:00 a 8:00 horas; mientras que, por la tarde, entre 13:00 y 14:00 horas y de las 16:00 hasta las 24:00 horas. La concentración mínima se presentó a las 5:00 horas con 53.74 µg/m³.

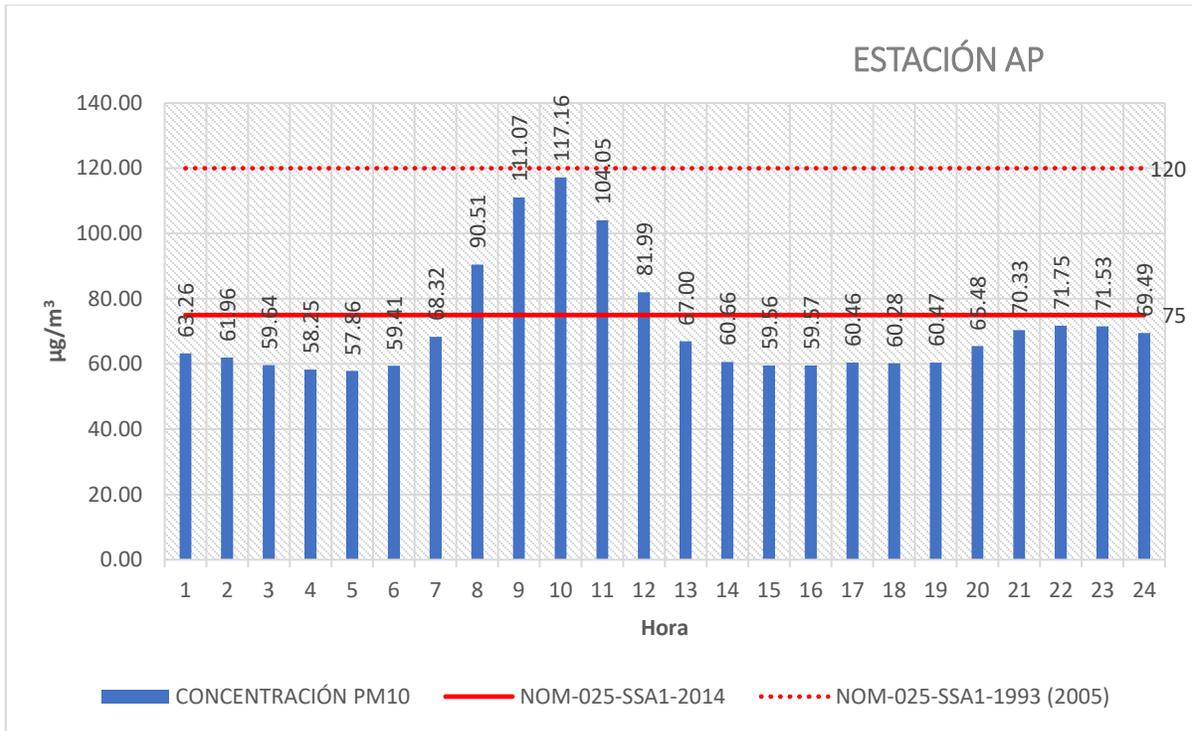
4.1.4 PM₁₀/hora por estación en el año 2014

Se presentan las gráficas de cada una de las estaciones de la RAMA-ZMVT, para observar el comportamiento de las concentraciones por hora de PM₁₀ durante las 24 horas en el año 2014, identificando las estaciones que registran las concentraciones fuera de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un Límite Máximo Permisible de 75 µg/m³ (promedio 24 horas) para la protección de la salud humana.

4.1.4.1 Estación AP

La gráfica 22 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación AP respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 22 Concentraciones PM₁₀ estación AP en el año 2014



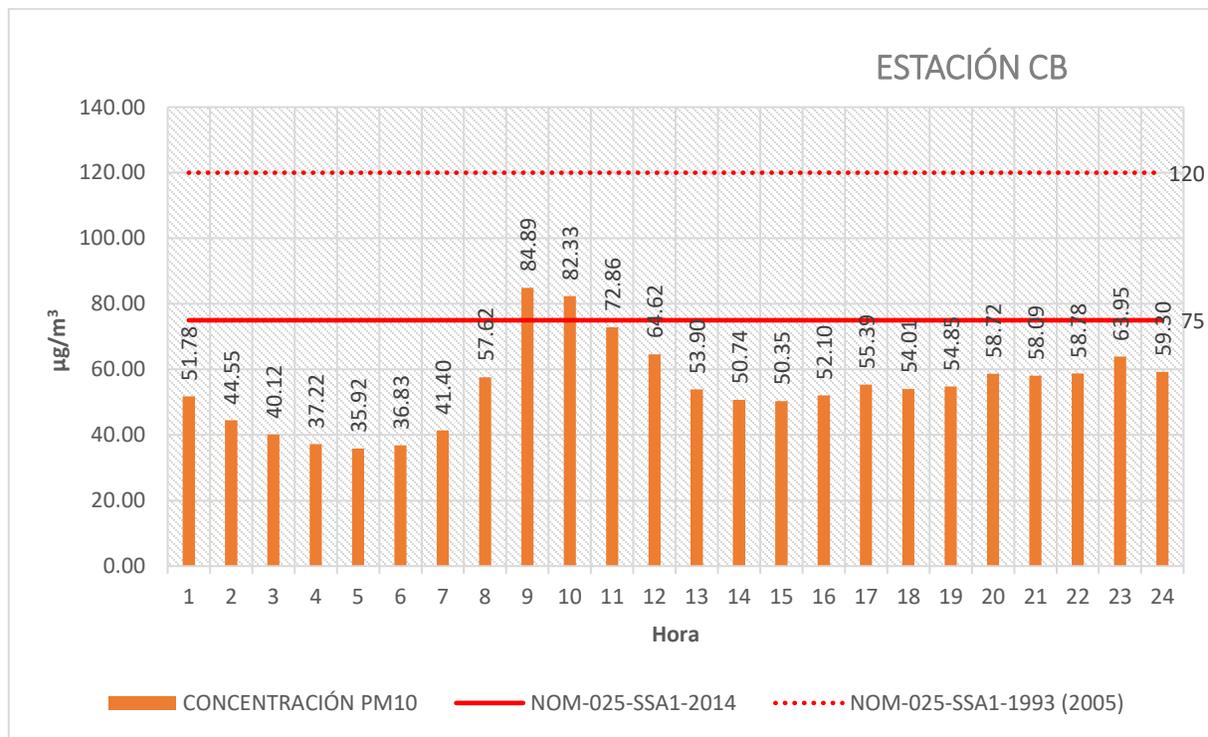
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 22 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido por la NOM con 5 valores/hora, estos de 8:00 a 12:00 horas. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas con 117.16 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 7:00 y de 13:00 a 24:00 horas. La concentración mínima se registró a las 5:00 horas con 57.86 µg/m³.

4.1.4.2 Estación CB

La gráfica 23 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CB respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 23 Concentraciones PM₁₀ estación CB en el año 2014



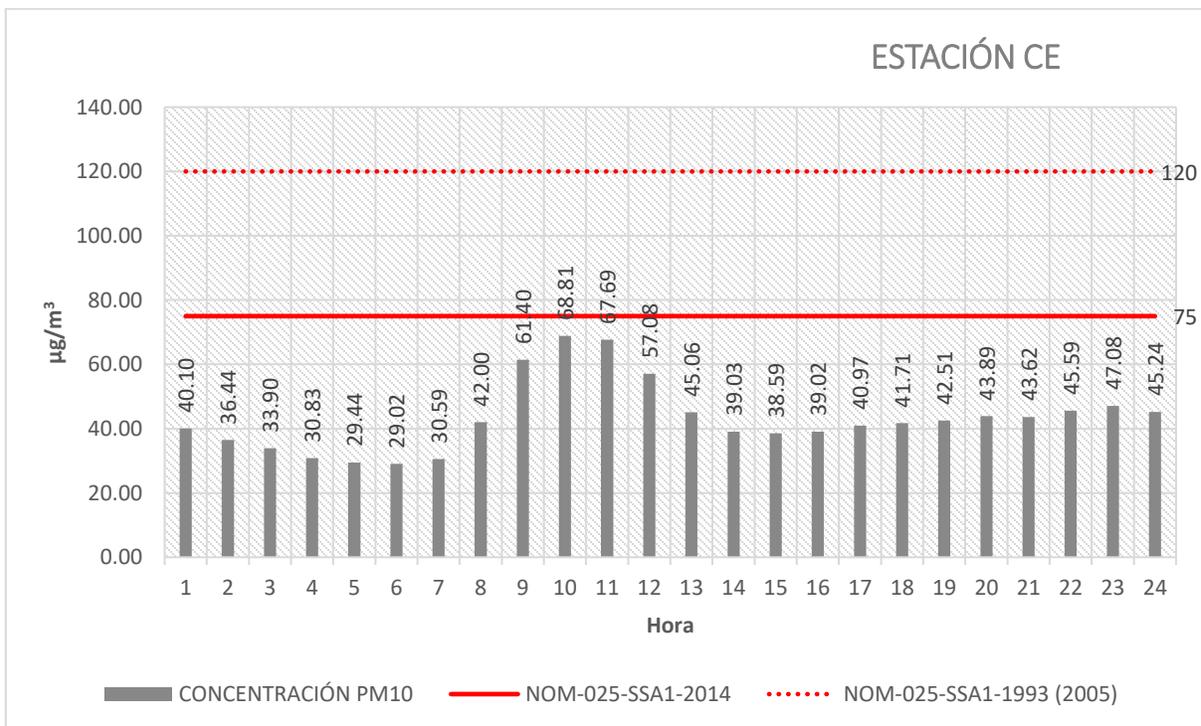
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 23 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP por la NOM con 2 valores/hora, entre las 9:00 y 10:00 horas. La concentración máxima se registró a las 9:00 horas con 84.89 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones de PM₁₀ por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00 y de 11:00 a 24:00 horas. La concentración mínima se presentó a las 5:00 horas con 35.92 µg/m³.

4.1.4.3 Estación CE

La gráfica 24 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Centro (CE) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CE, respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 24 Concentraciones PM₁₀ estación CE en el año 2014



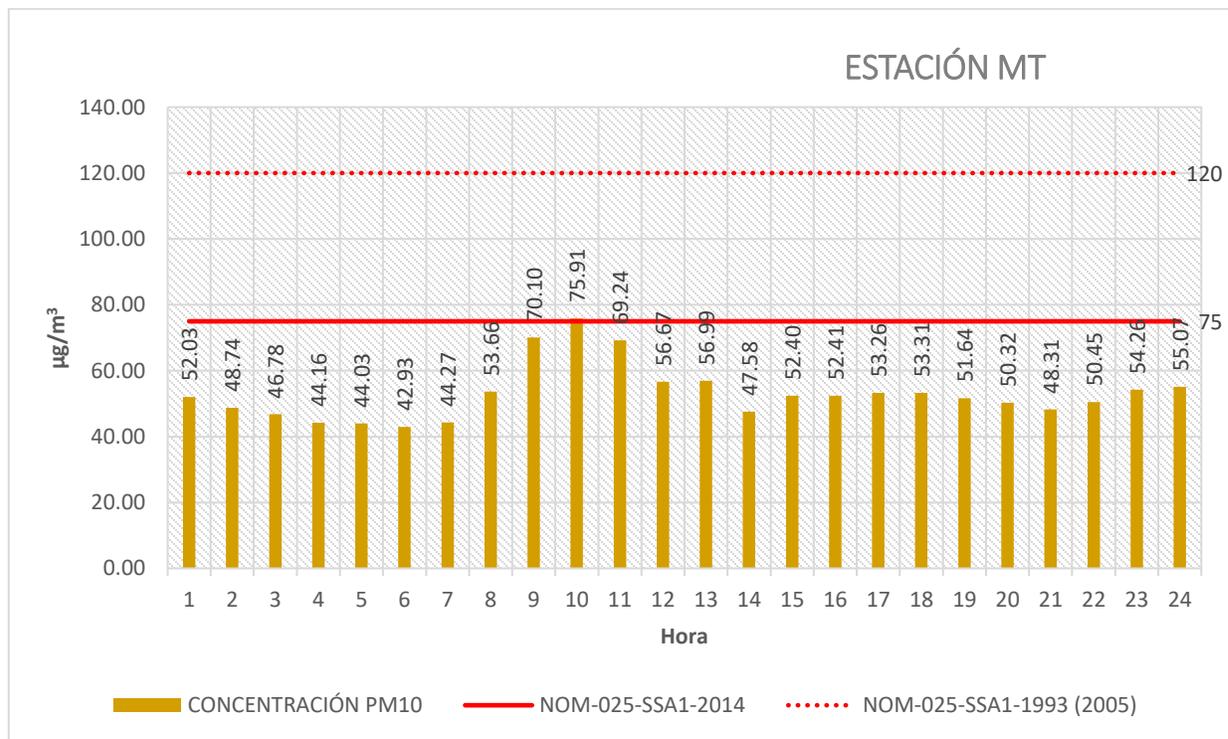
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 24 se observa que la estación CE no registró concentraciones que rebasaran el límite establecido por la NOM, sin embargo, las horas en las cuales se registraron concentraciones cercanas al límite de la NOM fueron a las 9:00, 10:00 y 11:00 horas con 61.40 µg/m³, 68.81 µg/m³ y 67.69 µg/m³.

4.1.4.4 Estación MT

La gráfica 25 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Metepec (MT) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones de PM₁₀ registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación MT respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 25 Concentraciones PM₁₀ estación MT en el año 2014



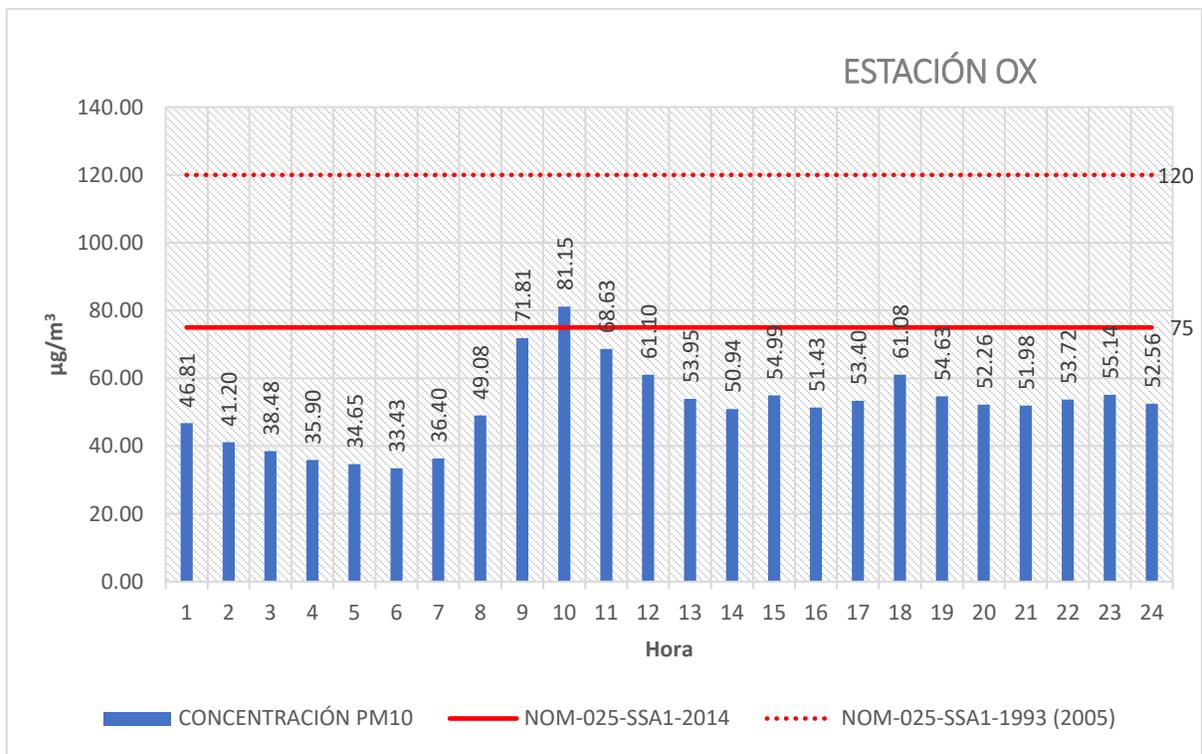
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 25 se observa que se registró una concentración que rebasó el LMP por la NOM a las 10:00 horas con una concentración máxima de 75.91 µg/m³, mientras que a las 9:00 y 11:00 horas se presentaron concentraciones cercanas al LMP. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00 horas, y de 12:00 a 24:00 horas. La concentración mínima se registró a las 6:00 horas con 42.93 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.4.5 Estación OX

La gráfica 26 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación OX respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 26 Concentraciones PM₁₀ estación OX en el año 2014



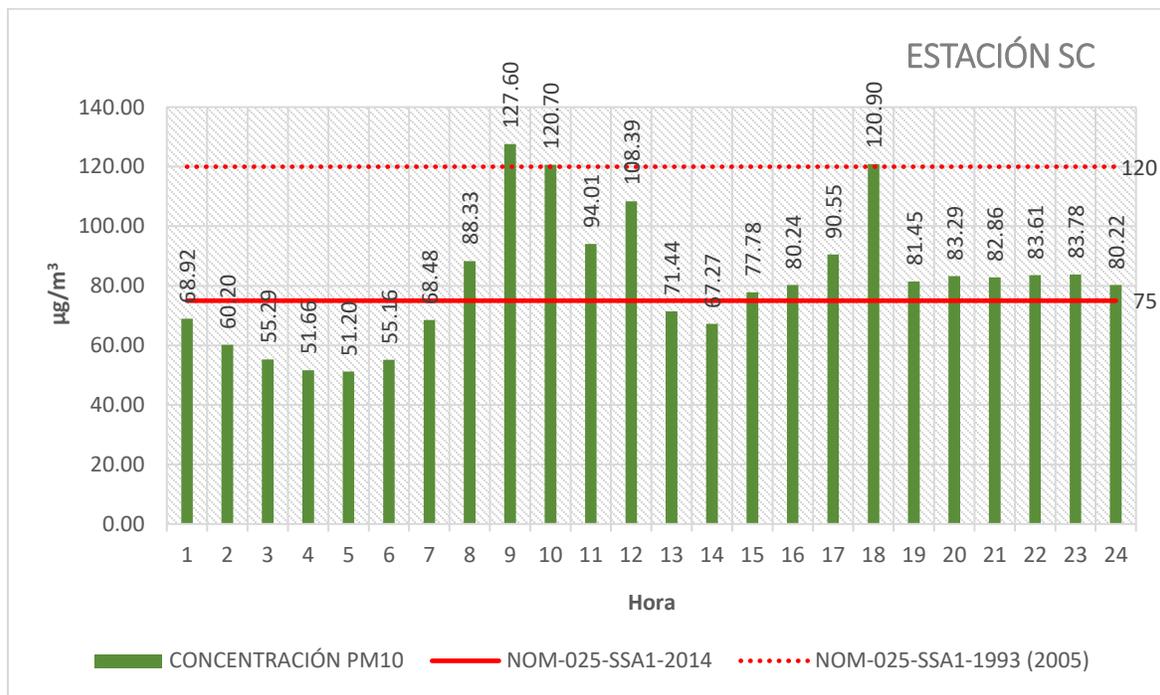
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 26 se observa que la concentración por encima del LMP establecido por la NOM-025-SSA1-2014 se registró a las 10:00 horas con una concentración máxima de 81.15 µg/m³. Respecto a las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 9:00 horas y posteriormente de 11:00 a 24:00 horas. La concentración mínima se registró a las 6:00 horas con 33.43 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.4.6 Estación SC

La gráfica 27 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SC respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 27 Concentraciones PM₁₀ estación SC en el año 2014



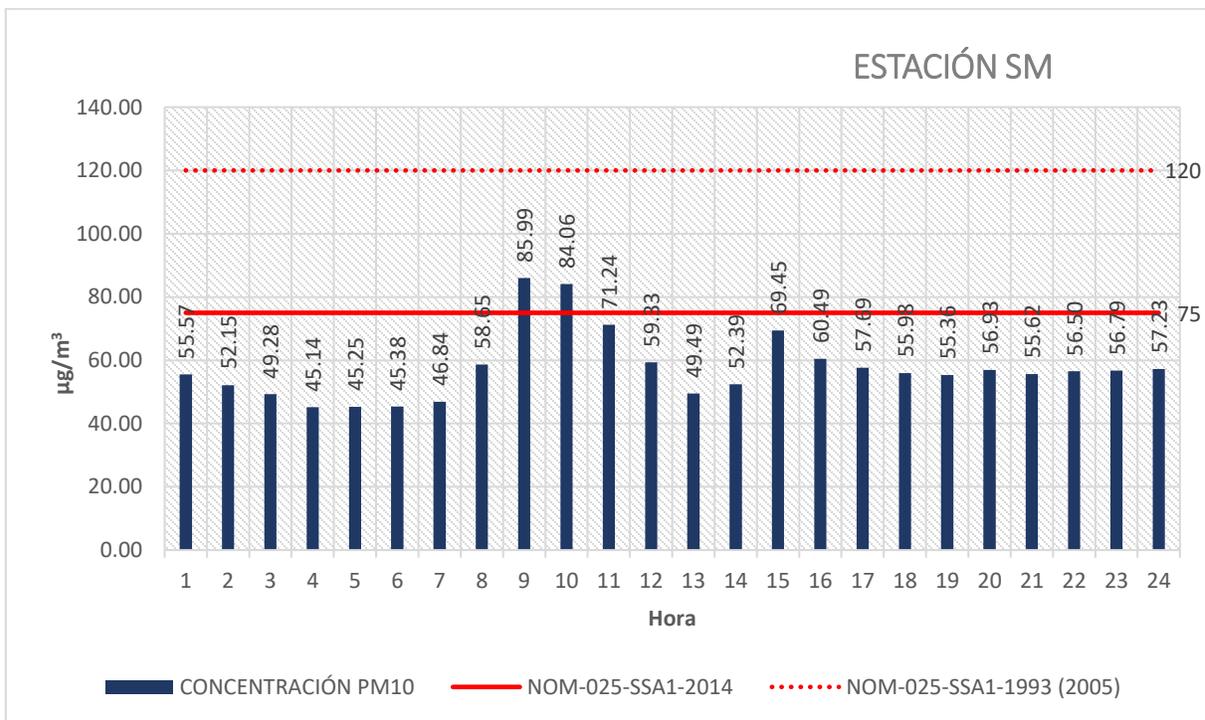
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 27 se observa que la estación SC registró concentraciones por encima del LMP con 15 valores/hora, primero de 8:00 a 12:00 horas y más tarde, de 15:00 a 24:00 horas. Las concentraciones máximas se registraron a las 9:00, 10:00 y 18:00 horas con 127.60 µg/m³, 120.70 µg/m³ y 120.90 µg/m³ respectivamente. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 7:00 horas y entre las 13:00 y 14:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 5:00 horas con 51.20 µg/m³.

4.1.4.7 Estación SM

La gráfica 28 representa el promedio de concentración por hora de PM_{10} en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SM respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 28 Concentraciones PM_{10} estación SM en el año 2014



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 28 se observa que las concentraciones de PM_{10} rebasaron el LMP establecido por la NOM con 2 valores/hora, a las 9:00 y 10:00 horas. La concentración máxima se registró a las 9:00 horas con $85.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Respecto a las concentraciones de PM_{10} por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00 horas y se presenta otro incremento a partir de las 11:00 hasta las 24:00 horas. La concentración mínima de PM_{10} se registró a las 4:00 horas con $45.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

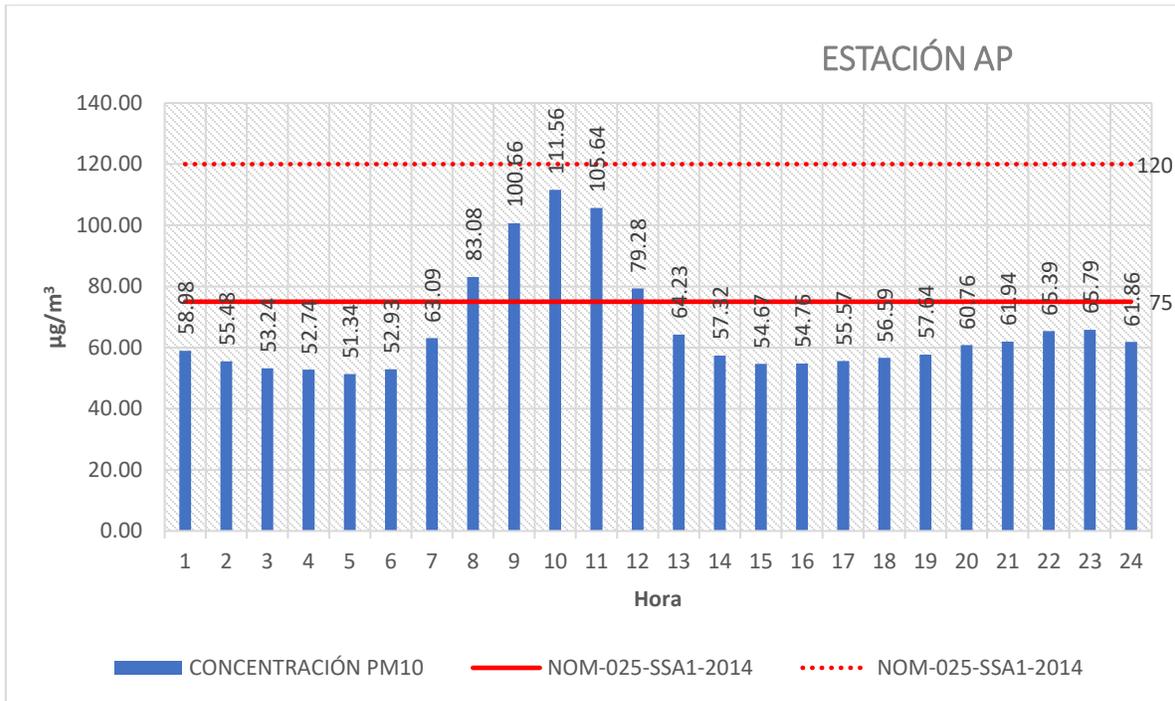
4.1.5 PM₁₀/hora por estación en el año 2015

Se presentan las gráficas de cada una de las estaciones de la RAMA-ZMVT, para observar el comportamiento de las concentraciones por hora de PM₁₀ durante las 24 horas en el año 2015, e identificar las estaciones que registran las concentraciones fuera de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un valor de 75 µg/m³ (24 horas) para la protección de la salud.

4.1.5.1 Estación AP

La gráfica 29 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación AP respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 29 Concentraciones PM₁₀ estación AP en el año 2015



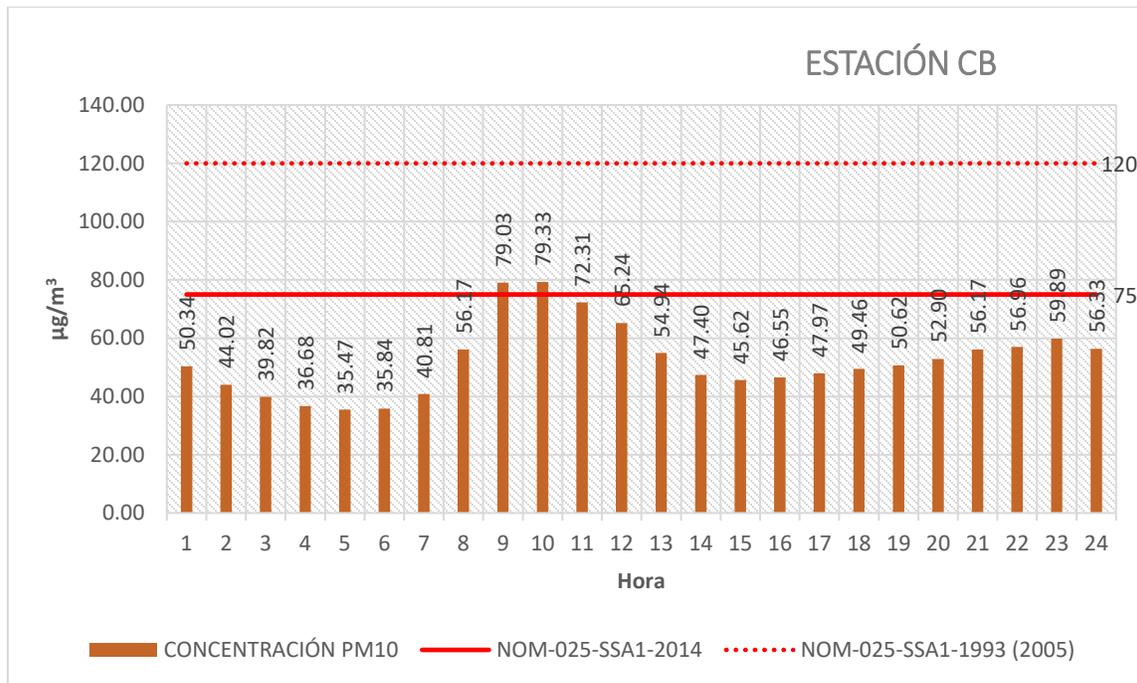
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 29 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 5 valores/hora, de 8:00 a 12:00 horas. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas con 111.56 µg/m³. Respecto a las concentraciones por debajo de la NOM, estas se registraron de 1:00 a 7:00 horas y posteriormente de 13:00 a 24:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 5:00 horas con 51.34 µg/m³.

4.1.5.2 Estación CB

La gráfica 30 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CB respecto a la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 30 Concentraciones PM₁₀ estación CB en el año 2015



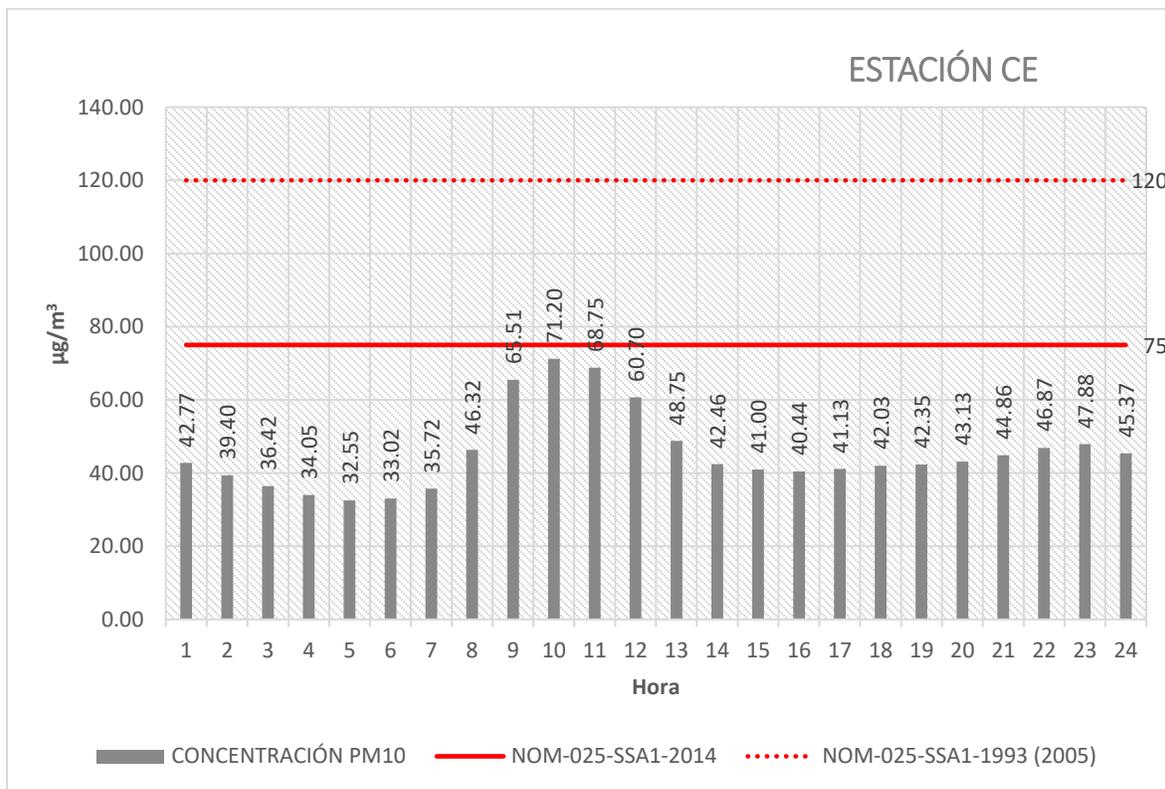
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 30 se observa que las concentraciones rebasan el LMP establecido por la NOM-025-SSA1-2014 con 2 valores/hora, entre las 9:00 y 10:00 horas. La concentración máxima de PM₁₀ se registró a las 10:00 horas con 79.33 µg/m³. Respecto a las concentraciones por debajo del límite de la NOM estas se registraron de 1:00 a 8:00 horas y posteriormente a partir de las 11:00 hasta las 24:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 5:00 horas con un valor de 35.47 µg/m³.

4.1.5.3. Estación CE

La gráfica 31 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Centro (CE) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CE respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 31 Concentraciones PM₁₀ estación CE en el año 2015



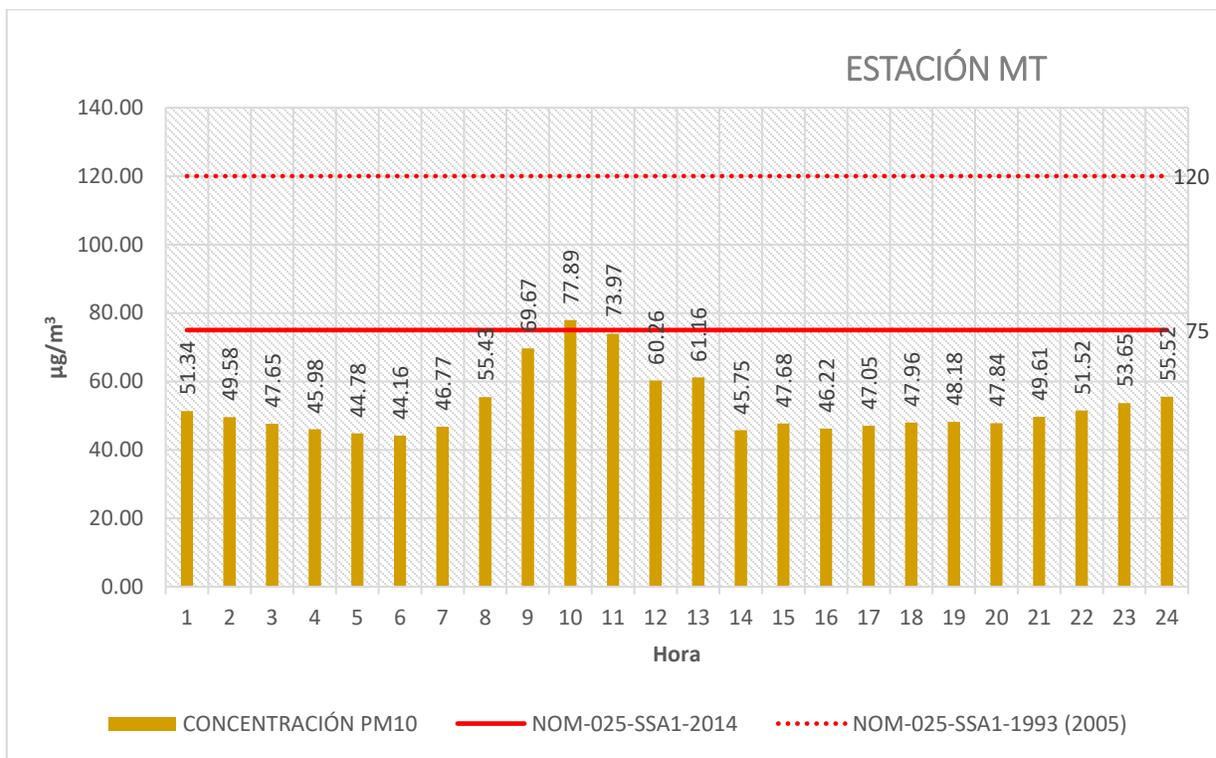
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 31 se observa que no se registraron concentraciones por encima del LMP establecido por la NOM-025-SSA1-2014, sin embargo, a las 10:00 horas se registró una concentración de 71.20 µg/m³ de PM₁₀ cercana a la NOM. La mínima concentración se registró a las 5:00 horas con 32.55 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.5.4. Estación MT

La gráfica 32 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Metepec (MT) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación MT respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 32 Concentraciones PM₁₀ estación MT en el año 2015



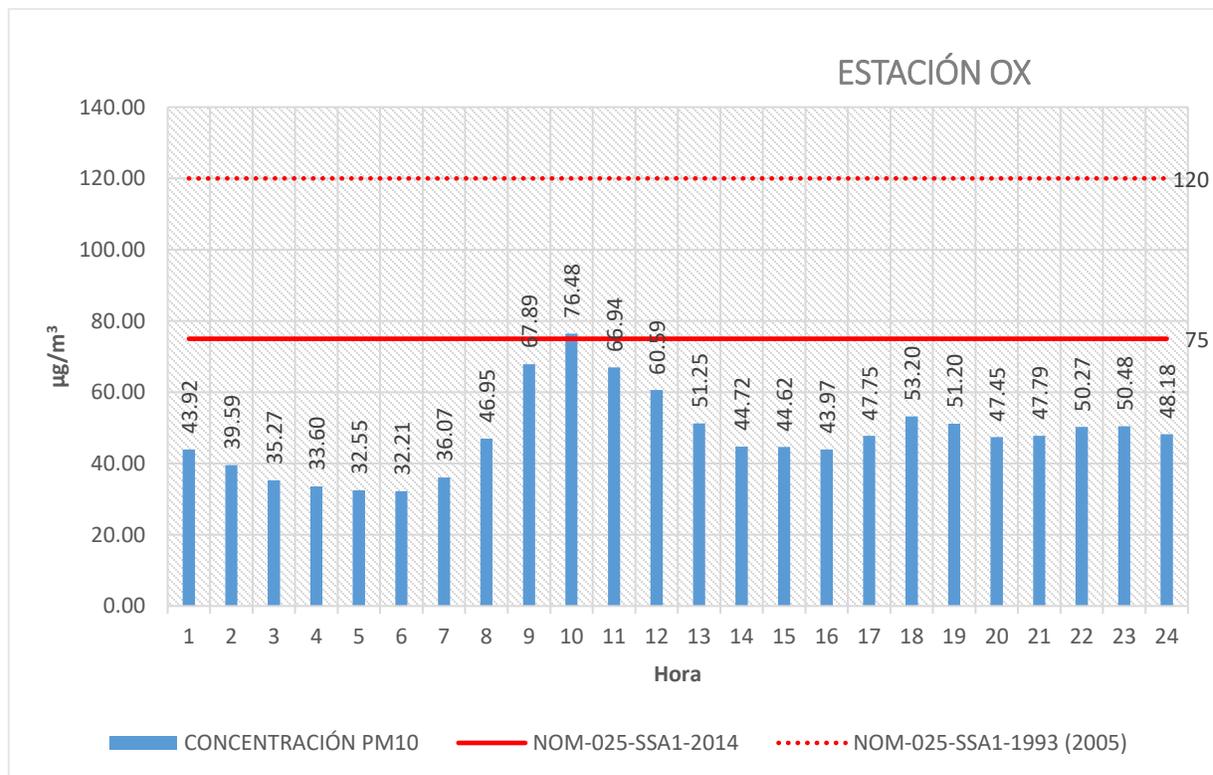
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 32 se observa que las concentraciones rebasan la NOM-025-SSA1-2014 a las 10:00 horas con 77.89 µg/m³. Las horas restantes se mantuvieron por debajo de la NOM. La concentración mínima de PM₁₀ se presentó a las 6:00 horas con 44.16 µg/m³.

4.1.5.5. Estación OX

La gráfica 33 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones de PM₁₀ registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación OX respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 33 Concentraciones PM₁₀ estación OX en el año 2015



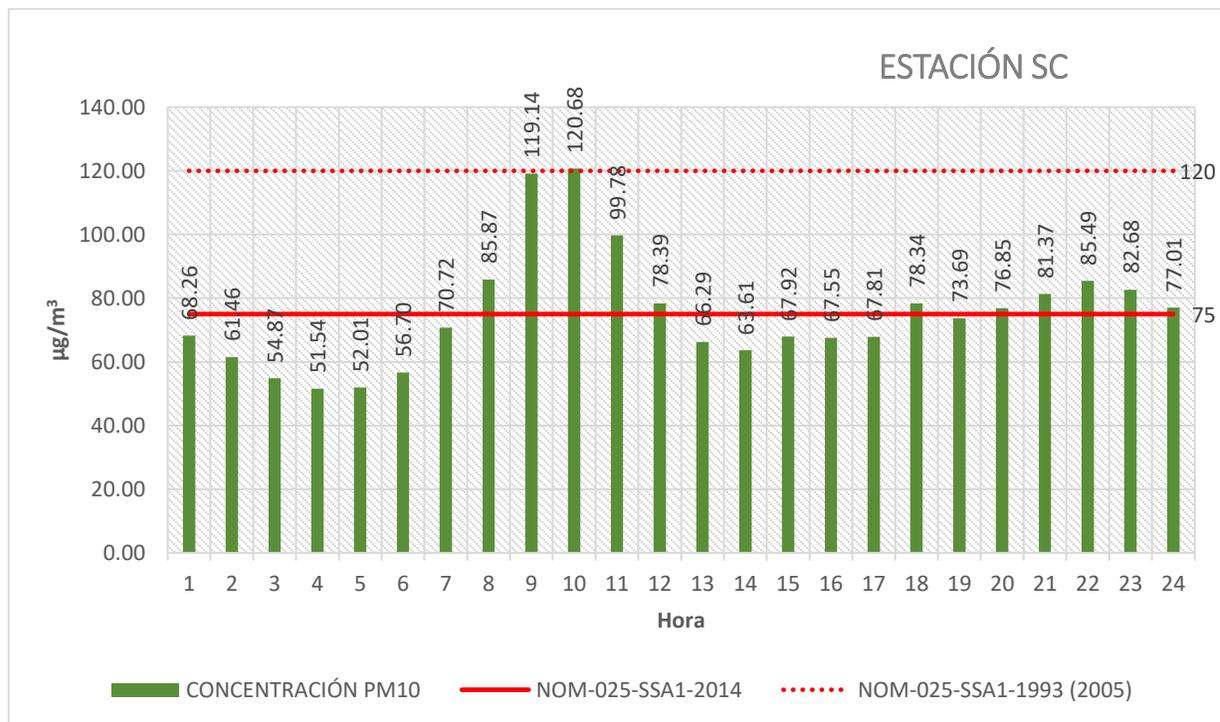
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 33 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasan el LMP establecido en la NOM-025-SSA1-2014 a las 10:00 horas con 76.48 µg/m³. En lo que se refiere a las concentraciones de PM₁₀ por debajo de la NOM estas se registraron de 1:00 a 9:00 horas y de 11:00 a 24:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 6:00 horas con 32.21 µg/m³.

4.1.5.6. Estación SC

La gráfica 34 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones de PM₁₀ registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SC respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 34 Concentraciones promedio PM₁₀ estación SC en el año 2015



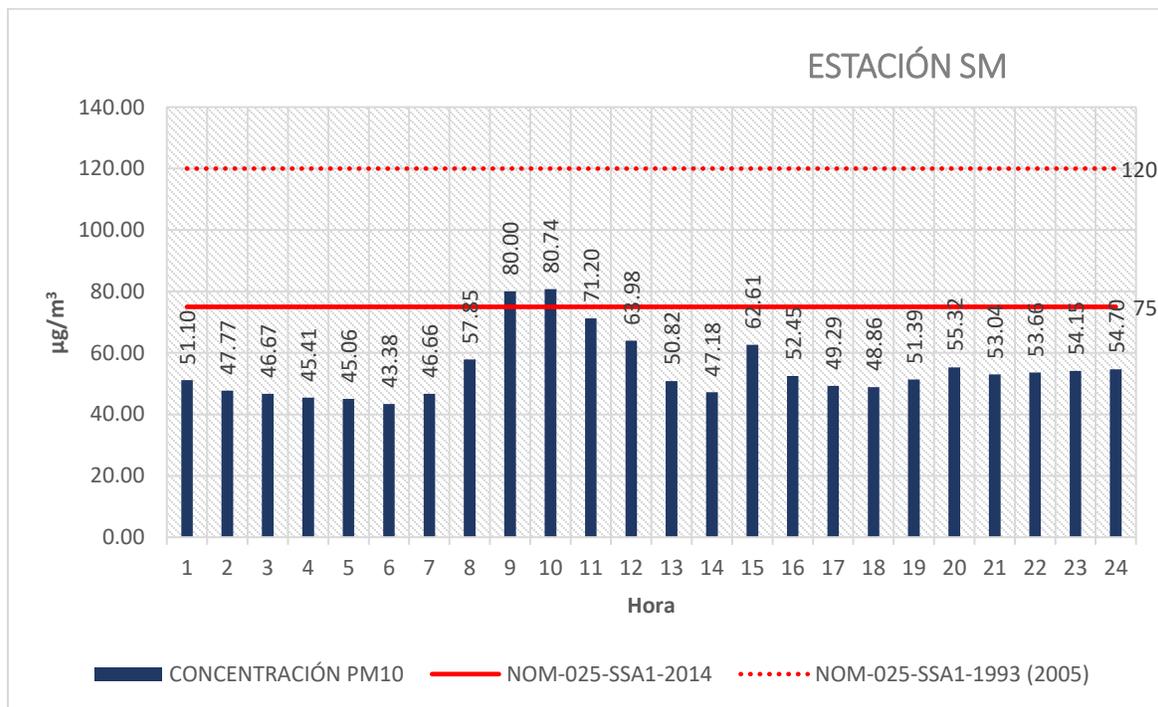
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 34 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 11 valores/hora, de 8:00 a 12:00 horas y posteriormente de 18:00 a 24:00 horas. Las concentraciones máximas de PM₁₀ se registraron a las 9:00 y 10:00 horas con 119.14 µg/m³ y 120.68 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de la 1:00 a las 7:00 horas, de 13:00 a 17:00 horas y finalmente a las 19:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 4:00 horas con un valor de 51.54 µg/m³.

4.1.5.7. Estación SM

La gráfica 35 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones de PM₁₀ registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SM respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 35 Concentraciones PM₁₀ estación SM en el año 2015



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 35 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido por la NOM con 2 valores/hora, entre las 9:00 y 10:00, alcanzando la concentración máxima a las 10:00 horas con 80.74 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00 horas y a partir de las 11:00 hasta las 24:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 6:00 horas con 43.38 µg/m³.

4.1.6 PM₁₀/hora por estación en el año 2016

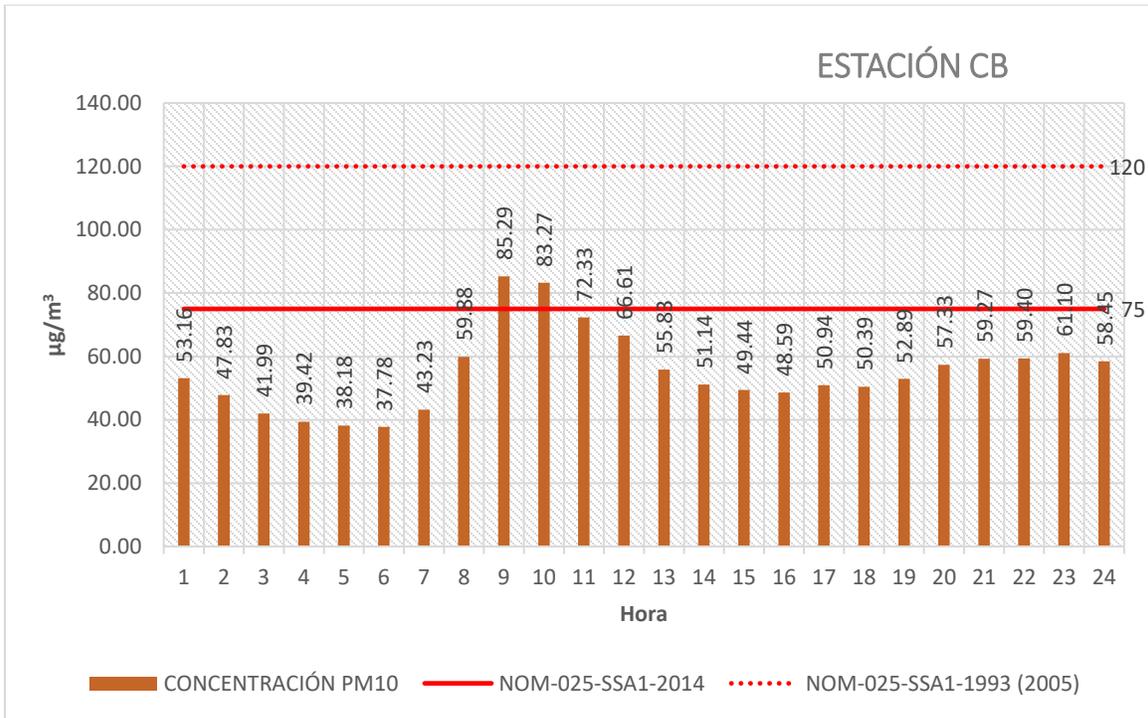
Se presentan las gráficas de cada una de las estaciones de la RAMA-ZMVT, para observar el comportamiento de las concentraciones por hora de PM₁₀ durante las 24 horas en el año 2016, identificando las estaciones que registran las concentraciones fuera de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un Límite Máximo Permisible de 75 µg/m³ (promedio 24 horas) para la protección de la salud humana.

A partir de 2016, la estación AP ya no registró datos sobre las concentraciones de PM₁₀, ya que fue apagada a finales del año 2015.

4.1.6.1. Estación CB

La gráfica 36 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta los datos registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CB respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 36 Concentraciones PM₁₀ estación CB en el año 2016



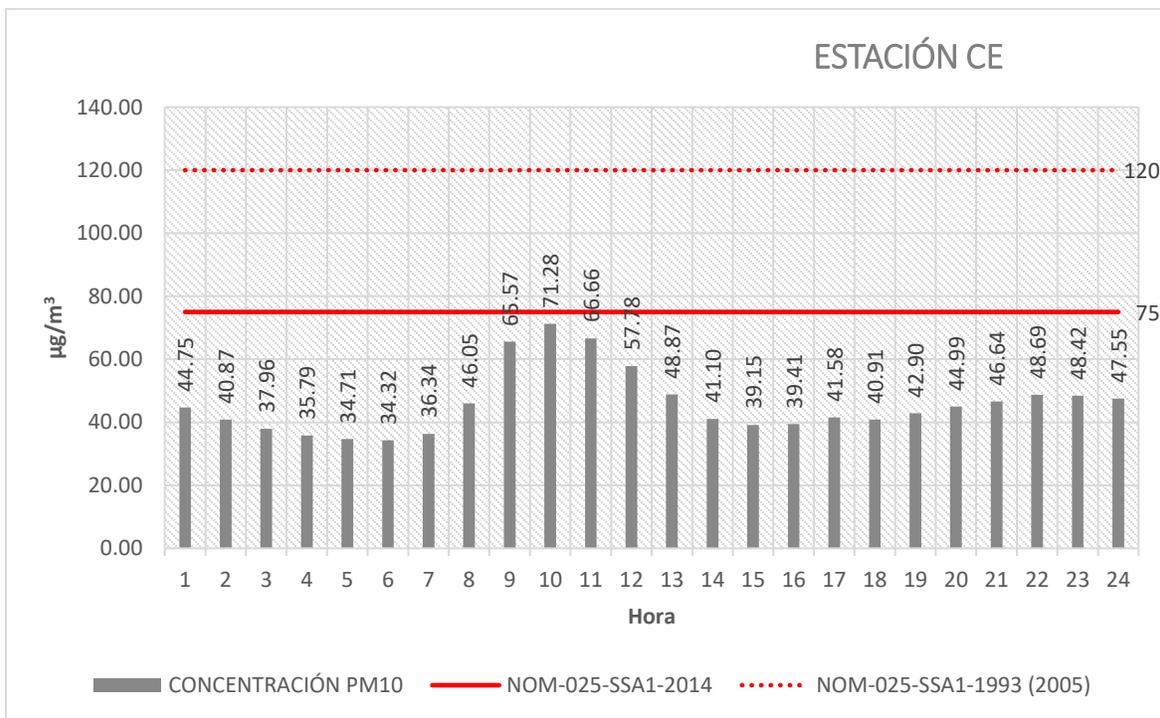
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 36 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasan el LMP establecido por la NOM-025-SSA1-2014, con 2 valores/hora, entre las 9:00 y 10:00 horas con 85.29 y 83.27, siendo la primera, la concentración máxima que se presentó en la estación CB. Respecto a las concentraciones por debajo del límite de la NOM estas se registraron de 1:00 a 8:00 horas y de 11:00 a 24:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 6:00 horas con 37.78 µg/m³.

4.1.6.2. Estación CE

La gráfica 37 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Centro (CE) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones de PM₁₀ registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CE respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 37 Concentración PM₁₀ estación CE en el año 2016



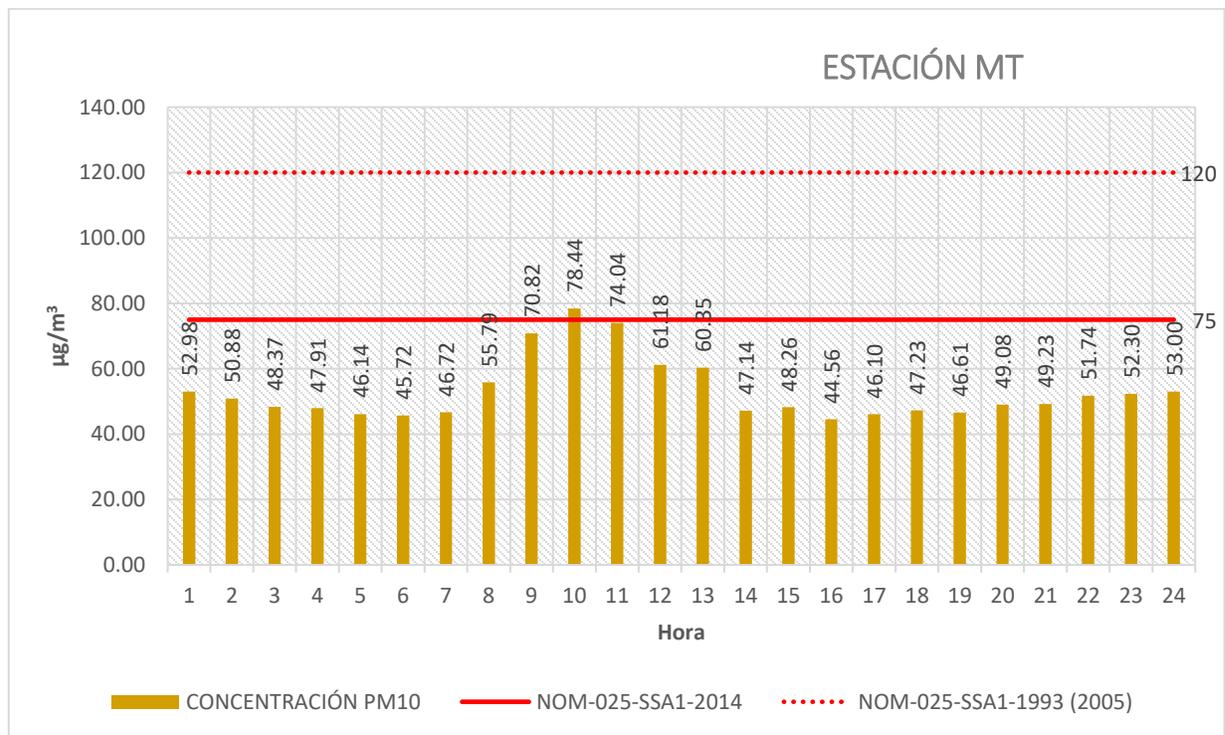
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 37 se observa que las concentraciones no rebasaron el LMP establecido por la NOM-025-SSA1-2014 durante las 24 horas del día, sin embargo, a las 10:00 horas se presentaron concentraciones cercanas a la NOM con 71.28 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones mínimas se registraron de 1:00 a 7:00 horas, así como de las 14:00a las 24:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 6:00 horas con 34.32 µg/m³.

4.1.6.3. Estación MT

La gráfica 38 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Metepec (MT) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación MT respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 38 Concentraciones PM₁₀ estación MT en el año 2016



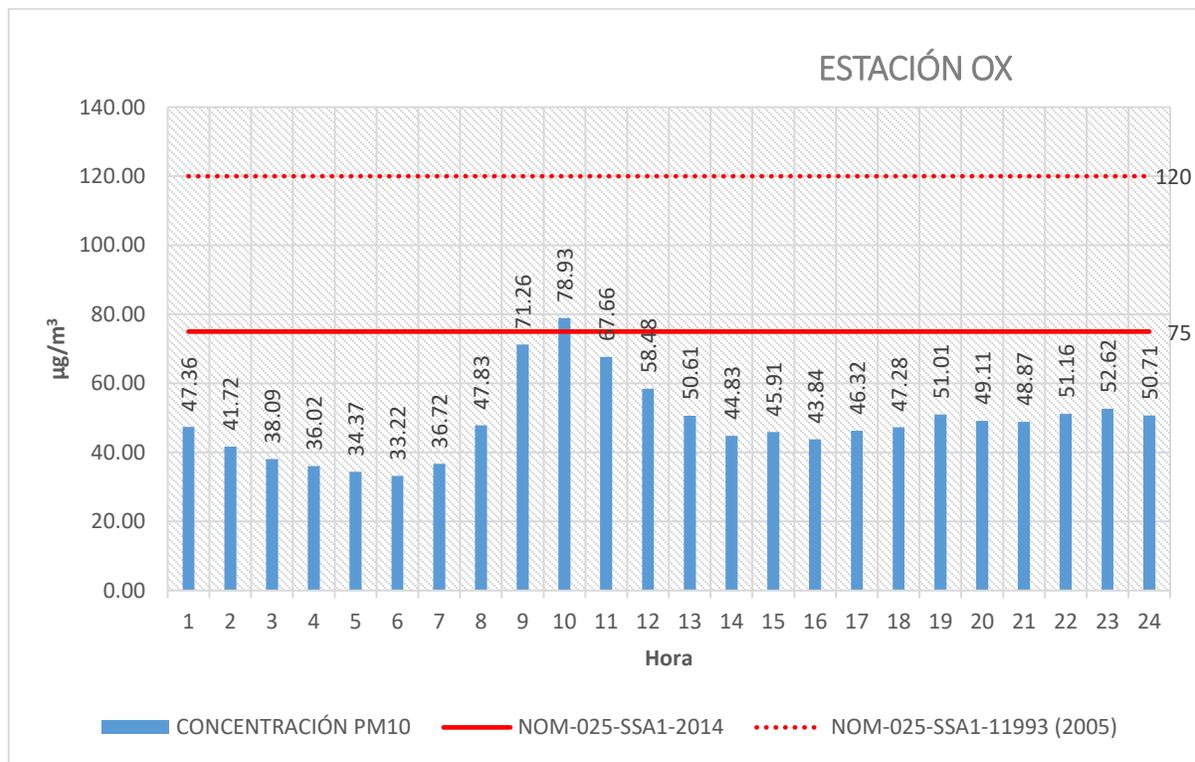
Elaboración propia con base en los datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 38 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM a las 10:00 horas con 78.44 µg/m³, mientras que a las 11:00 horas casi se alcanzó el valor de la NOM, ya que alcanzó una concentración de 74.04 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 9:00 horas y de 12:00 a 24:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 16:00 horas con 44.56 µg/m³.

4.1.6.4. Estación OX

La gráfica 39 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones desde la hora 1, a la hora 24 en la estación OX respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 39 Concentraciones PM₁₀ estación OX en el año 2016



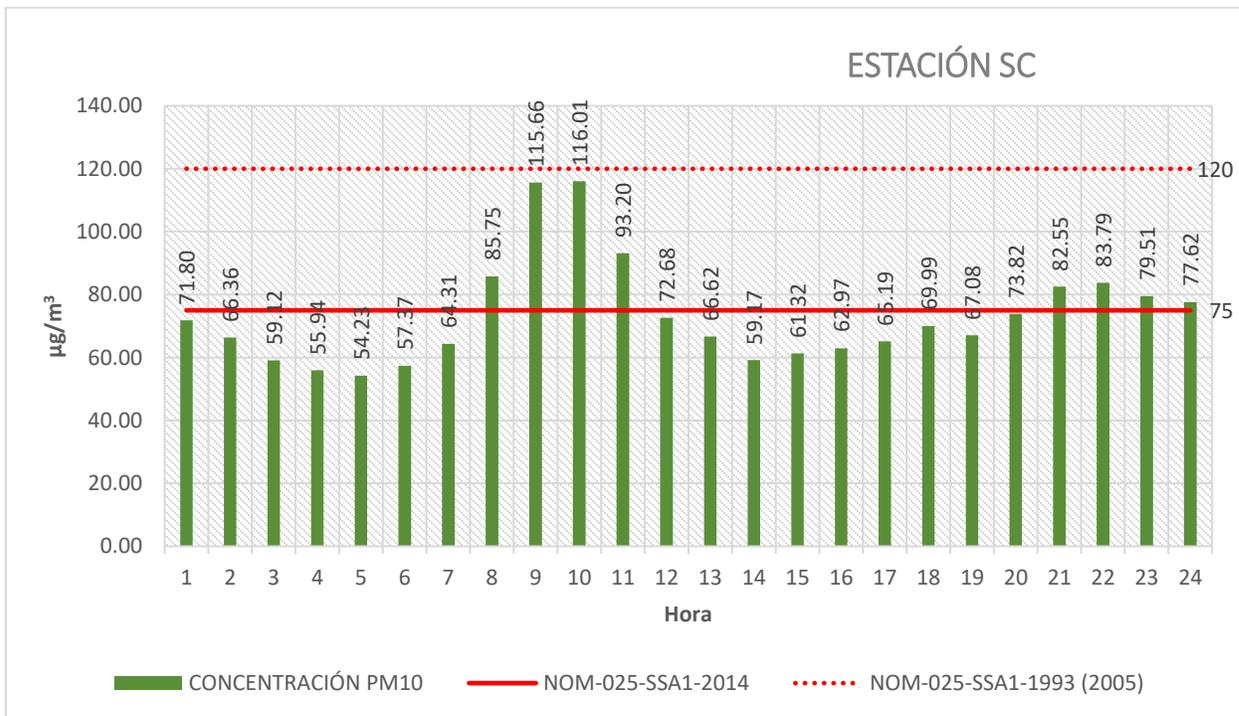
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 39 se observa que el límite establecido por la NOM se rebasó a las 10:00 horas con 78.93 µg/m³, mientras que a las 9:00 horas casi se alcanzó el valor de la NOM alcanzando una concentración de 71.26 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron en las horas restantes de 1:00 a 9:00 horas y posteriormente de 11:00 a 24:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se registró a las 6:00 horas con 33.22 µg/m³.

4.1.6.5. Estación SC

La gráfica 40 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones de PM₁₀ registrados desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SC respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 40 Concentraciones PM₁₀ en la estación SC en el año 2016



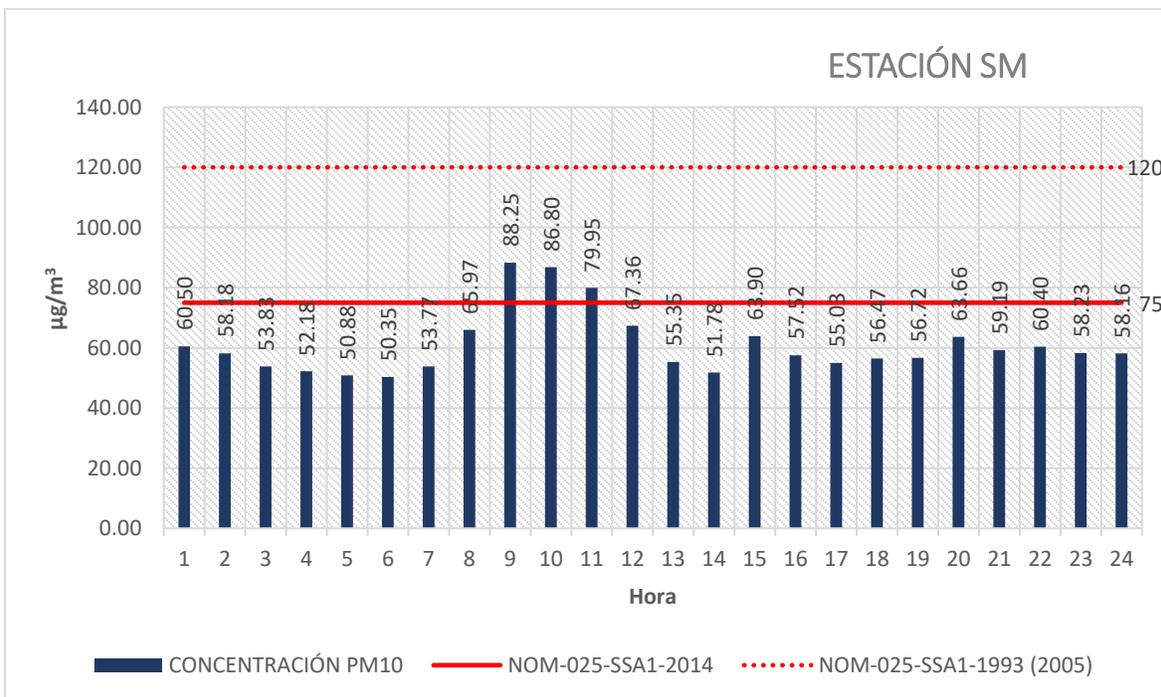
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 40 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP con 8 valores/hora, de 8:00 a 11:00 horas y posteriormente de 21:00 a 24:00 horas. La concentración máxima se registra a las 10:00 horas con 116.01 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 7:00 horas y de 12:00 a 19:00 horas. La concentración mínima se presentó a las 5:00 horas con 54.23 µg/m³ de PM₁₀.

4.1.6.6. Estación SM

La gráfica 41 representa el promedio de concentración por hora de PM_{10} en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SM respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 41 Concentraciones PM_{10} estación SM en el año 2016



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 41 se observa que las concentraciones de PM_{10} rebasaron el LMP establecido en la NOM con 3 valores/hora, superaron el límite 9:00 y 11:00 horas. Registrándose la concentración máxima a las 9:00 horas con $88.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00 y posteriormente de 12:00 a 24:00 horas. La concentración mínima se registró a las 6:00 horas con $50.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.1.7 PM₁₀/hora por estación en el año 2017

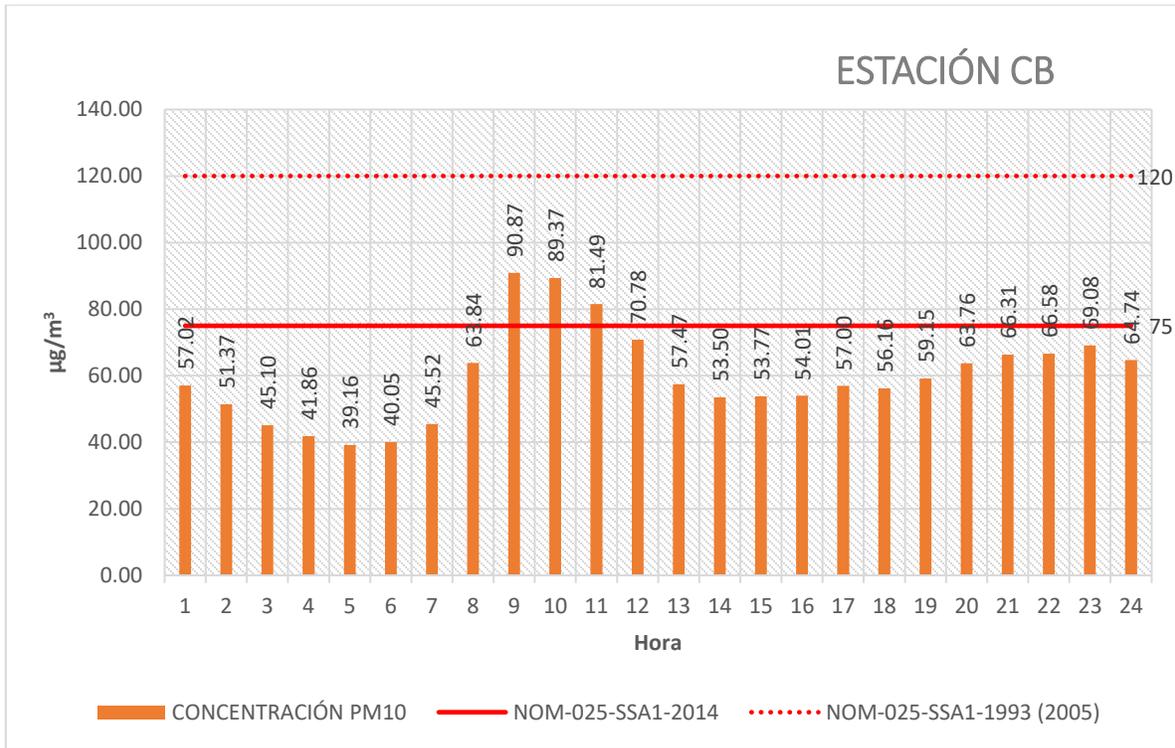
Se presentan las gráficas de cada una de las estaciones de la RAMA-ZMVT, para observar el comportamiento de las concentraciones por hora de PM₁₀ durante las 24 horas en el año 2017, identificando las estaciones que registran las concentraciones fuera de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un Límite Máximo Permisible de 75 µg/m³ (promedio 24 horas) para la protección de la salud.

Cabe señalar que, a partir del año 2016, la estación AP ya no registró datos sobre las concentraciones de PM₁₀, ya que fue apagada a finales del año 2015.

4.1.7.1. Estación CB

La gráfica 42 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CB respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 42 Concentraciones PM₁₀ en la estación CB en el año 2017



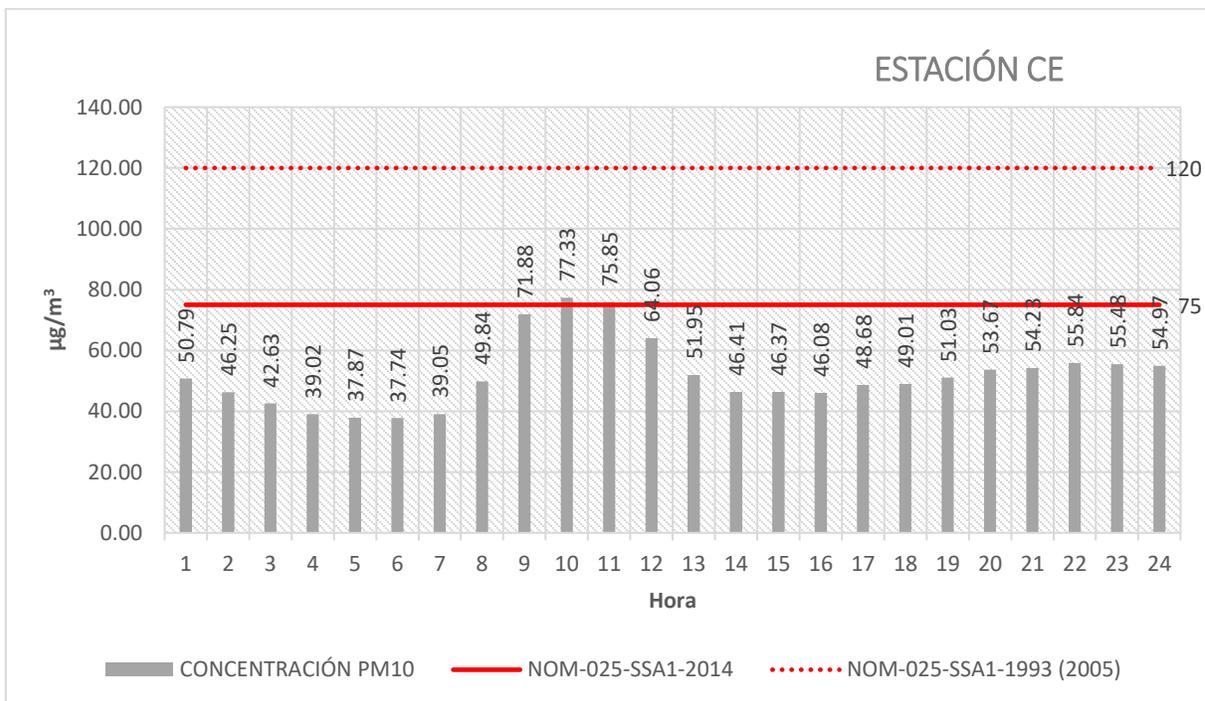
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 42 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 3 valores/hora, 9:00, 10:00 y 11:00 horas. La concentración máxima se registró a las 9:00 horas con 90.87 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del LMP de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00 horas y más tarde, de las 13:00 hasta las 24:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se presentó a las 5:00 horas con 39.16 µg/m³.

4.1.7.2. Estación CE

La gráfica 43 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Toluca Centro (CE) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación CE respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 43 Promedio horario de PM₁₀ en la estación CE en el año 2017



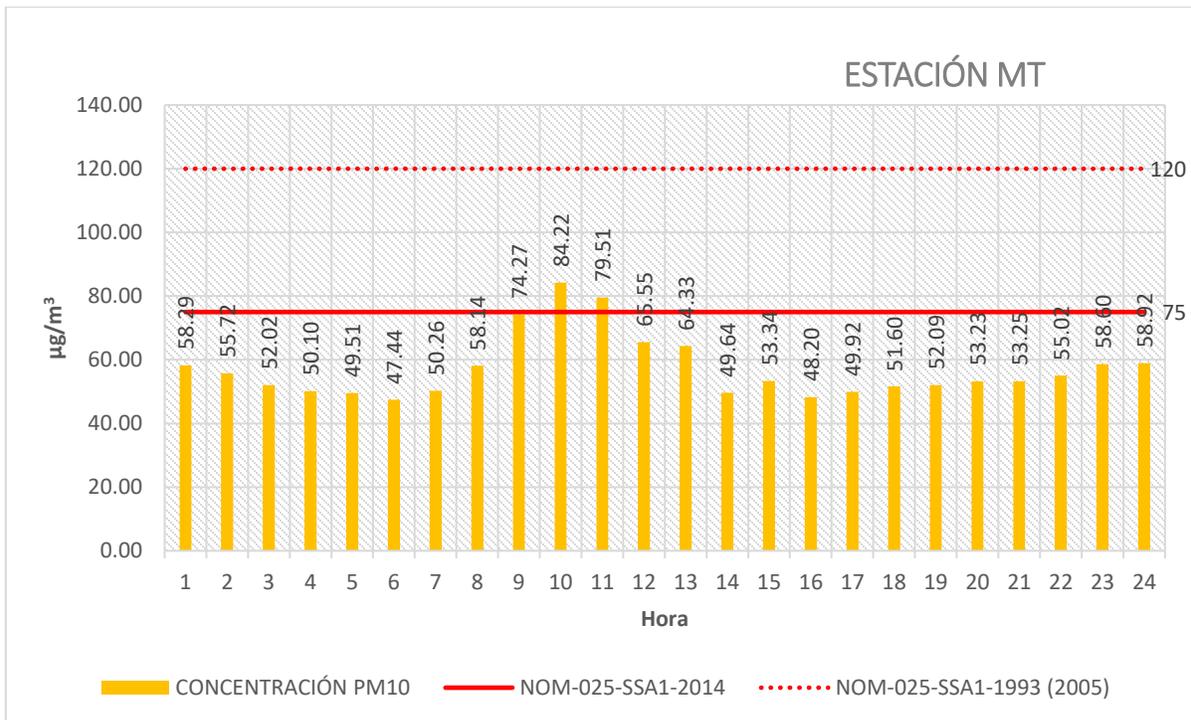
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 43 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM con 2 valores/hora, a las 10:00 y 11:00 horas. La concentración máxima se registró a las 10:00 horas con 77.33 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron de 1:00 a 9:00 y se presentó otra disminución a partir de las 12:00 y hasta las 24:00 horas. La mínima concentración de PM₁₀ se presentó a las 6:00 horas con 37.74 µg/m³.

4.1.7.3. Estación MT

La gráfica 44 representa el promedio de concentración por hora de PM_{10} en la estación Metepec (MT) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación MT respecto de NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 44 Concentraciones PM_{10} estación MT en el año 2017



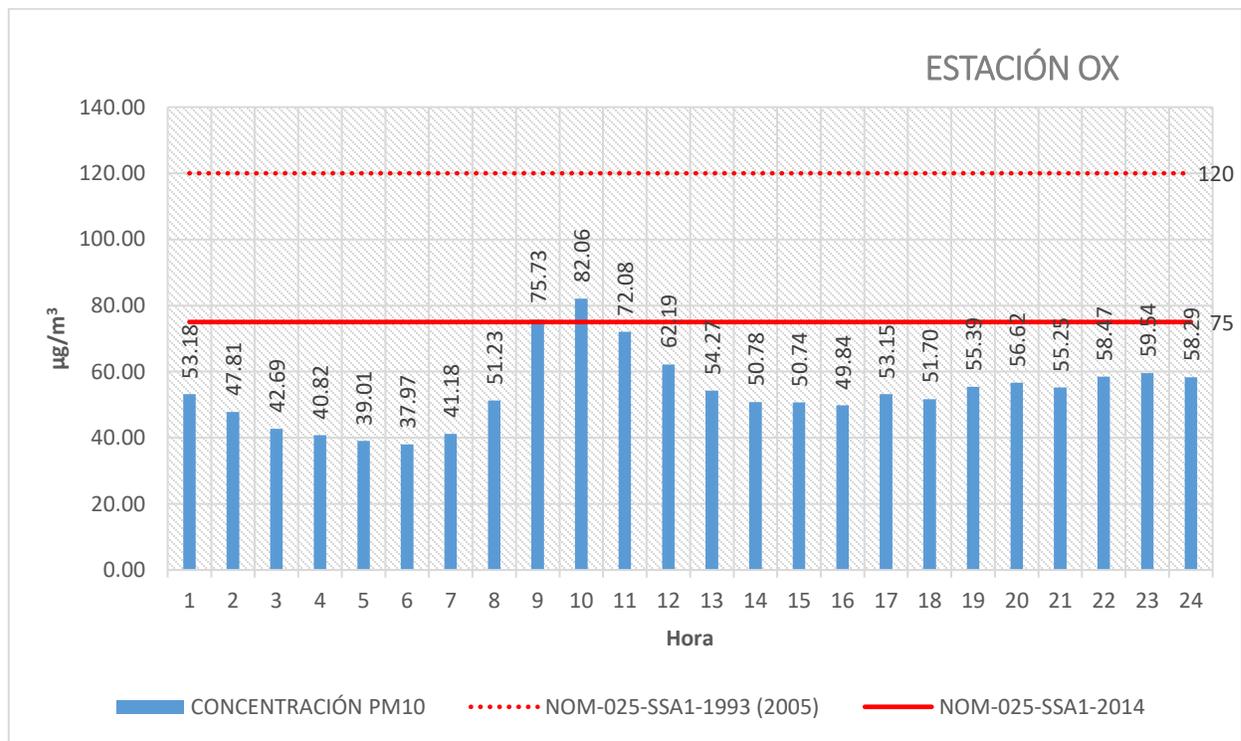
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 44 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM con 2 valores/hora, entre las 10:00 y 11:00 horas. La máxima concentración se registró a las 10:00 horas con $84.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron de 1:00 a 8:00 horas y más tarde se presentó otra disminución de las concentraciones, partir de las 12:00 y hasta las 24:00 horas. La concentración mínima de PM_{10} se presentó a las 6:00 horas con $47.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.1.7.4. Estación OX

La gráfica 45 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación OX respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 45 Concentraciones PM₁₀ estación OX en el año 2017



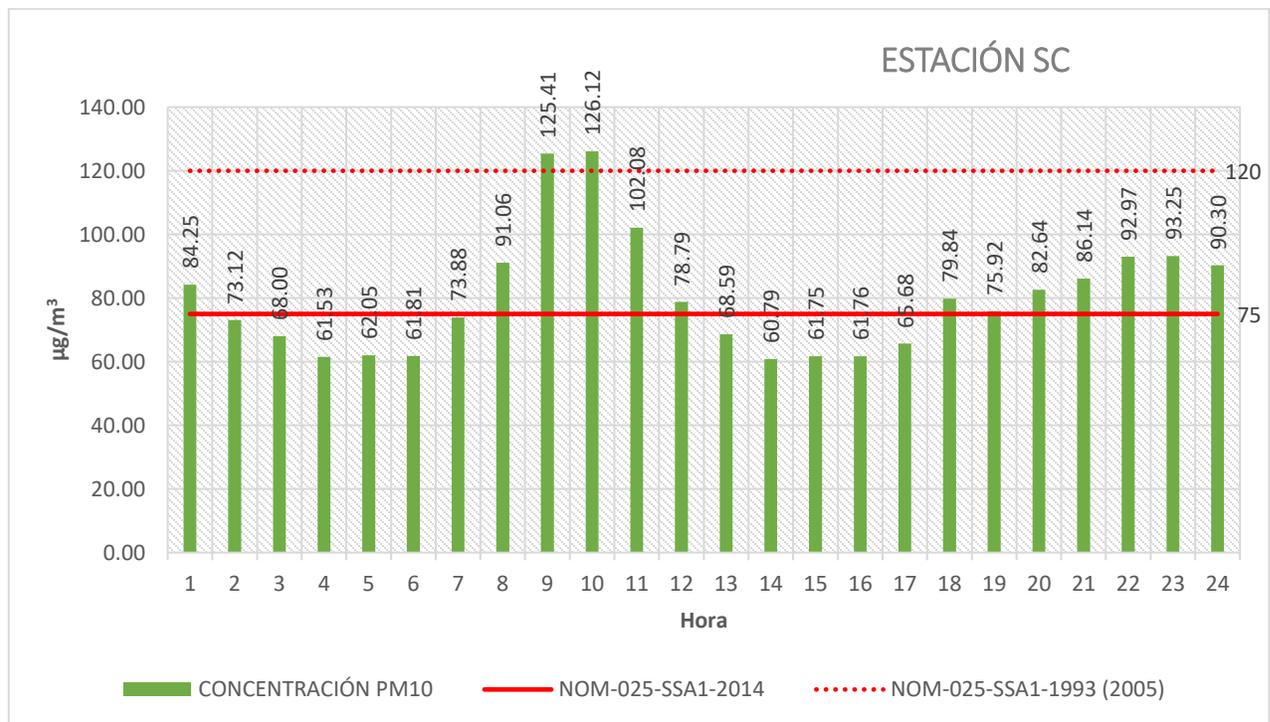
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 45 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 2 valores/hora, a las 9:00 y 10:00 horas. La máxima concentración se presentó a las 10:00 horas con 82.06 µg/m³. Respecto a las concentraciones por debajo del límite de la NOM, estas se registraron de 1:00 a 8:00 horas y de 11:00 a 22:00 horas. La concentración mínima de PM₁₀ se presentó a las 6:00 horas con 37.97 µg/m³.

4.1.7.5. Estación SC

La gráfica 46 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SC respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 46 Concentraciones PM₁₀ estación SC en el año 2017



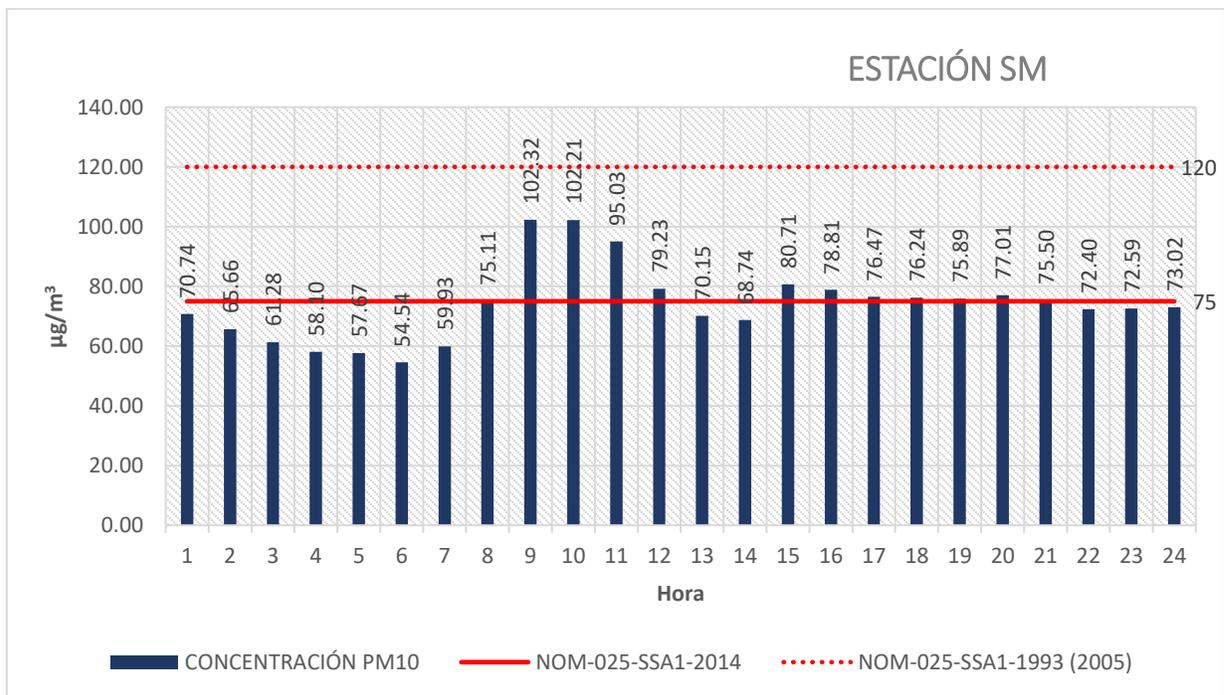
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 46 se observa que las concentraciones de PM₁₀ en la estación SC rebasaron el LMP establecido por la NOM con 13 valores/hora, a la 1:00, de 8:00 a 12:00 y a partir de las 18:00 hasta las 24:00 horas. La concentración máxima se registró entre las 10:00 horas con 126.12 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron entre las 3:00 y 6:00 horas; y de 13:00 a 17:00 horas. La concentración mínima se registró a las 14:00 horas con 60.79 µg/m³.

4.1.7.6. Estación SM

La gráfica 47 representa el promedio de concentración por hora de PM₁₀ en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas desde la hora 1, a la hora 24 en la estación SM respecto de la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 47 Concentraciones PM₁₀ estación SM en el año 2017



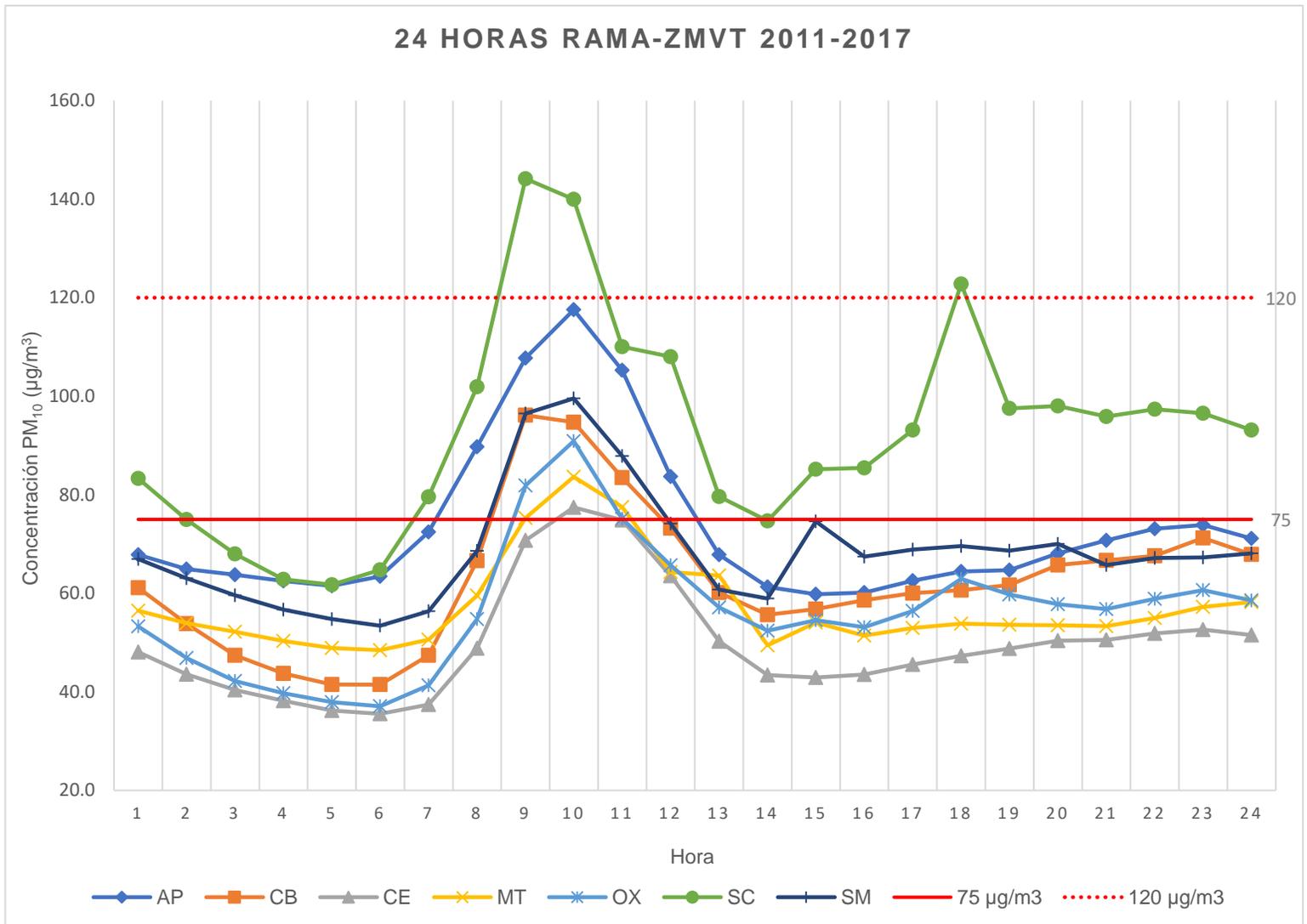
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 47 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM con 12 valores/hora, de 8:00 a 12:00 horas, y más tarde, de 15:00 a 21:00 horas. La concentración máxima se registró a las 9:00 horas con 102.32 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones que estuvieron por debajo del Límite Máximo Permissible establecido en la NOM se registraron de 1:00 a 7:00 horas, entre las cuales la concentración mínima se presentó a las 6:00 horas con 54.54 µg/m³.

4.1.7.7 Comportamiento horario de PM₁₀ en la RAMA-ZMVT (2011-2017)

La gráfica 48 representa conjuntamente el comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ en cada una de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT durante 24 horas, respecto del Límite Máximo Permissible de 75 µg/m³ (promedio 24 horas) establecido en la NOM-025-SSA1-2014 durante el periodo 2011-2017.

Gráfica 48 Comportamiento de PM₁₀ horario en la RAMA-ZMVT 2011-2017



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

Se observa que las concentraciones promedio de PM_{10} fuera del Límite Máximo Permisible establecido en la NOM-025-SSA1-2014 se registraron en un horario matutino en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, principalmente entre las 8:00 y 12:00 horas, alcanzando las concentraciones máximas a las 10:00 horas en la mayoría de los casos, lo cual coincide con la hora en la que se desarrolla una mayor actividad económica e industrial en la zona de estudio, así como el horario en el que se concentra un mayor tráfico vehicular (GEM, 2012).

Particularmente, la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) presentó concentraciones fuera del Límite Máximo Permisible establecido en la NOM-025-SSA1-2014 durante la mayoría de las horas y alcanza las concentraciones máximas a las 9:00 y 18:00 horas, mientras que las concentraciones por debajo del LMP¹ en esta misma estación se registraron entre las 2:00 y 6:00 horas.

También las estaciones de Aeropuerto (AP), San Mateo Atenco (SM) y Ceboruco (CB) presentaron un comportamiento notable respecto a las concentraciones fuera del Límite Máximo Permisible de la NOM en mención, mientras que las estaciones Toluca Centro (CE), Metepec (MT) y Oxtotitlán (OX) registraron concentraciones por debajo del límite durante la mayoría de las horas.

Gráficamente el comportamiento de las concentraciones horarias de PM_{10} , así como de las estaciones que presentan mayor problema por las concentraciones fuera del límite de la NOM pareciera evidente, no obstante, se recurrió al uso de algunas medidas de dispersión para corroborar los resultados observados en las gráficas.

Las medidas de dispersión indican la dispersión de los datos (Hernández-Sampieri, et al., 2010). En el presenta análisis se utilizaron la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación para observar la dispersión de los datos en las estaciones de la RAMA-ZMVT.

- Por un lado, *“La desviación estándar es el promedio de desviación de las puntuaciones con respecto a la media. (...) se interpreta en relación con la media. Cuanto mayor sea la dispersión de los datos alrededor de la media,*

¹ Límite Máximo Permisible

mayor será la desviación estándar “(Hernández-Sampieri, et al., 2010. p. 294).

La desviación estándar se puede reconocer con una **s**, **σ** o sólo como **DE** (Hernández-Sampieri, et al., 2010). Para el caso de la presente investigación se obtuvo con la función de la Desviación Estándar en el programa Microsoft Excel®.

- Por otro lado, la varianza se refiere a la desviación estándar al cuadrado y se encuentra como r^2 (Hernández-Sampieri, et al., 2010)
- El coeficiente de variación es la razón entre la desviación estándar y la media

$$CV = DE \div \mu * 100$$

Fuente: (Geociencias UNAM, 2018)

Permite comparar la dispersión de los datos entre diferentes grupos, definiendo si son homogéneos o heterogéneos. Puede utilizarse la siguiente escala:

Tabla 25 Escala del Coeficiente de Variación

Coeficiente de Variación	
< 5%	Muy homogéneo
5-20 %	Homogéneo
20-50 %	Heterogéneo
> 50%	Muy heterogéneo

Fuente: elaboración propia con base en Planeta Agronómico, 2016.

4.1.7.8 Dispersión de las concentraciones de PM₁₀ por estación durante 2011-2017

En la **Tabla 26** se presentan las medidas de dispersión obtenidas para las siete estaciones de la RAMA-ZMVT. Se incluye la media, la desviación estándar, el

coeficiente de variación, la concentración máxima y mínima, todas obtenidas directamente con las funciones del programa Microsoft Excel®.

Tabla 26 Medias de dispersión para la determinación del comportamiento horario de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante 2011-2017

Estación	Media	Desviación estándar	Varianza	Coeficiente de Variación (%)	Máximo	Mínimo
Aeropuerto (AP)	73.26	16.82	282.76	23	131.64	51.34
Ceboruco (CB)	62.65	16.43	270.03	26	118.77	35.47
Toluca Centro (CE)	57.39	12.49	156.05	22	93.95	29.02
Metepec (MT)	57.39	10.98	120.49	19	101.76	42.93
Oxtotitlán (OX)	56.49	15.58	242.81	28	119.40	32.21
San Cristóbal Huichochitlán (SC)	92.44	30.36	921.95	33	190.37	51.20
San Mateo Atenco (SM)	68.53	15.85	251.14	23	128.01	43.38

Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

Como se puede observar en la tabla 26, la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) presentó la mayor desviación estándar de 30.36 respecto de la media 92.44, siendo la estación con mayor dispersión de los datos.

Respecto al coeficiente de variación, las estaciones que presentan mayor dispersión en las concentraciones de PM₁₀ son San Cristóbal Huichochitlán (SC) con 33%, seguido de Oxtotitlán (OX) con 28%, Ceboruco (CB) con 26%, San Mateo Atenco (SM), Aeropuerto (AP) con 23% y Toluca Centro con 22%, mientras que la estación Metepec (MT) obtuvo el menor coeficiente de variación con 19%.

Los porcentajes anteriores reflejan que las estaciones San Cristóbal Huichochitlán, Oxtotitlán, Ceboruco, San Mateo Atenco, Aeropuerto y Toluca Centro presentan un comportamiento muy variado o heterogéneo de las concentraciones promedio de PM_{10} , de acuerdo con la interpretación del coeficiente de variación presentada en la tabla 25. La estación Metepec presentó un comportamiento más homogéneo.

La heterogeneidad de los datos dificulta deducir la tendencia del comportamiento de las concentraciones de PM_{10} en cada estación de la RAMA-ZMVT, con la probabilidad de la influencia de diversos factores meteorológicos, el tipo de las fuentes de emisión o posibles errores en las mediciones.

Se comprobó que tal y cómo se observó en las gráficas, las concentraciones máximas de PM_{10} se registraron a las 10:00 horas en la mayoría de las estaciones, excepto para las estaciones de Ceboruco (CB) y San Cristóbal Huichochitlán (SC), en las cuales las concentraciones máximas se registraron a las 9:00 horas.

Según la varianza las estaciones con mayor variabilidad en los datos fueron San Cristóbal Huichochitlán (SC), Aeropuerto (AP), Ceboruco (CB) y San Mateo Atenco (SM). Dichos resultados podrían estar influenciados por las variables meteorológicas como la dirección de los vientos de Sur a Norte que dispersa las PM_{10} y probablemente al entorno de cada estación. Por ejemplo, la estación SC al estar en una zona rural recibe material particulado de las vialidades que aún no están pavimentadas y por la erosión de suelos de cultivo, sumadas las contribuciones de PM_{10} provenientes de la zona industrial, ya que esta estación se encuentra a favor del viento de la zona industrial. Las estaciones AP y SM se encuentran cercanas a zonas industriales y vialidades con alto tráfico vehicular y de todo tipo de transporte; y la estación CB tiene alrededor vialidades con tráfico vehicular intenso y frecuentes embotellamientos.

4.2 Concentraciones mensuales de PM₁₀ en la RAMA-ZMVT durante 2011-2017

En este apartado se presentan las gráficas de las concentraciones mensuales de PM₁₀ por estación durante el periodo 2011-2017. Pese a que la NOM establece valores para promedio de 24 horas y anual, las gráficas de las concentraciones mensuales se describen tomando como referencia el valor anual, ya que las concentraciones por mes no están normadas. Las gráficas se describen tomando como referencia los Límites Máximos Permisibles establecidos en la NOM-025-SSA1-2014 (vigente) (línea continúa roja), sin embargo, solo para fines ilustrativos, en las gráficas se señala la NOM de PM₁₀ anterior (línea roja punteada).

Límites Máximos Permisibles (LMP):

- 40 µg/m³ promedio anual NOM-025-SSA1-2014 (vigente).
- 50 µg/m³ promedio anual NOM-025-SSA1-1993 (modificación 2005):

Seis de las siete estaciones reportaron datos para el periodo de estudio 2011-2017, la estación Aeropuerto (AP) no registró datos para los años 2016 y 2017, ya que ésta fue desconectada a finales del 2015, registrando así, datos hasta el mes de septiembre del año en mención.

Cada estación tiene un color de identificación:

- **AP** Azul cielo
- **CB** Anaranjado
- **CE** Gris
- **MT** Amarillo
- **OX** Azul claro
- **SC** Verde
- **SM** Azul marino

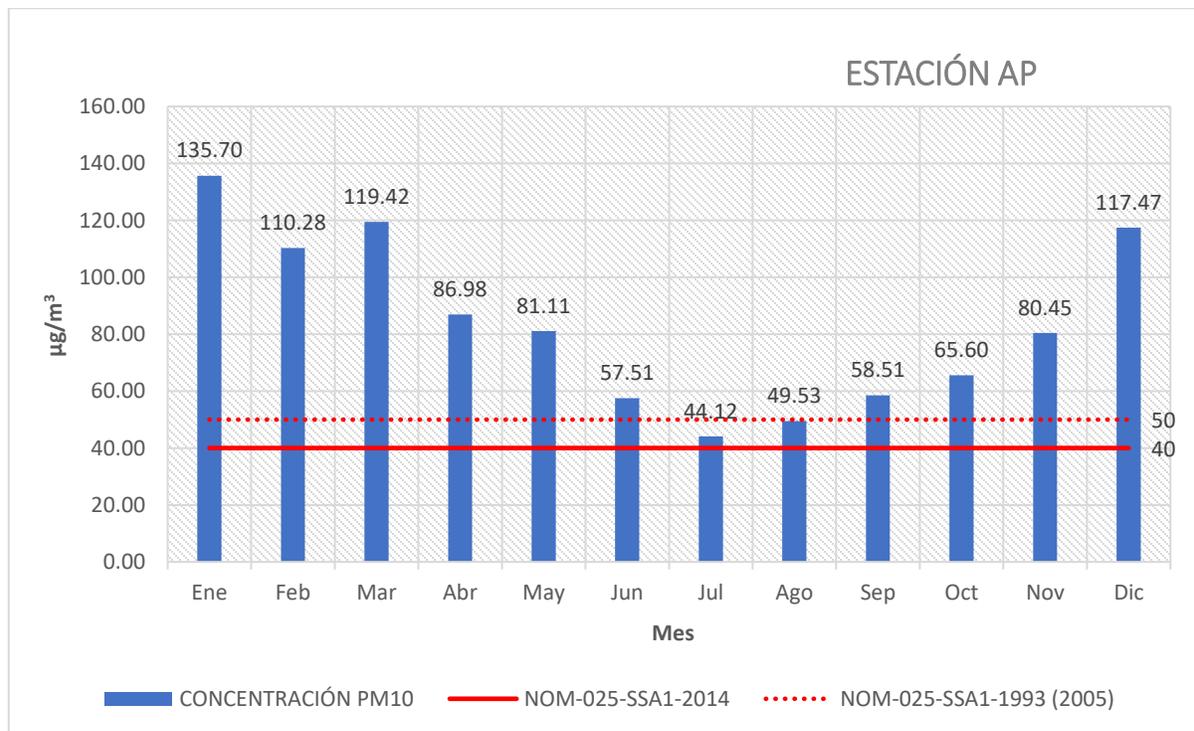
4.2.1 PM₁₀/mensual por estación en el año 2011

Se presentan las gráficas de cada estación de la RAMA-ZMVT para observar el comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ durante cada uno de los 12 meses del año 2011, e identificar las estaciones que registran las concentraciones fuera del LMP de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un valor de 40 µg/m³ (anual) para la protección de la salud.

4.2.1.1. Estación AP

La gráfica 49 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 49 Concentraciones PM₁₀ por mes estación AP en el año 2011



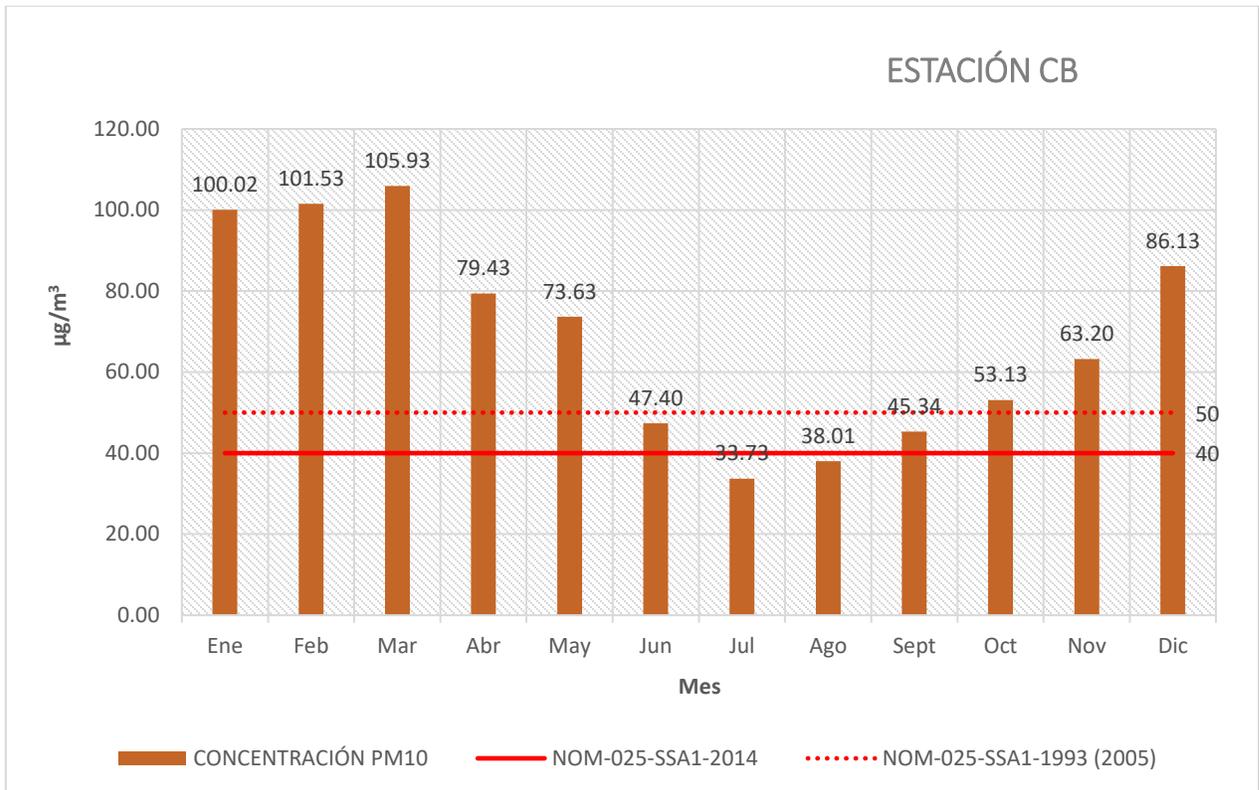
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 49 se observa que las concentraciones de PM_{10} rebasaron el LMP establecido por la NOM durante los doce meses, siendo notorio durante los meses de enero y febrero; marzo, abril, mayo, así como noviembre y diciembre en la estación AP. Las concentraciones máximas se registraron durante el mes de enero con $135.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, marzo con $119.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y diciembre con $117.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, los meses que presentaron una disminución en las concentraciones fueron junio y julio, así como agosto, septiembre y octubre. Las concentraciones mínimas se presentaron en julio y agosto con $44.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $49.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

4.2.1.2. Estación CB

La gráfica 50 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 50 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CB en el año 2011



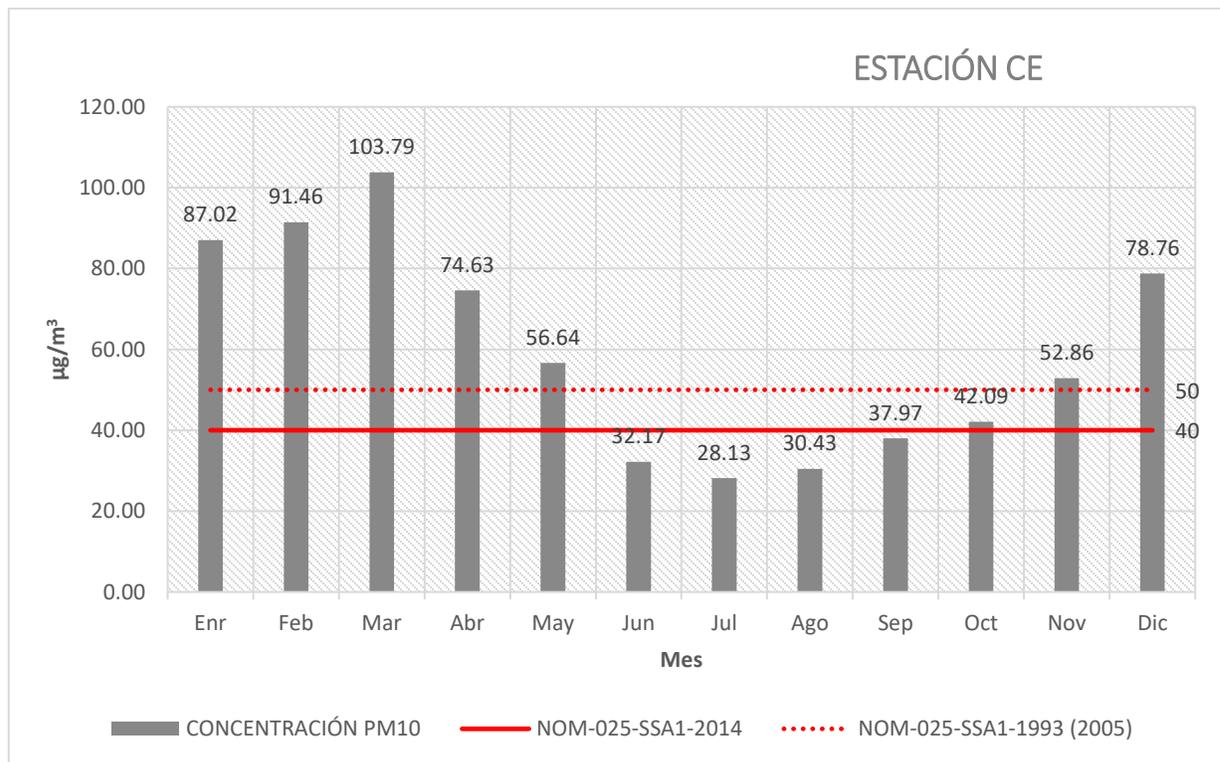
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 50 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaran el LMP establecido en la NOM durante los meses enero y febrero; marzo, abril y mayo; así como noviembre y diciembre en la estación CB. Las concentraciones máximas se registraron durante el mes de marzo con 105.93 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones que estuvieron por debajo de la NOM se registraron durante los meses julio y agosto entre las cuales las concentraciones mínimas se presentaron en julio con 33.73 µg/m³.

4.2.1.3. Estación CE

La gráfica 51 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Toluca Centro (CE) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 51 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CE en el año 2011



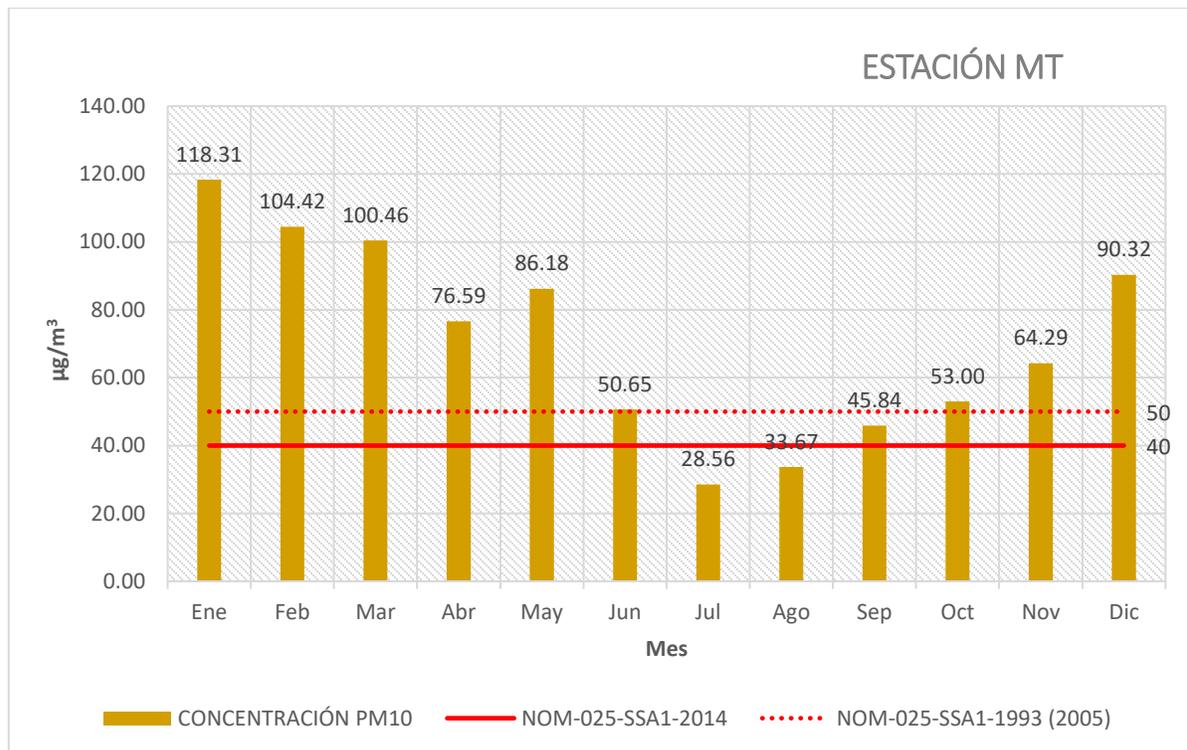
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 51 se observa que las concentraciones de PM₁₀ superaron el LMP establecido en la NOM durante los meses enero y febrero, marzo, abril y mayo, así como noviembre y diciembre en la estación CE. Las concentraciones máximas se registraron en marzo con 103.79 µg/m³ respectivamente. Por otro lado, las concentraciones que estuvieron por debajo de la NOM se registraron en junio, julio, agosto y septiembre, entre las cuales las concentraciones mínimas se presentaron en julio con 28.13 µg/m³.

4.2.1.4. Estación MT

La gráfica 52 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Metepec (MT) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 52 Concentraciones PM₁₀ por mes estación MT en el año 2011



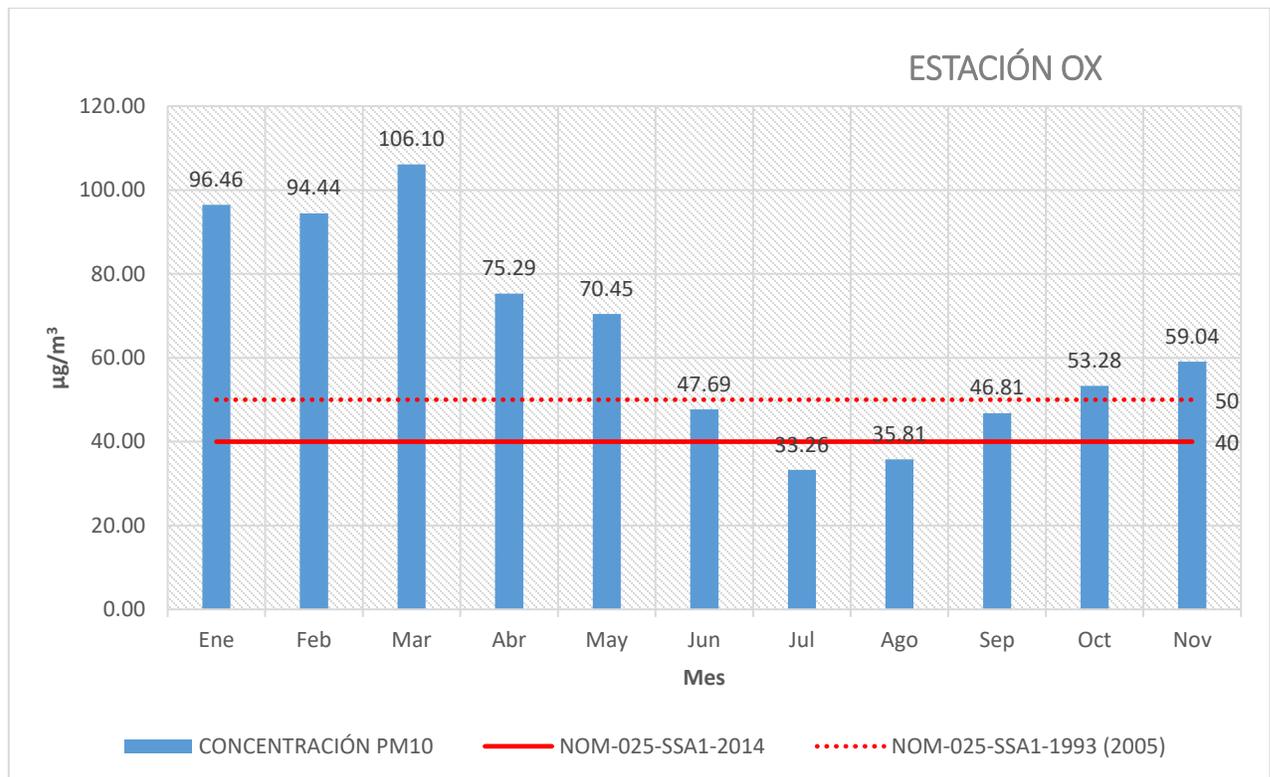
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 52 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero y febrero; marzo; abril y mayo; así como noviembre y diciembre en la estación MT. Las concentraciones máximas se presentaron durante enero con 118.31 µg/m³. Posteriormente las concentraciones se incrementaron nuevamente entre noviembre y diciembre. Las concentraciones que estuvieron por debajo de la NOM se registraron durante los meses de julio y agosto, entre las cuales las concentraciones mínimas se presentaron en julio con 28.56 µg/m³.

5.2.1.5. Estación OX

La gráfica 53 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 53 Concentraciones PM₁₀ por mes estación OX en el año 2011



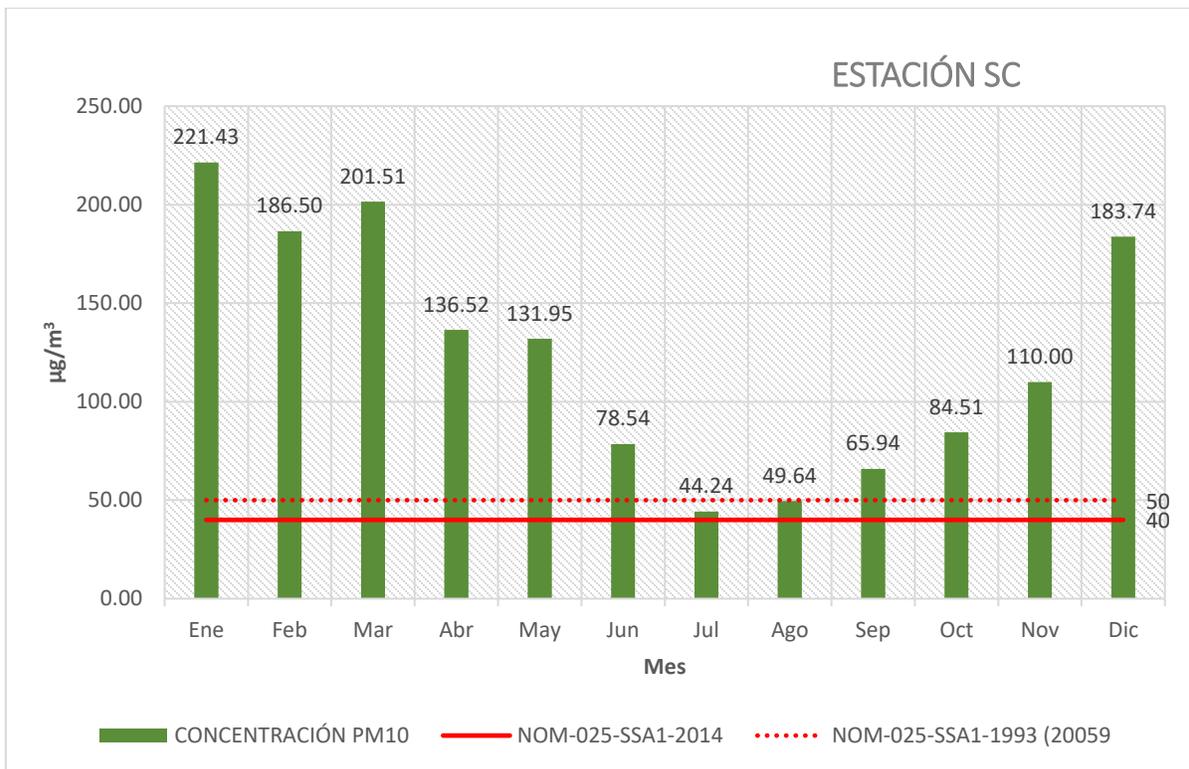
Elaboración propia con base en datos de la RAMA.

En la gráfica 53 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero y febrero; marzo, abril y mayo en la estación OX. Posteriormente se observa nuevamente un incremento en septiembre, octubre y noviembre. Las concentraciones máximas se presentaron durante marzo con 106.10 µg/m³, mientras que las concentraciones de PM₁₀ por debajo de la NOM se presentaron entre julio y agosto, de las cuales, la concentración mínima se presentó en julio con 33.26 µg/m³. Cabe señalar que en la estación MT no se reportaron datos en el mes de diciembre.

4.2.1.6. Estación SC

La gráfica 54 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 54 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SC en el año 2011



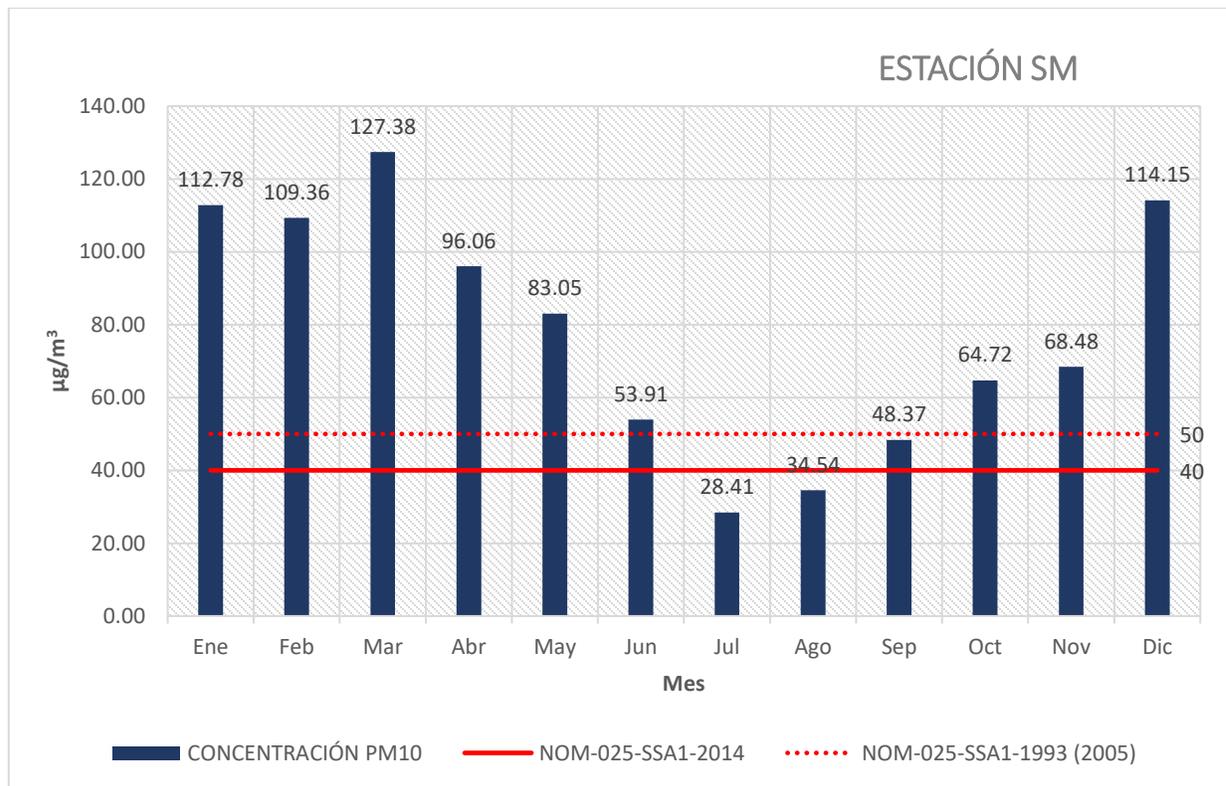
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 54 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM durante todos los meses del año en la estación SC. Las concentraciones más elevadas se presentaron durante enero y febrero; marzo, abril y mayo; así como el mes de diciembre. Las concentraciones máximas se presentaron en el mes de enero con 221.43 µg/m³. Las concentraciones más bajas (aún por encima de la NOM) se presentaron entre julio y agosto, de entre los cuales, la concentración mínima se presentó en julio con 44.24 µg/m³.

4.2.1.7. Estación SM

La gráfica 55 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2011. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 55 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SM en el año 2011



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011.

En la gráfica 55 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM en la estación SM durante los meses de enero y febrero; marzo, abril y mayo; así como octubre, noviembre y diciembre. Las concentraciones máximas se presentaron durante el mes de marzo con 127.38 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones que estuvieron por debajo de la NOM se registraron durante los meses julio y agosto, entre los cuales la concentración mínima se presentó en julio con 28.41 µg/m³.

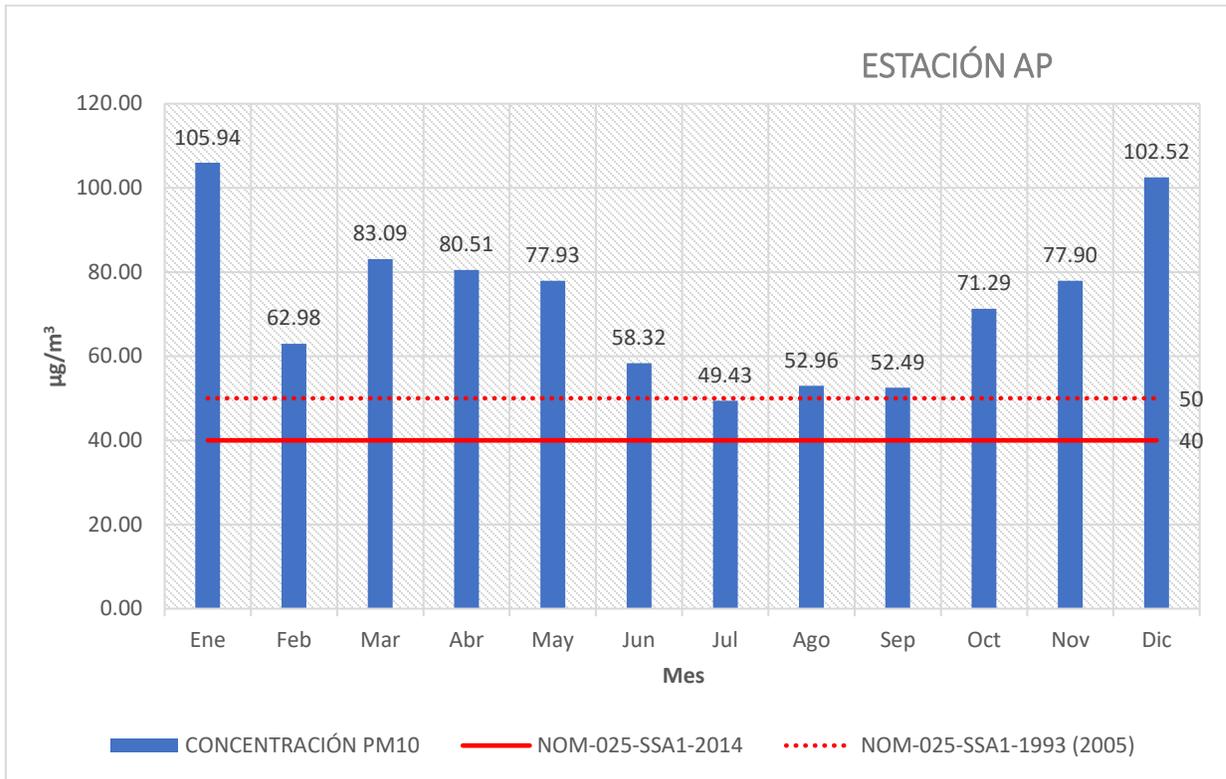
4.2.2 PM₁₀/mensual por estación en el año 2012

Se presentan las gráficas de cada estación de la RAMA-ZMVT para observar el comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ durante cada uno de los 12 meses del año 2012, e identificar las estaciones que registran las concentraciones fuera del LMP de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un valor de 40 µg/m³ (anual) para la protección de la salud.

4.2.2.1 Estación AP

La gráfica 56 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 56 Concentraciones PM₁₀ por mes estación AP en el año 2012



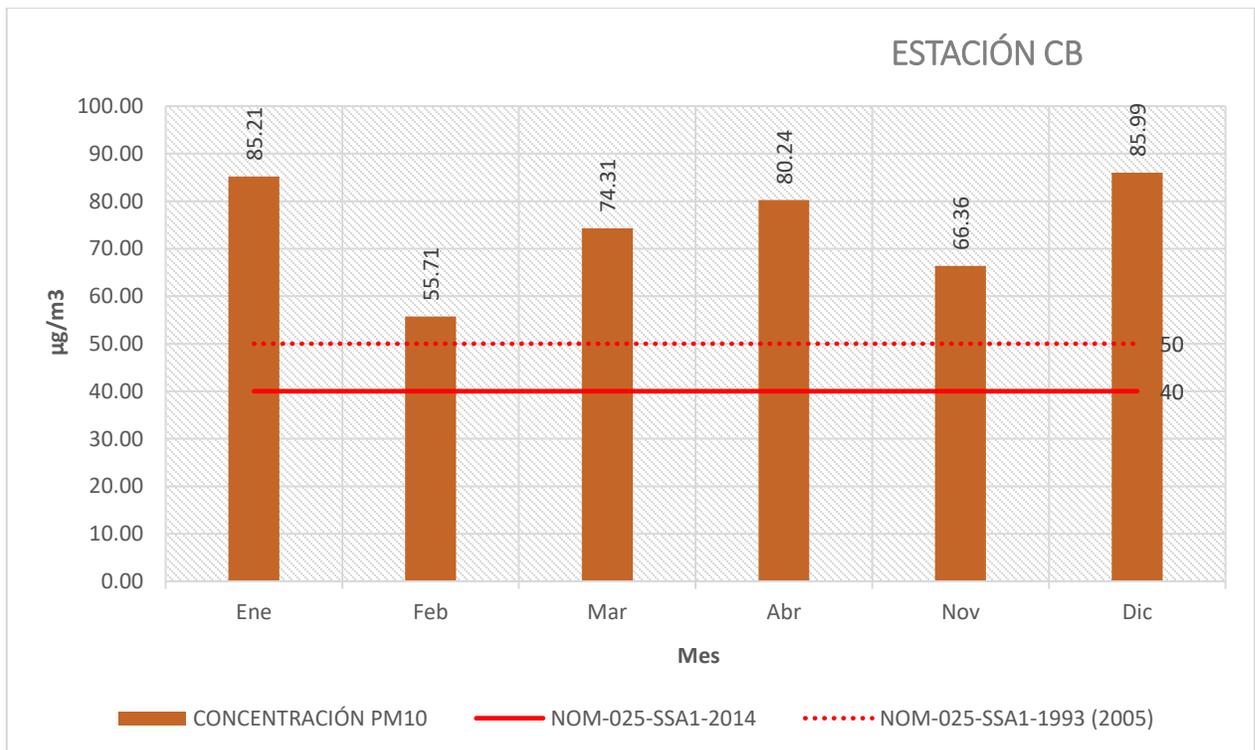
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 56 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM durante los doce meses del año en la estación AP. Las concentraciones más elevadas se presentaron en enero y diciembre; siendo la concentración máxima registradas en el mes de enero con 105.94 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones más bajas (rebasando la NOM), se presentaron en julio, agosto y septiembre, de entre los cuales la concentración mínima se presentó en julio con 49.43 µg/m³.

4.2.2.2. Estación CB

La gráfica 57 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 57 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CB en el año 2012



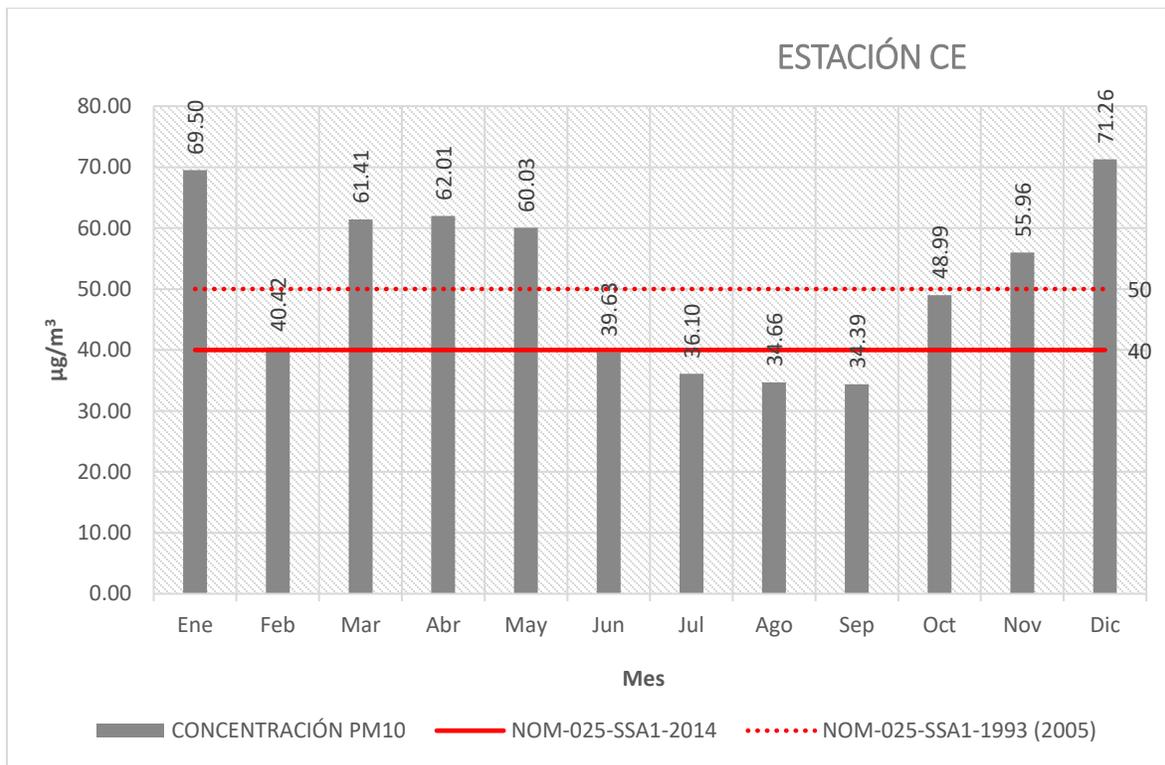
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 57 se observa que la estación CB sólo reportó datos para seis meses, cuyas concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM. La concentración máxima se presentó en enero y diciembre con 85.21 µg/m³ y 85.99 µg/m³ respectivamente. La concentración aún rebasando la NOM, pero en menor medida, se presentó en febrero con 55.71 µg/m³.

4.2.2.3 Estación CE

La gráfica 58 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Toluca Centro (CE) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 58 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CE en el año 2012



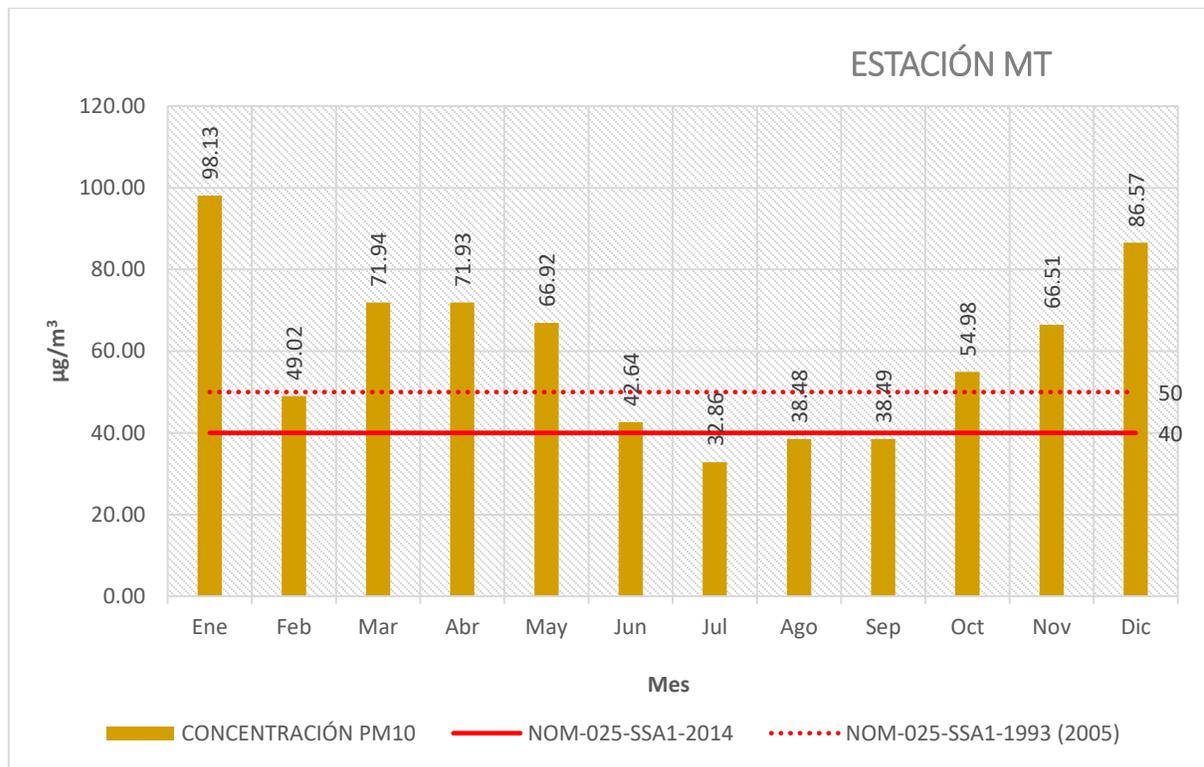
Elaboración propia con base en datos de la RAM, 2012.

En la gráfica 58 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM en enero, marzo, abril y mayo; posteriormente en octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se presentó en enero y diciembre con 69.50 µg/m³ y 71.26 µg/m³ respectivamente. Las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en febrero, junio, julio, agosto y septiembre, presentándose la mínima concentración en agosto con 34.66 µg/m³.

4.2.2.4 Estación MT

La gráfica 59 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Metepec (MT) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 59 Concentraciones PM₁₀ por mes estación MT en el año 2012



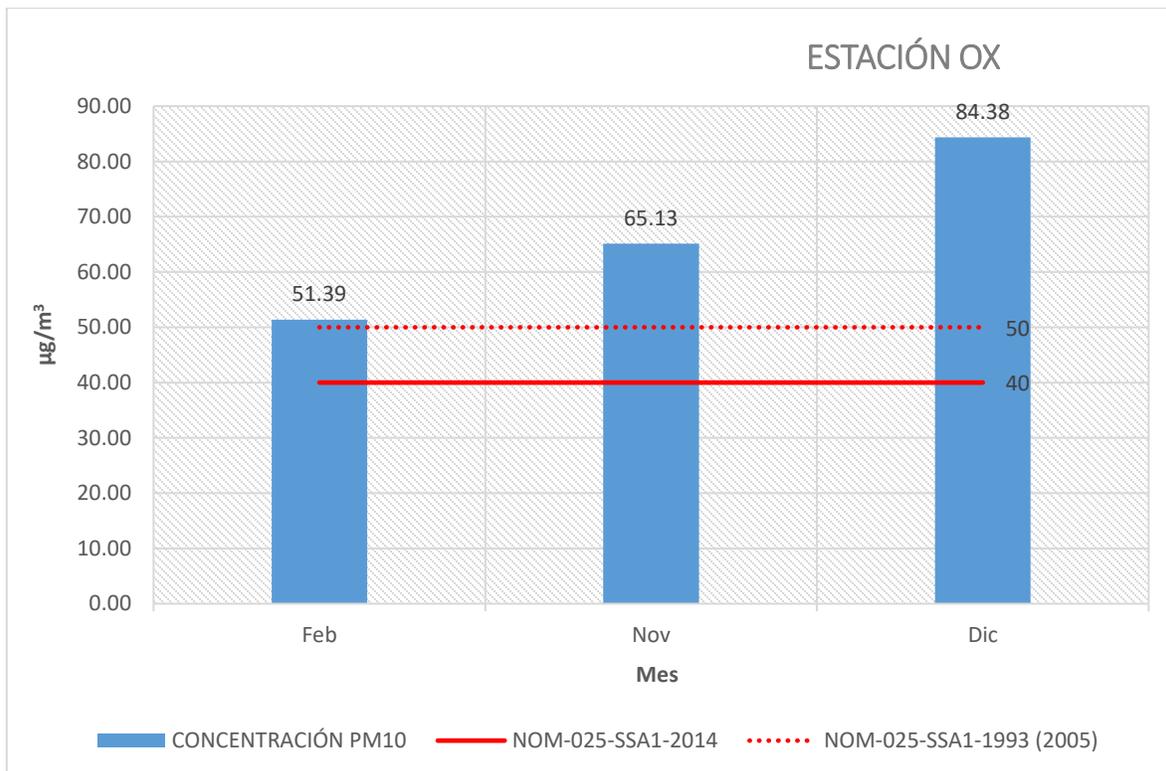
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 59 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses enero y febrero; marzo, abril, mayo y junio, así como en los meses octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se presentó en enero con 98.13 µg/m³. Las concentraciones que se encuentran por debajo de la NOM se registraron en julio, agosto y septiembre, presentándose la concentración mínima en julio con 32.86 µg/m³.

4.2.2.5 Estación OX

La gráfica 60 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 60 Concentraciones PM₁₀ por mes estación OX en el año 2012



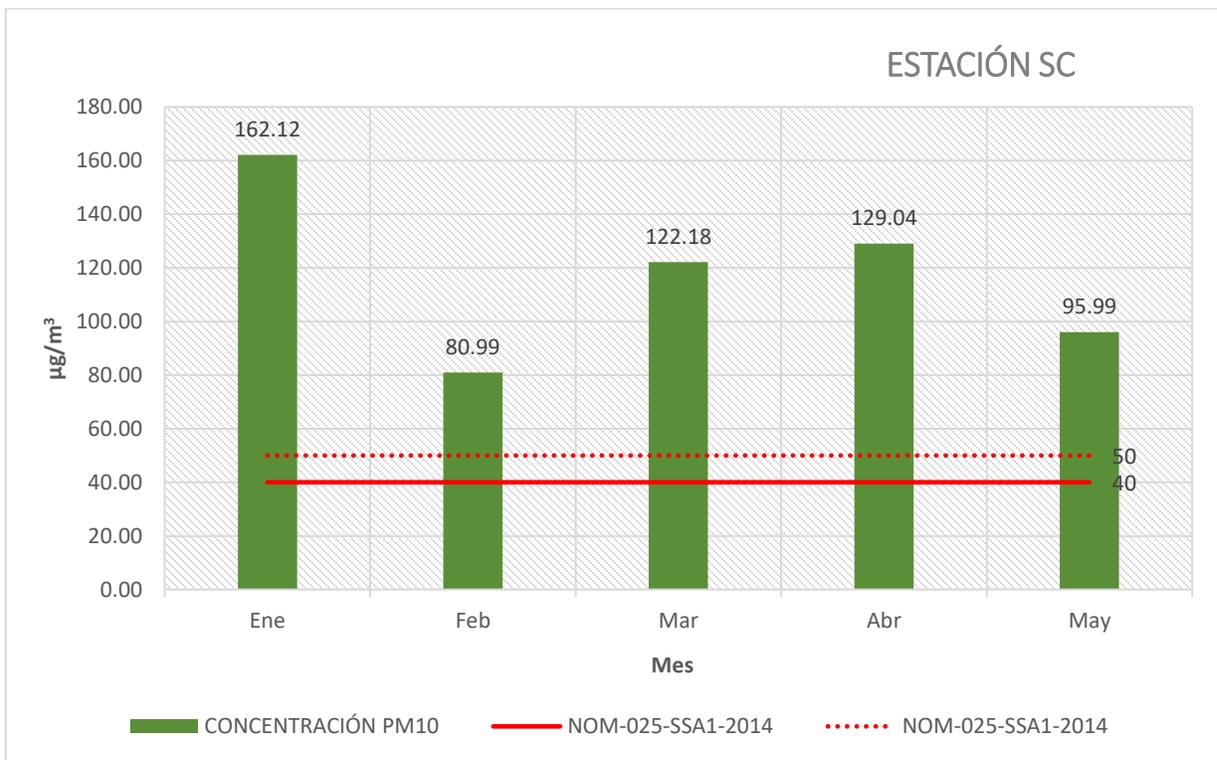
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 60, se observa que la estación OX registró concentraciones de PM₁₀ sólo durante tres meses del año: febrero, noviembre y diciembre, de los cuales todos rebasaron el LMP establecido en la NOM. La concentración máxima se registró en diciembre con 84.38 µg/m³, mientras que la concentración mínima (rebasando la NOM) se registró en febrero con 51.39 µg/m³.

4.2.2.6 Estación SC

La gráfica 61 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 61 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SC en el año 2012



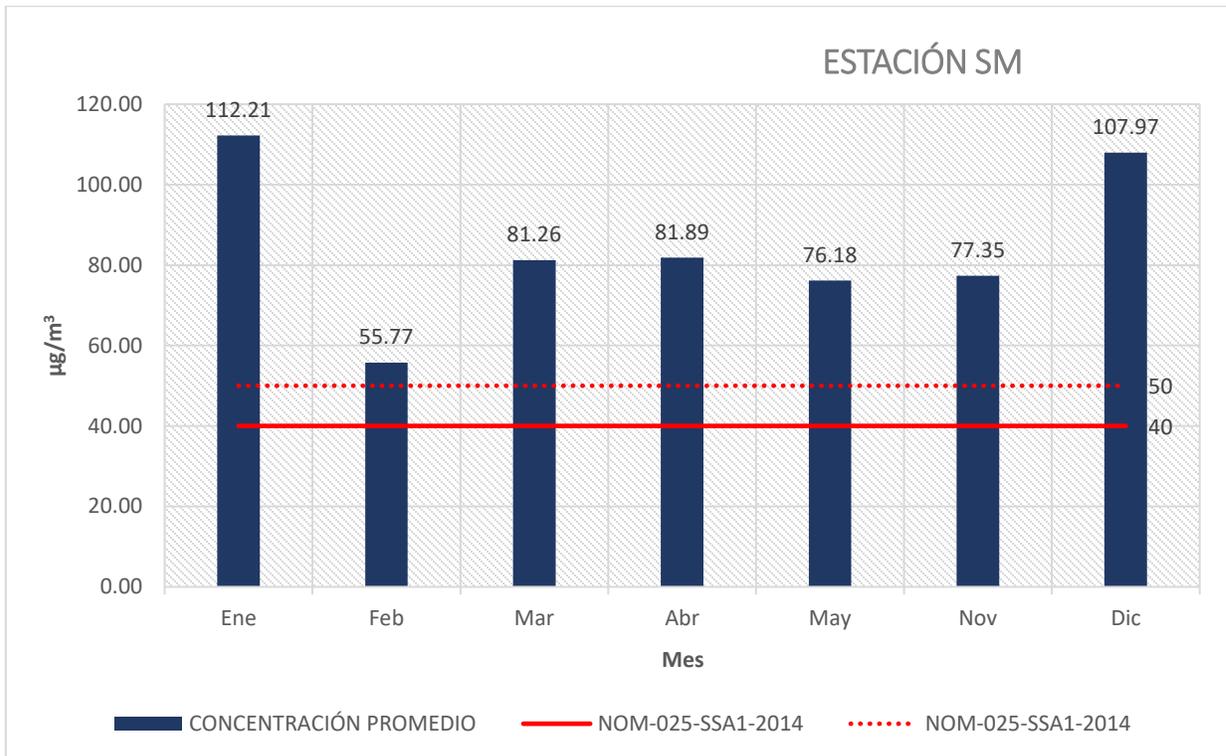
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 61 se observa que la estación SC registró concentraciones de PM₁₀ únicamente en cinco meses del año: enero, febrero, marzo, abril y mayo, de los cuales en todos se rebasó el LMP establecido en la NOM. La concentración máxima se registró en enero con 162.12 µg/m³, mientras que la concentración mínima (aún rebasando la NOM), se registró en febrero con 80.99 µg/m³.

4.2.2.7 Estación SM

La gráfica 62 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 62 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SM en el año 2012



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2012.

En la gráfica 62 se observa que la estación SM registró concentraciones de PM₁₀ únicamente en siete meses del año: enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre, de los cuales en todos se rebasó el LMP establecido en la NOM. La concentración máxima se registró en enero con 112.21 µg/m³, mientras que la concentración mínima (aún rebasando la NOM), se registró en febrero con 55.77 µg/m³.

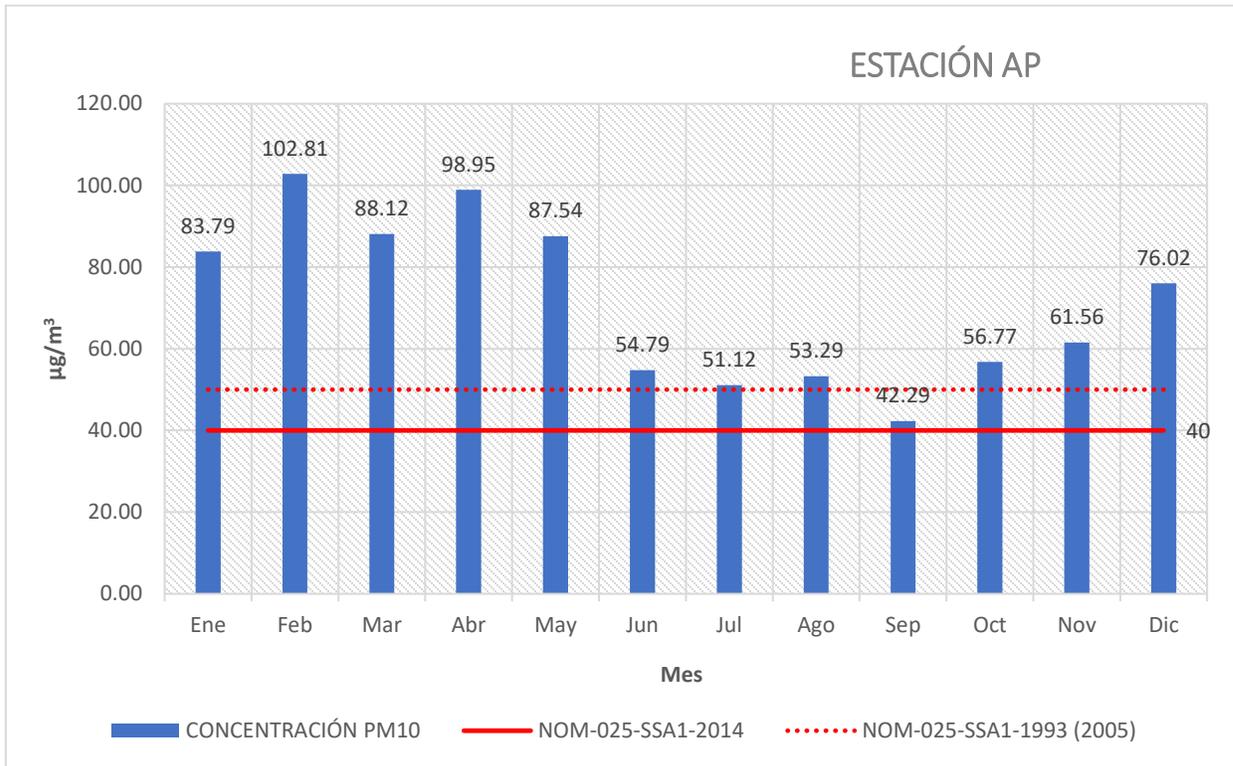
4.2.3 PM₁₀/mensual por estación en el año 2013

Se presentan las gráficas de cada estación de la RAMA-ZMVT para observar el comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ durante cada uno de los 12 meses del año 2013, e identificar las estaciones que registran las concentraciones fuera del LMP de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un valor de 40 µg/m³ (anual) para la protección de la salud.

4.2.3.1 Estación AP

La gráfica 63 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 63 Concentraciones PM₁₀ por mes estación AP en el año 2013



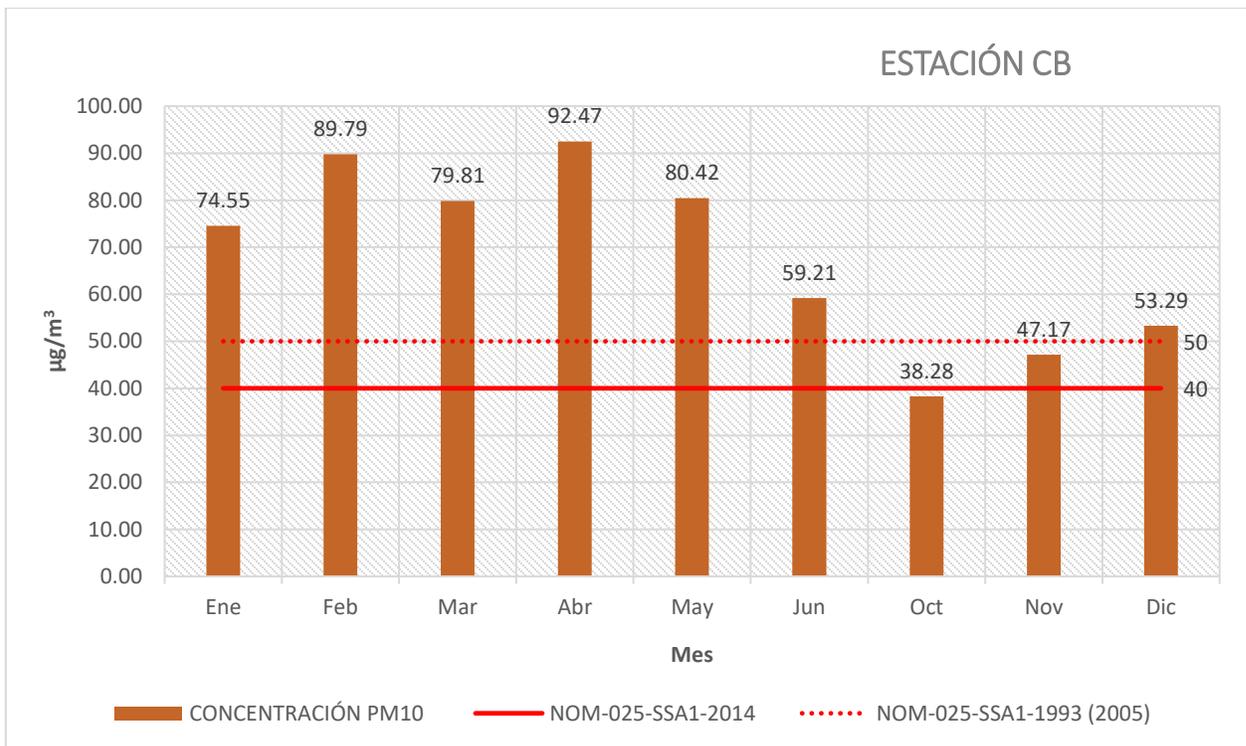
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 63 se observa que la estación AP registró concentraciones fuera del LMP establecido en la NOM durante los doce meses del año. Las concentraciones más elevadas se presentaron en los meses de enero y febrero, así como marzo, abril y mayo. La concentración máxima se registró en el mes febrero con 102.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentración mínima (rebasando la NOM), se registró en el mes de septiembre con 42.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.2.3.2 Estación CB

La gráfica 64 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 64 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CB en el año 2013



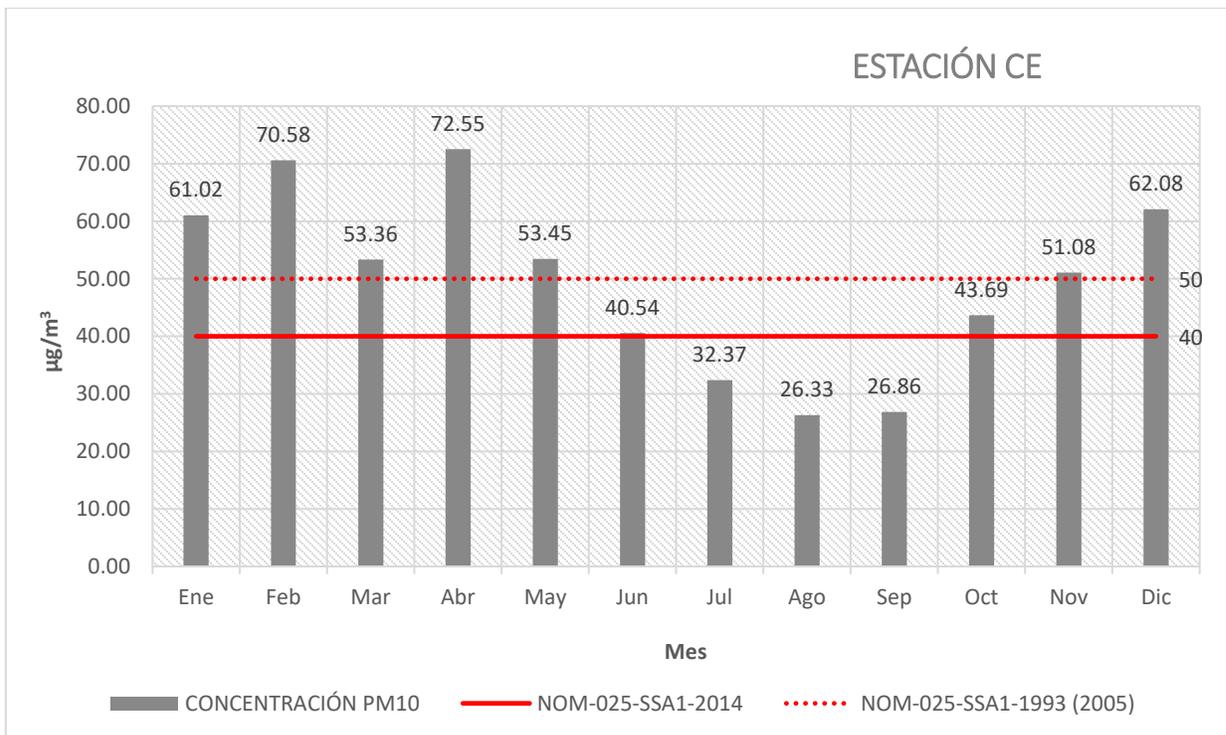
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 64 se observa que la estación CB registró concentraciones sólo para ocho meses: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, octubre, noviembre y diciembre. Las concentraciones rebasaron el LMP de la NOM durante casi todos los meses, excepto en el mes de octubre. La concentración máxima se presentó en el mes de abril con 92.47 µg/m³, mientras que la concentración mínima se presentó en el mes de octubre con 38.28 µg/m³.

4.2.3.3 Estación CE

La gráfica 65 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Toluca Centro (CE) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 65 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CE en el año 2013



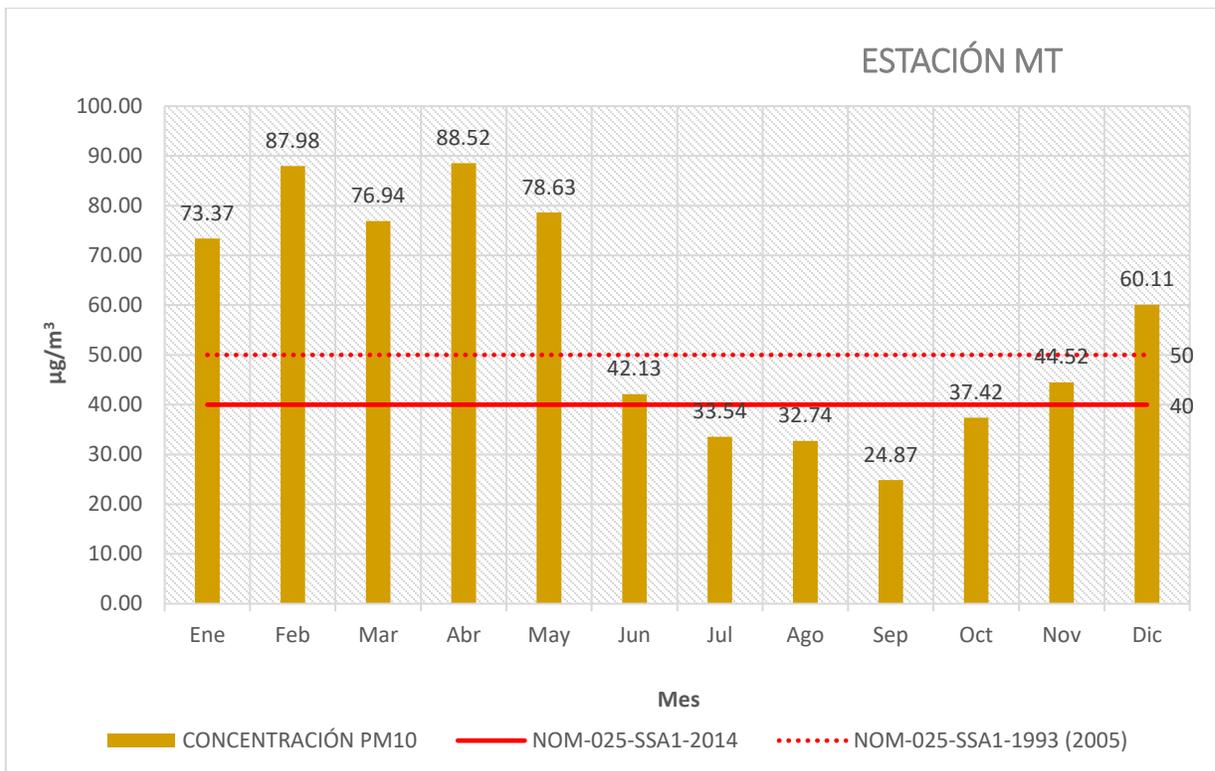
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 65 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP durante nueve meses en la estación CE, estos fueron enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio, posteriormente presentaron nuevamente un incremento los meses de octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en el mes de abril con 72.55 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en julio, agosto y septiembre, presentándose la concentración mínima en el mes de agosto con 26.33 µg/m³.

4.2.3.4 Estación MT

La gráfica 66 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Metepec (MT) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 66 Concentración PM₁₀ por mes estación MT en el año 2013



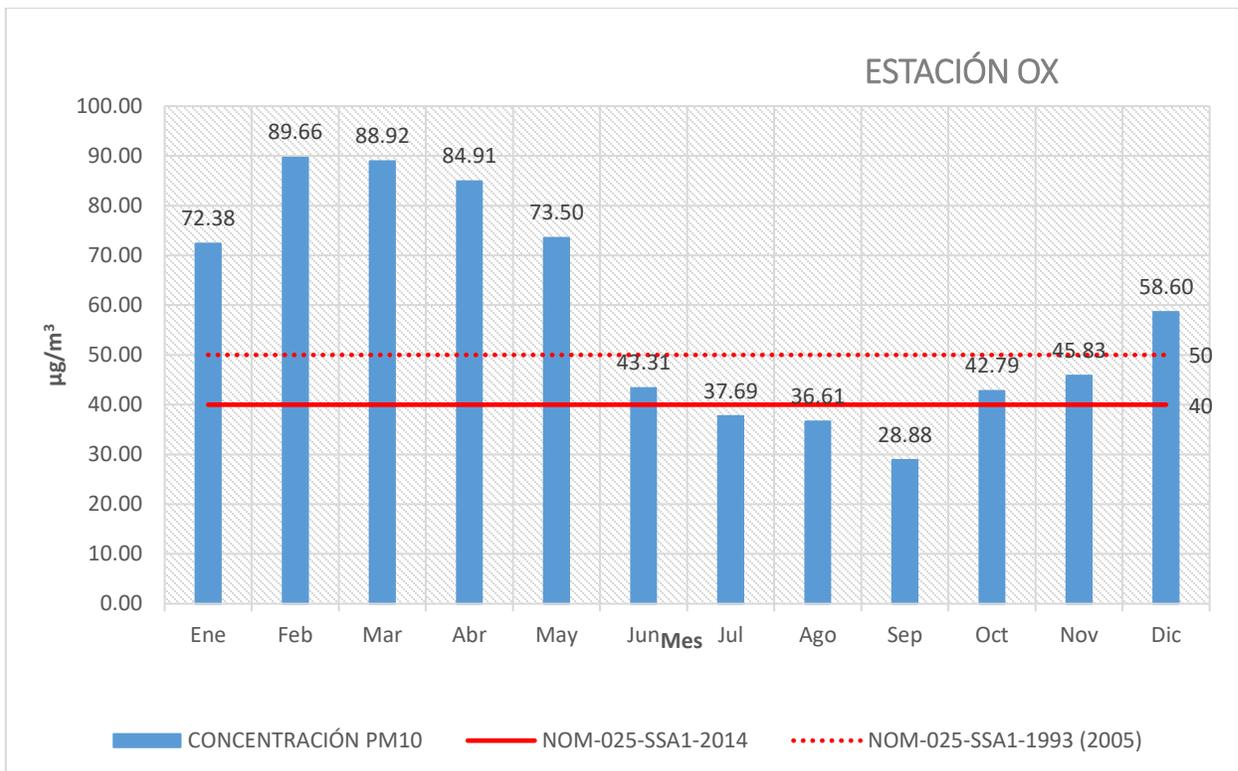
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 66 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM durante ocho meses: enero y febrero, marzo, abril y mayo; y posteriormente en noviembre y diciembre. La concentración máxima se presentó en el mes de abril con 88.52 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en julio, agosto, septiembre y octubre. La concentración mínima se registró en septiembre con 24.87 µg/m³.

4.2.3.5 Estación OX

La gráfica 67 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 67 Concentraciones PM₁₀ por mes estación OX en el año 2013



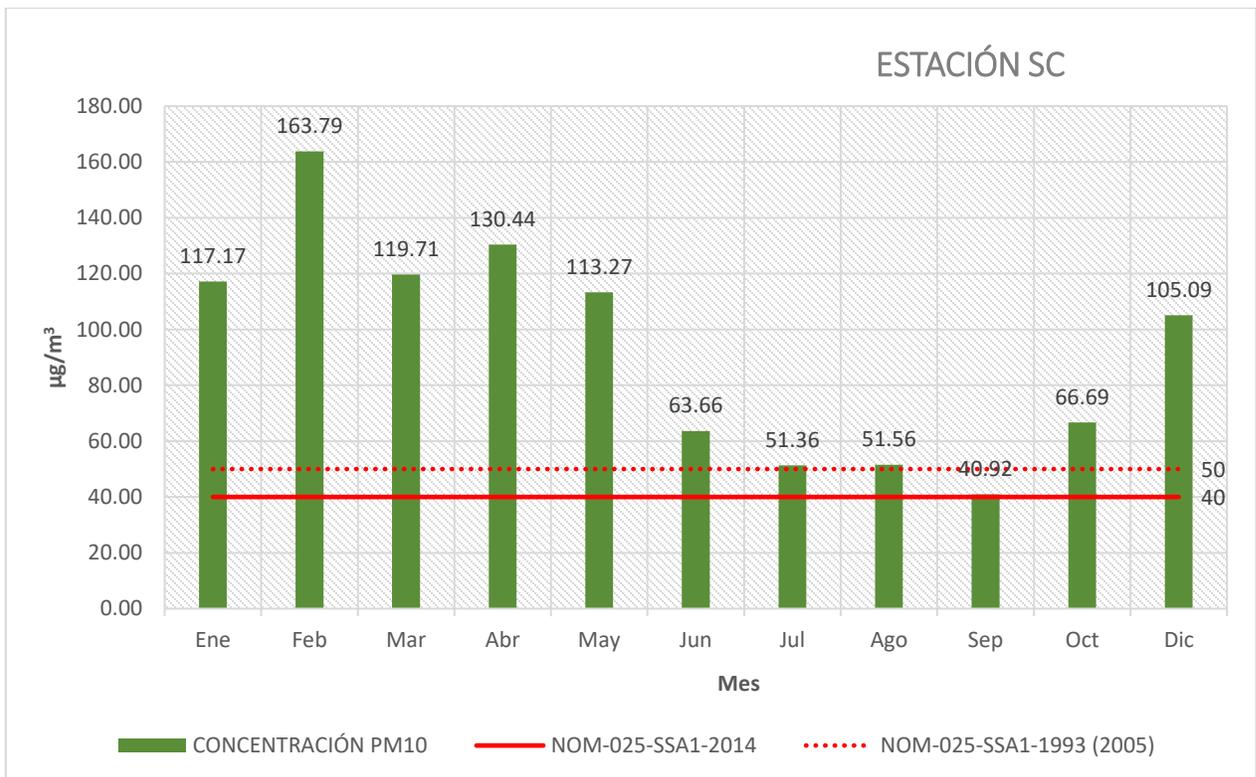
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 67 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido por la NOM durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y ligeramente en junio, posteriormente se incrementan nuevamente en octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en el mes de febrero con 89.66 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en julio, agosto y septiembre, siendo este último el que reportó la concentración mínima con 28.88 µg/m³.

4.2.3.6 Estación SC

La gráfica 68 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 68 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SC en el año 2013



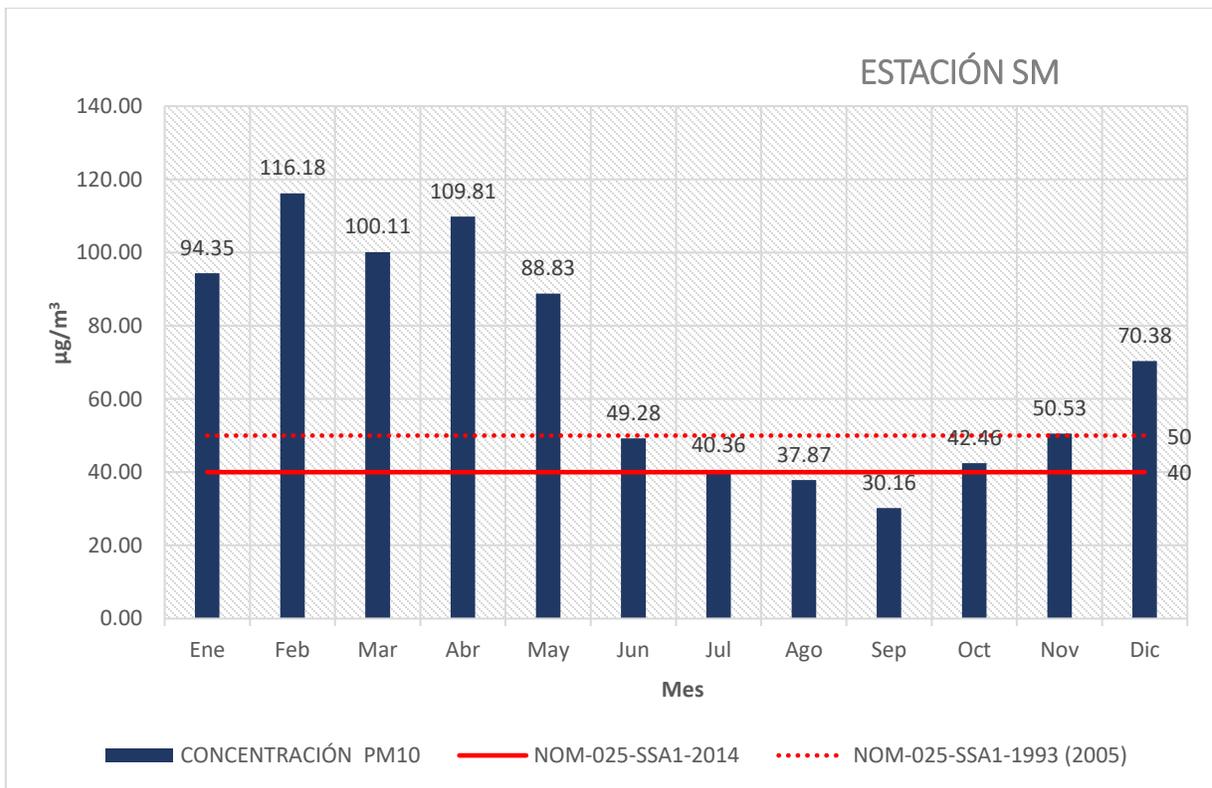
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 68 se observa que la estación SC no registró concentraciones durante el mes de noviembre. Las concentraciones de PM₁₀ rebasaron la NOM en los once meses reportados por la estación SC. La concentración máxima se registró en el mes de febrero con 163.79 µg/m³, mientras que las concentraciones más bajas (rebasando la NOM) se presentaron en los meses de julio, agosto y septiembre, siendo éste último el mes que presentó la concentración mínima con 40.92 µg/m³.

4.2.3.7 Estación SM

La gráfica 69 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 69 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SM en el año 2013



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2013.

En la gráfica 69 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM en los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo, posteriormente se presenta un incremento en los meses de octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en el mes de febrero con 116.18 µg/m³, mientras que las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en agosto y septiembre, presentándose en este último la concentración mínima con 30.16 µg/m³.

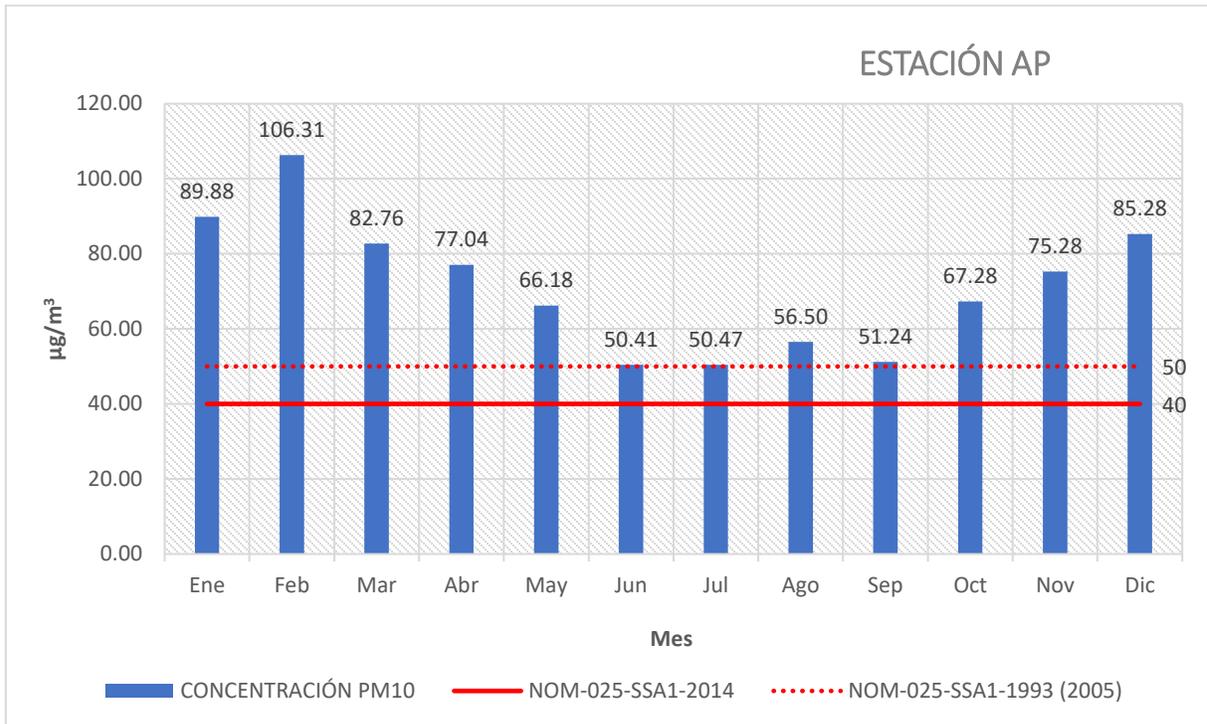
4.2.4 PM₁₀/mensual por estación en el año 2014

Se presentan las gráficas de cada estación de la RAMA-ZMVT para observar el comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ durante cada uno de los 12 meses del año 2014, e identificar las estaciones que registran las concentraciones fuera del LMP de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un valor de 40 µg/m³ (anual) para la protección de la salud.

4.2.4.1 Estación AP

La gráfica 70 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 70 Concentraciones PM₁₀ por mes estación AP en el año 2014



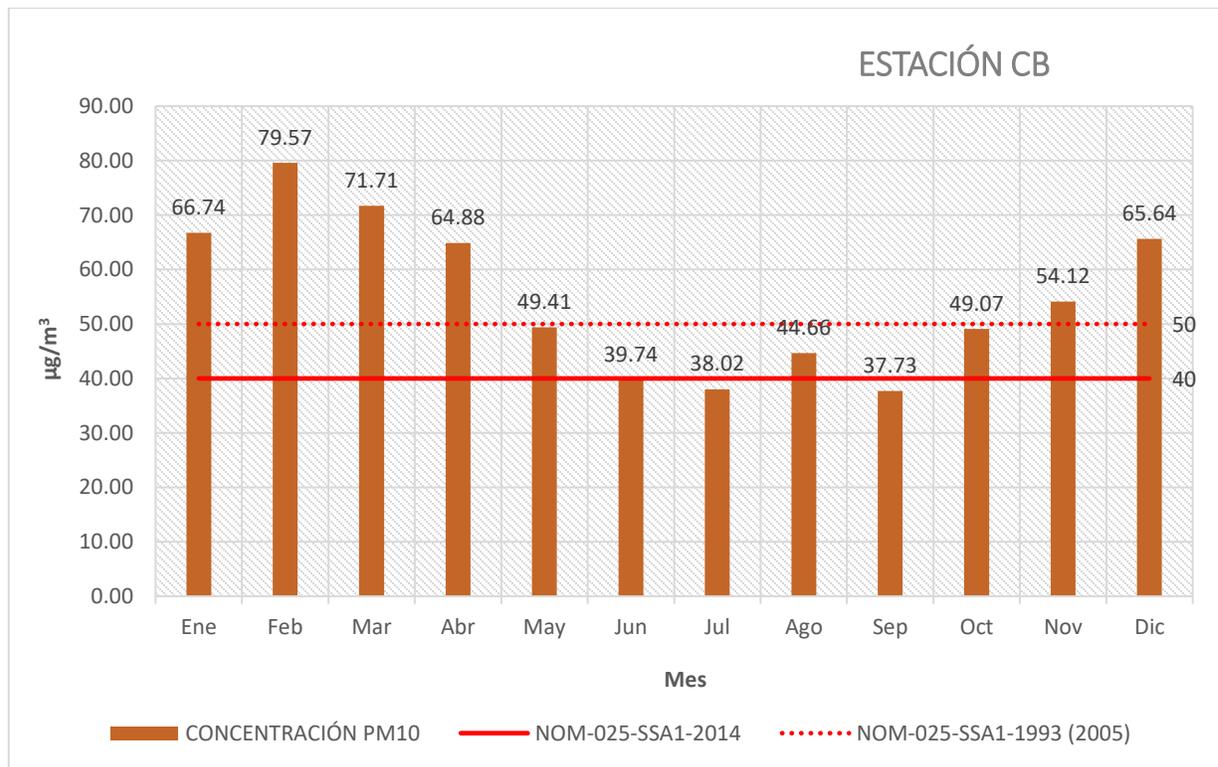
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 70 se observa que las concentraciones rebasaron la NOM durante todos los meses de enero a diciembre. Las concentraciones más elevadas se presentaron en los meses de enero y febrero; marzo y abril, así como octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se presentó en el mes de febrero con 106.31 µg/m³, mientras que, las concentraciones más bajas (rebasando la NOM) se presentaron en junio, julio, agosto y septiembre. La concentración mínima se registró en junio con 50.41 µg/m³.

4.2.4.2 Estación CB

La gráfica 71 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta los datos registrados de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 71 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CB en el año 2014



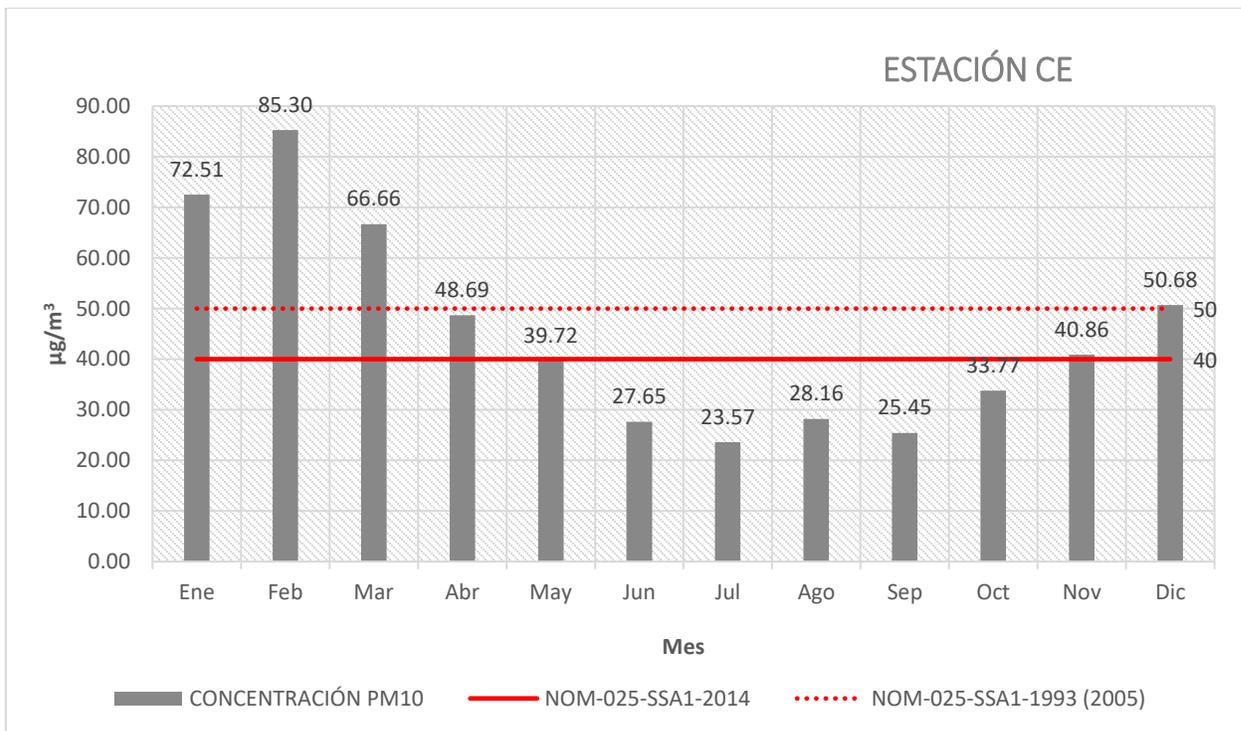
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 71 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM por encima del límite establecido por la NOM se registraron en los meses de enero y febrero; marzo, abril, y mayo, posteriormente se presenta nuevamente un incremento de las concentraciones en los meses de octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en el mes de febrero con 79.57 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en junio, julio y septiembre, éste último presentó la concentración mínima con 37.73 µg/m³.

4.2.4.3 Estación CE

La gráfica 72 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Toluca Centro (CE) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 72 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CE en el año 2014



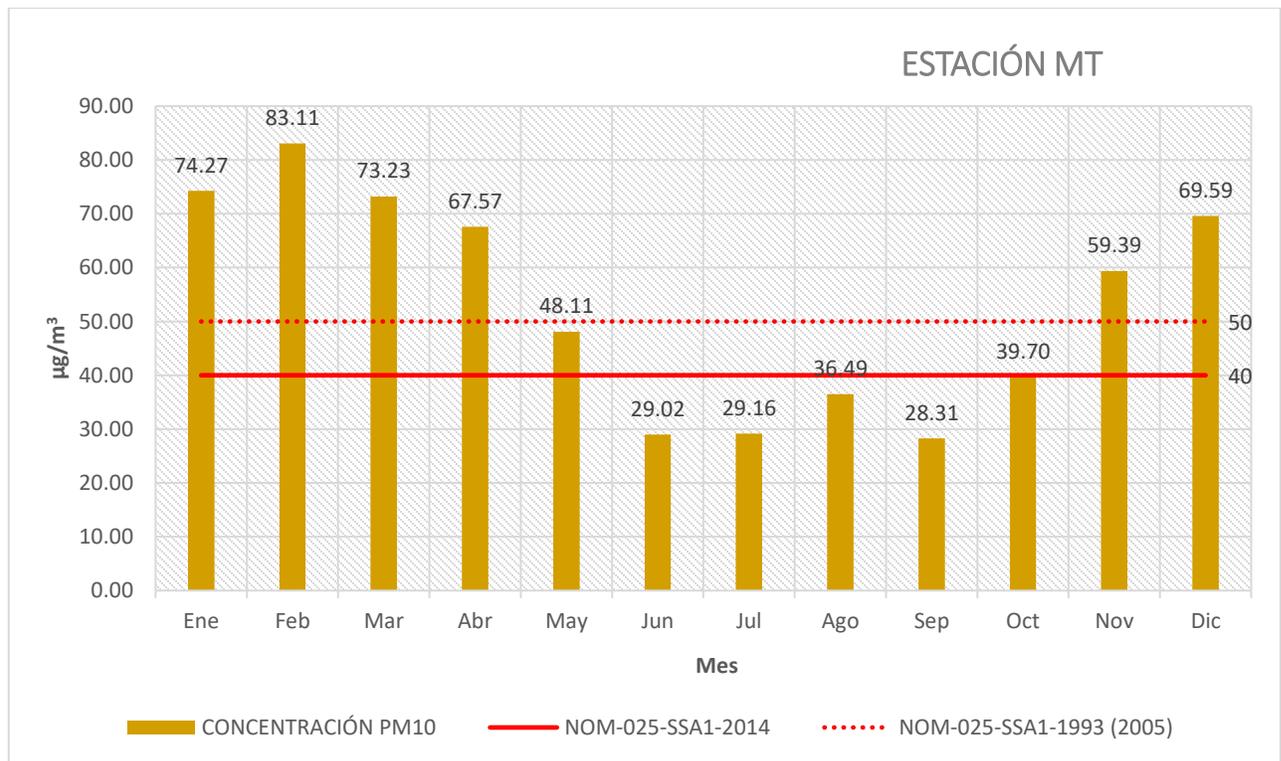
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 72 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero y febrero, marzo y abril, así como noviembre y diciembre, presentando la concentración máxima el mes de febrero con 85.30 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. La concentración mínima se registró en julio con 23.57 µg/m³.

4.2.4.4 Estación MT

La gráfica 73 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Metepec (MT) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 73 Concentraciones PM₁₀ mensual estación MT en el año 2014



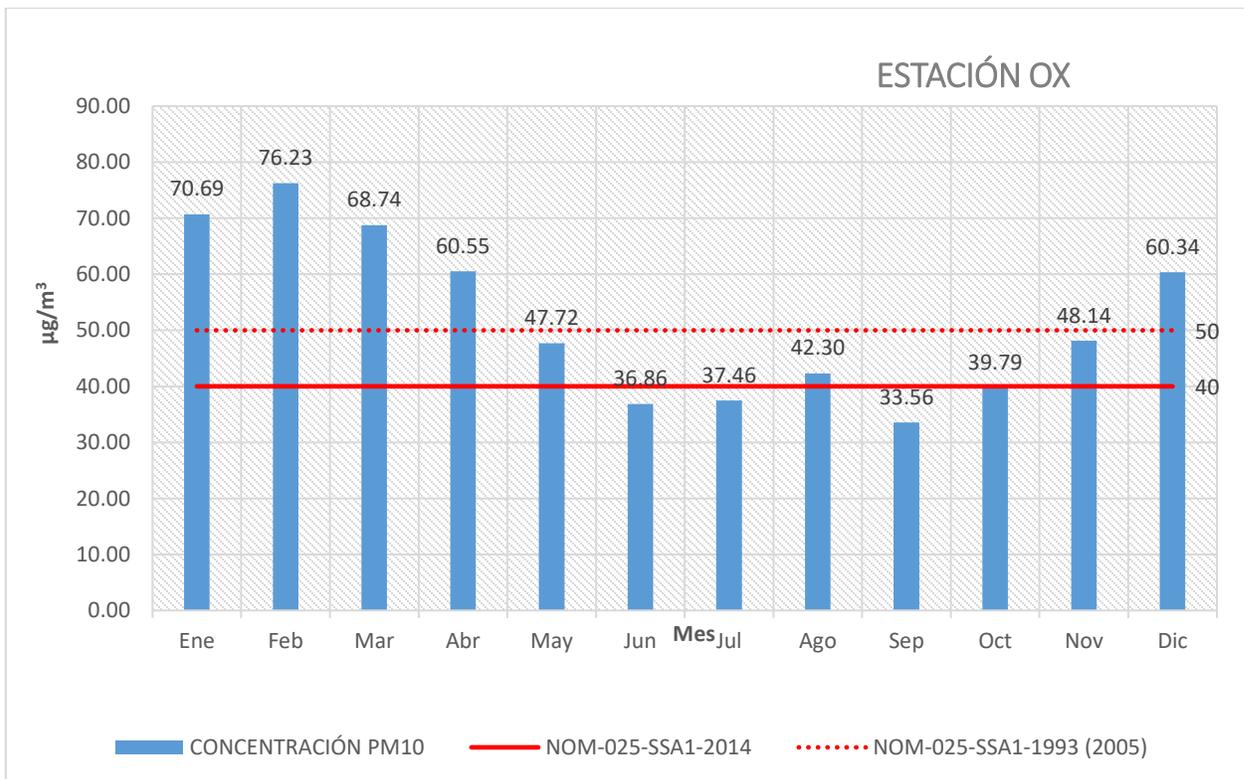
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 73 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero y febrero, marzo, abril y mayo con un incremento en noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en el mes de febrero con 83.11 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en junio, julio, agosto, septiembre y octubre. La concentración mínima se registró en septiembre con 28.31 µg/m³.

4.2.4.5 Estación OX

La gráfica 74 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 74 Concentraciones PM₁₀ por mes estación OX en el año 2014



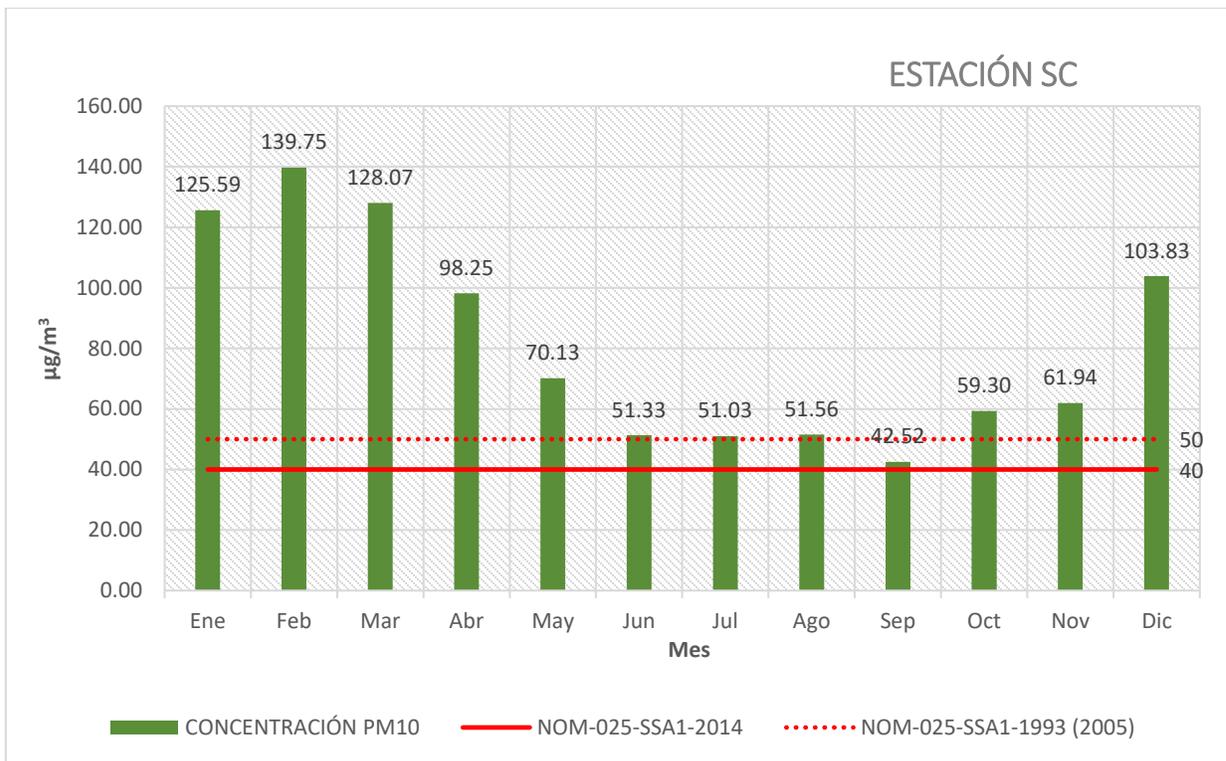
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 74 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero y febrero, marzo, abril y mayo, así como noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en el mes de febrero con 76.23 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en junio, julio, septiembre y octubre. La concentración mínima se registró en septiembre con 33.56 µg/m³.

4.2.4.6 Estación SC

La gráfica 75 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 75 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SC en el año 2014



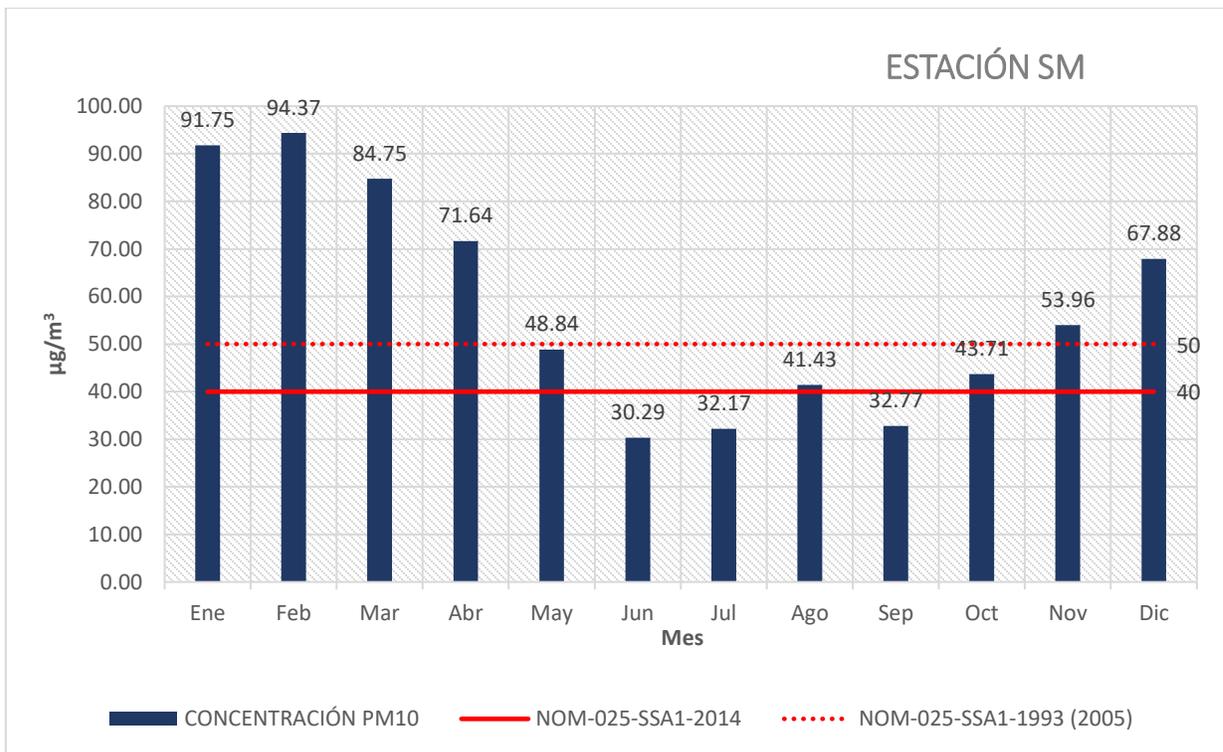
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 75 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM durante doce meses, siendo notorios los meses de enero y febrero, marzo, abril y mayo, así como diciembre. La concentración máxima se registró en el mes de febrero con 139.75 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones más bajas de PM₁₀ (rebasando la NOM) se registraron en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre. La concentración mínima se presentó en septiembre con 42.52 µg/m³.

4.2.4.7 Estación SM

La gráfica 76 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 76 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SM en el año 2014



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2014.

En la gráfica 75 se observa que las concentraciones de PM₁₀ rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero y febrero, marzo, abril y mayo, así como noviembre y diciembre. La concentración máxima se presentó en el mes de febrero con 94.37 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en junio, julio y septiembre. La concentración mínima se registró en junio con 30.29 µg/m³.

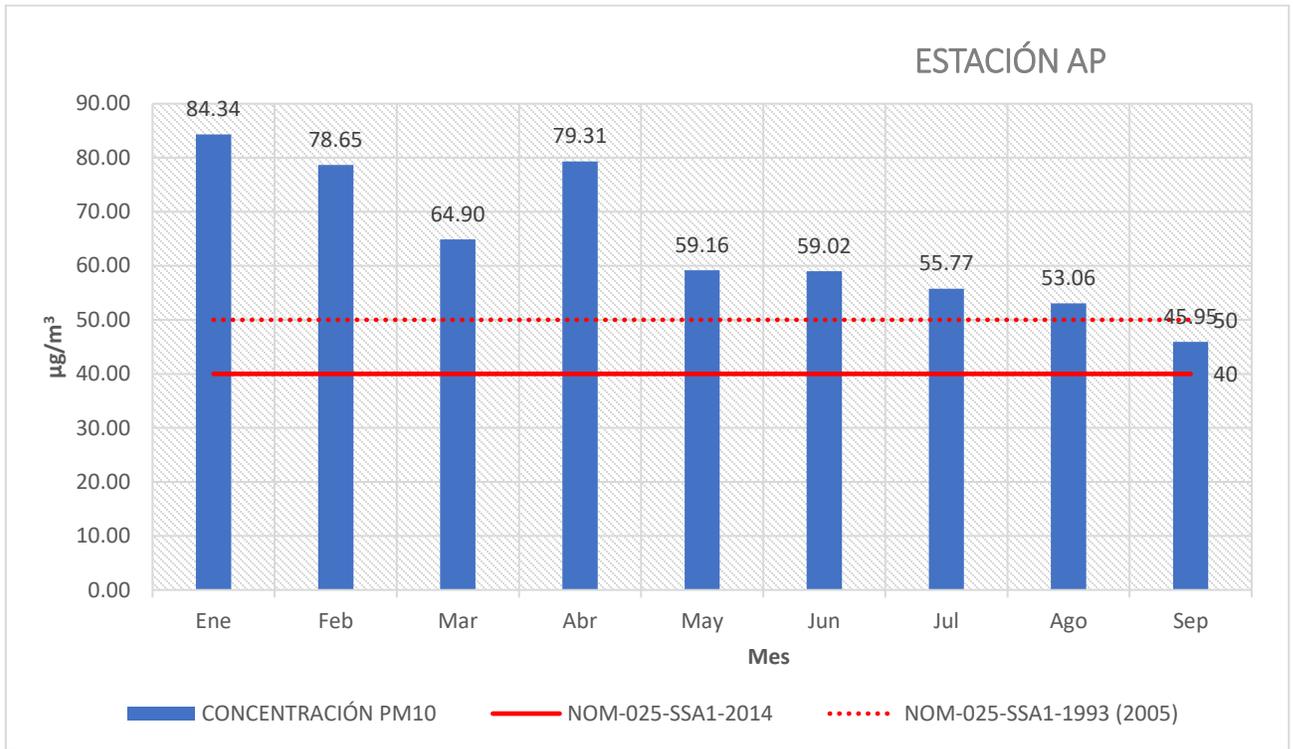
4.2.PM₁₀/mensual por estación en el año 2015

Se presentan las gráficas de cada estación de la RAMA-ZMVT para observar el comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ durante cada uno de los 12 meses del año 2015, e identificar las estaciones que registran las concentraciones fuera del LMP de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un valor de 40 µg/m³ (anual) para la protección de la salud.

4.2.5.1 Estación AP

La gráfica 77 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Aeropuerto (AP) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 77 Concentraciones PM₁₀ por mes estación AP en el año 2015



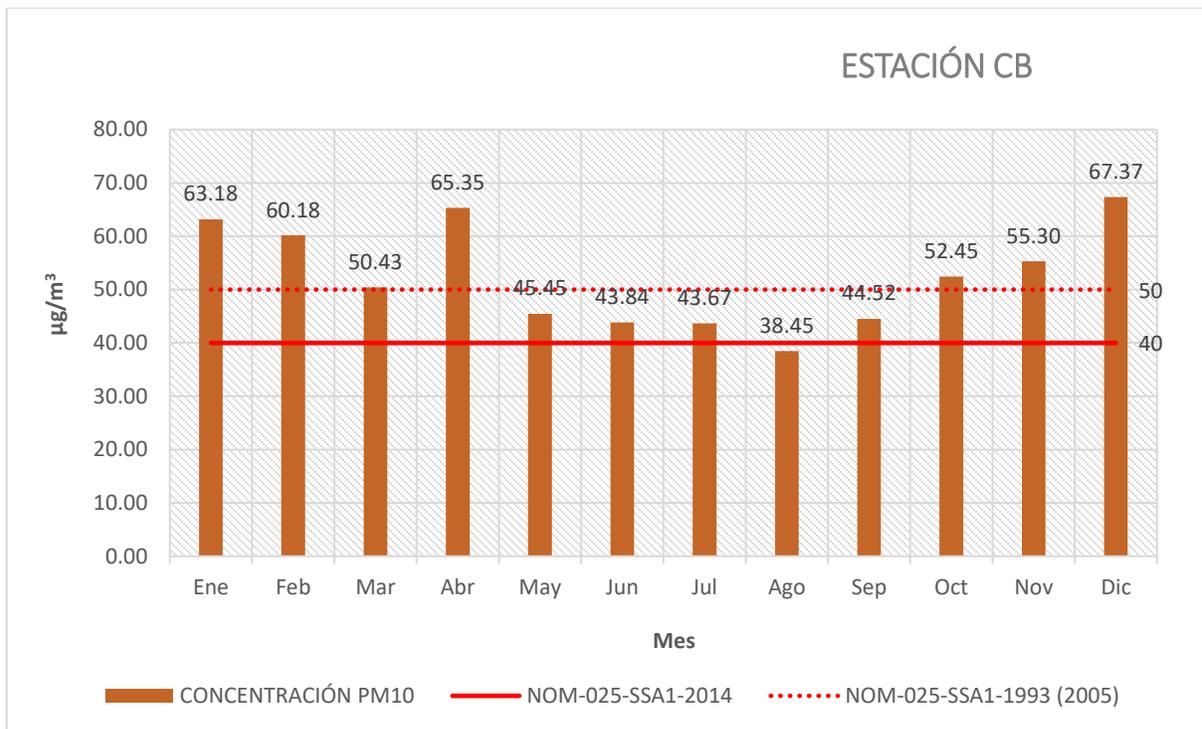
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 77 se observa que la estación AP registró concentraciones de PM₁₀ durante nueve meses: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Todos los meses rebasaron el LMP establecido en la NOM de PM₁₀. La concentración máxima se registró en el mes de enero con 84.34 µg/m³, mientras que la concentración mínima (rebasando la NOM) se registró en septiembre con 45.95 µg/m³.

4.2.5.2 Estación CB

La gráfica 78 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 78 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CB en el año 2015



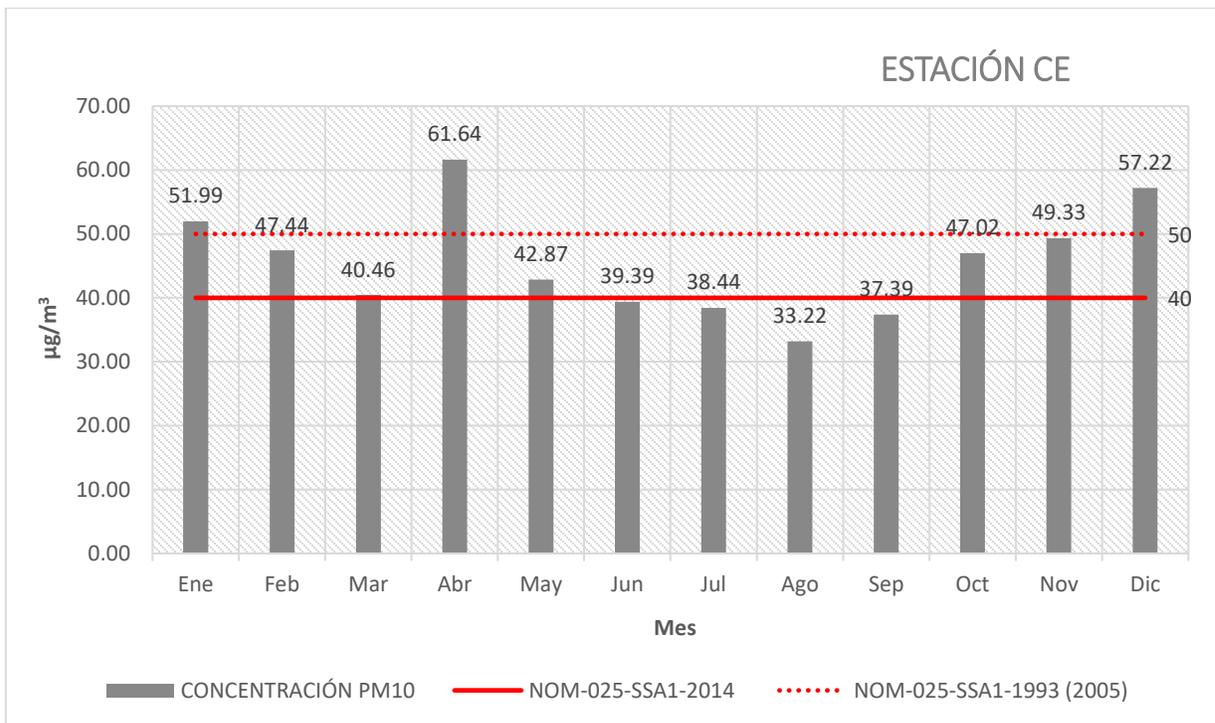
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 78 se observa que la estación CB registró concentraciones de PM₁₀ que rebasaron el LMP establecido en la NOM durante once meses del año. La concentración máxima se registró en el mes de abril con 65.35 µg/m³. Por otro lado, la concentración mínima, se registró en agosto con 38.45 µg/m³ valor por debajo del LMP de la NOM.

4.2.5.3 Estación CE

La gráfica 79 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Toluca Centro (CE) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 79 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CE en el año 2015



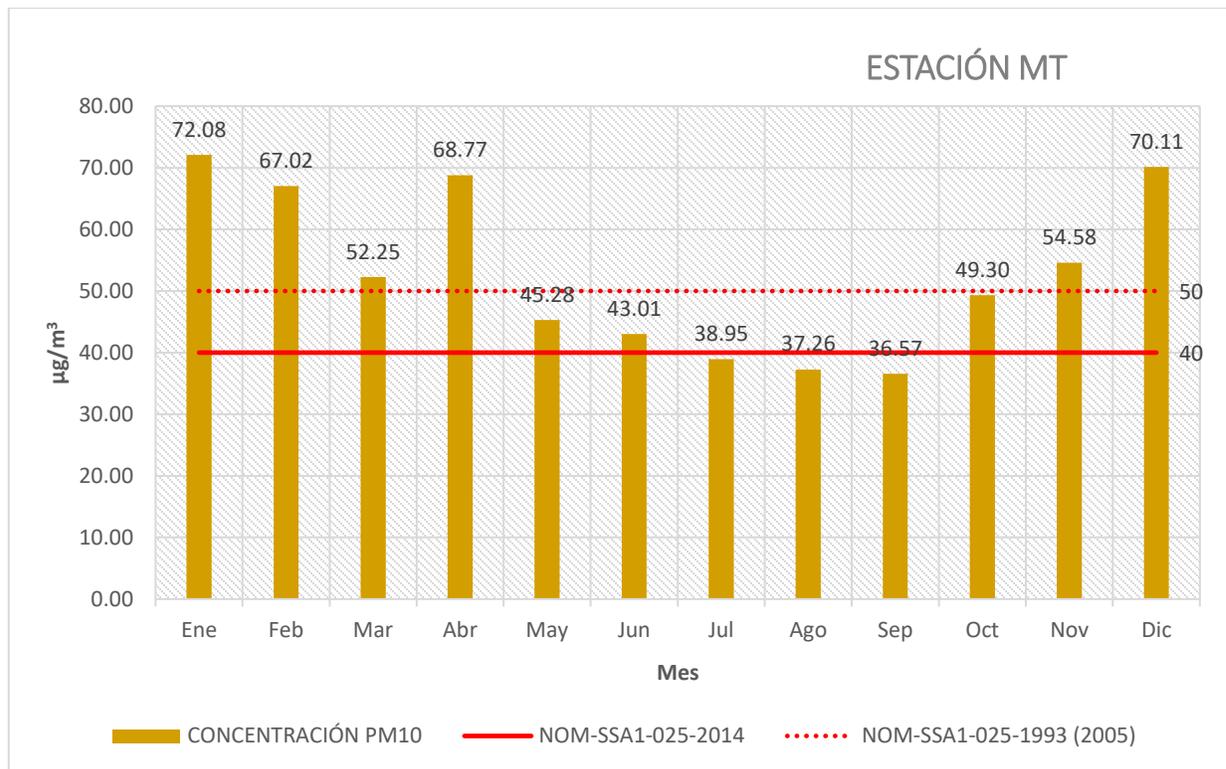
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 79 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo, incrementándose nuevamente en los meses de octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en abril con 61.64 µg/m³. Las concentraciones por debajo del LMP de la NOM se registraron en junio, julio, agosto y septiembre, de los cuales agosto fue el mes en el que se registró la concentración mínima con 33.22 µg/m³.

4.2.5.4 Estación MT

La gráfica 80 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Metepec (MT) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 80 Concentraciones PM₁₀ por mes estación MT en el año 2015



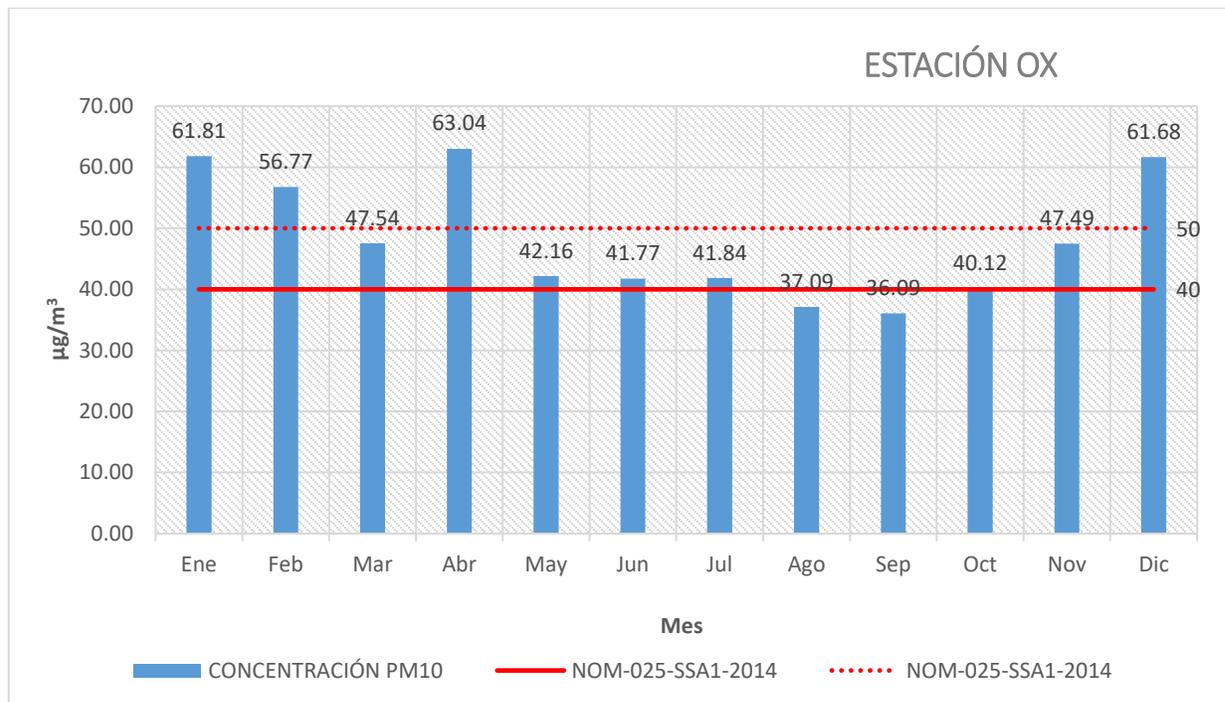
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015

En la gráfica 80 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero, febrero, marzo y abril, incrementándose nuevamente en los meses de octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en enero con 72.08 µg/m³, mientras que las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en julio, agosto y septiembre, siendo este último el mes en el cual se registró la concentración mínima de PM₁₀ con 36.57 µg/m³.

4.2.5.5 Estación OX

La gráfica 81 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 81 Concentraciones PM₁₀ por mes estación OX en el año 2015



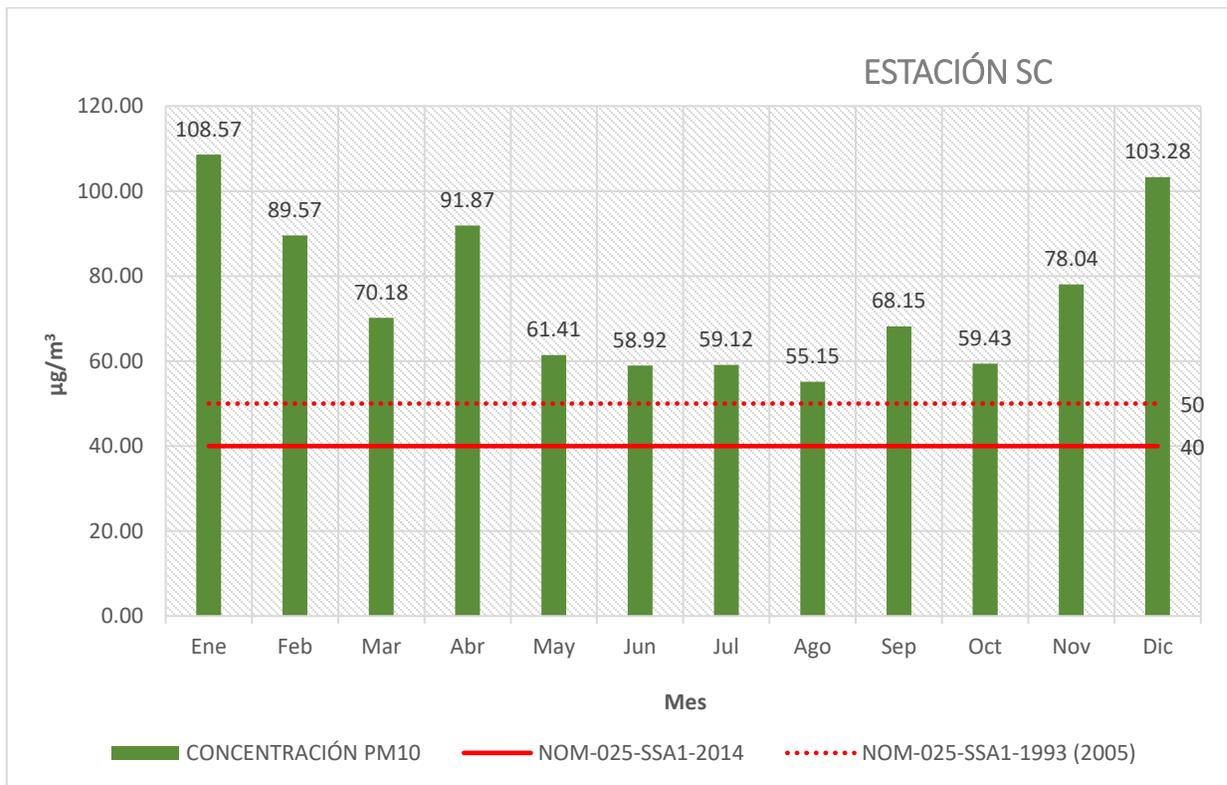
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 81 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y julio, incrementando ligeramente en octubre y en los meses de noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en abril con 63.04 µg/m³. Las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en agosto y septiembre, de los cuales septiembre registró la concentración mínima con 36.09 µg/m³.

4.2.5.6 Estación SC

La gráfica 82 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-1993 (Modificación 2005) y la NOM-025-SSA1-2014 (vigente).

Gráfica 82 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SC en el año 2015



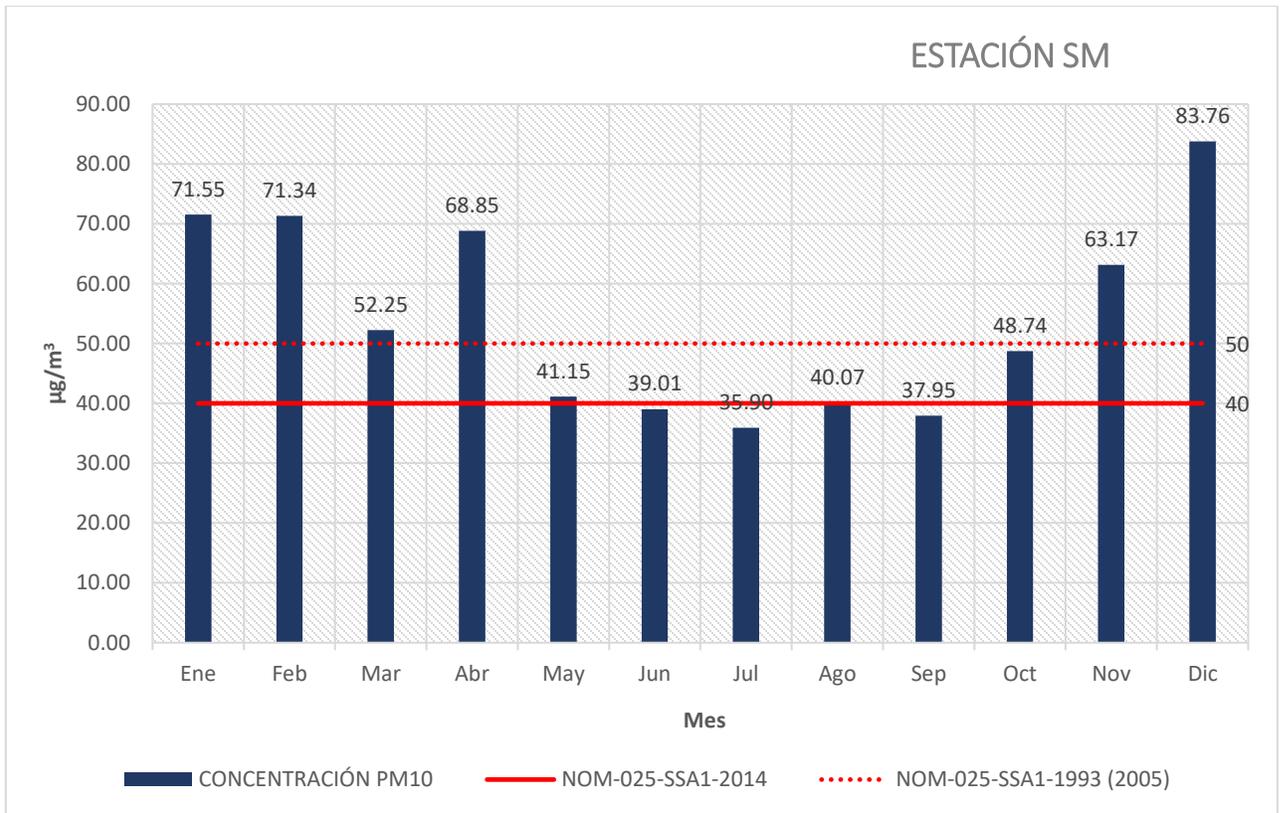
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 82 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los doce meses del año. Las concentraciones máximas se registraron en enero, abril y diciembre con 108.57 µg/m³, 91.87 µg/m³ y 103.28 µg/m³ respectivamente. Las concentraciones mínimas (rebasando la NOM) se registraron en mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre; la concentración mínima se registró en el mes de agosto con 55.15 µg/m³.

4.2.5.7 Estación SM

La gráfica 83 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2015. Se tomaron en cuenta los datos registrados de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014 (vigente).

Gráfica 83 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SM en el año 2015



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2015.

En la gráfica 83 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y agosto; incrementándose nuevamente en octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en diciembre con 83.76 µg/m³. Las concentraciones por debajo del límite de la NOM se registraron en junio, julio y septiembre. La concentración mínima se registró en el mes de julio con 35.90 µg/m³.

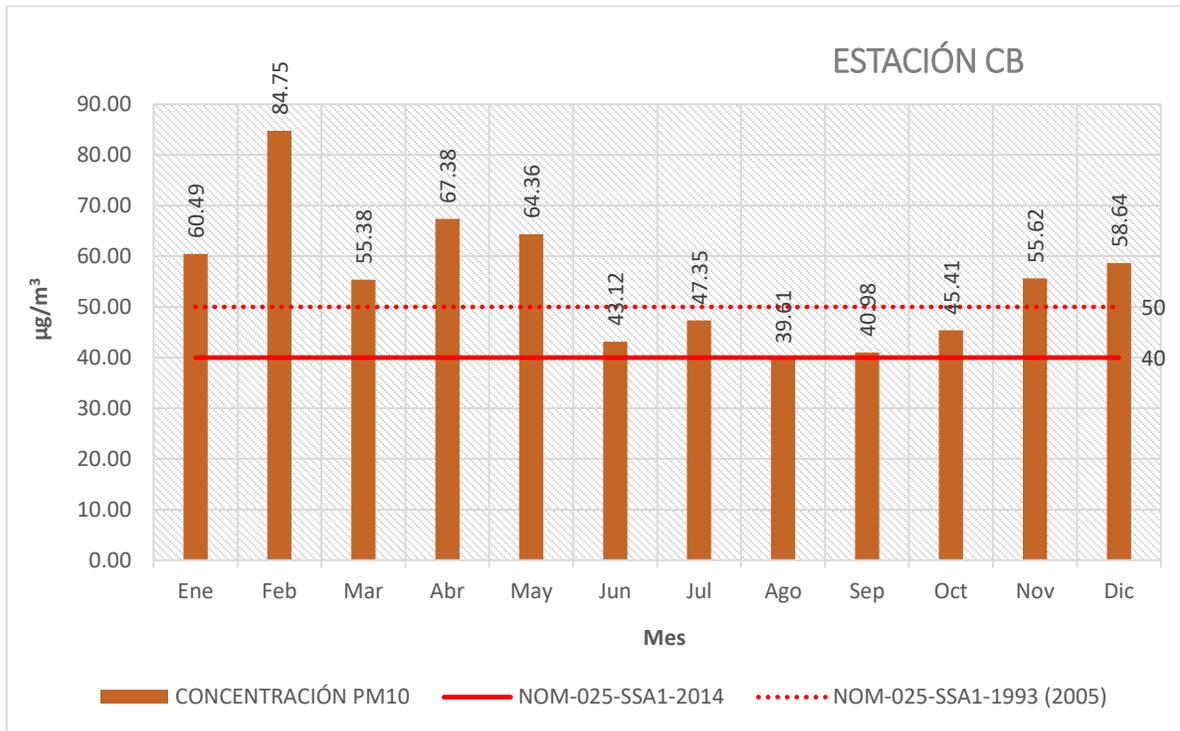
4.2.6 PM₁₀/mensual por estación en el año 2016

Se presentan las gráficas de cada estación de la RAMA-ZMVT para observar el comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ durante cada uno de los 12 meses del año 2016, e identificar las estaciones que registran las concentraciones fuera del LMP de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un valor de 40 µg/m³ (anual) para la protección de la salud.

4.2.6.1 Estación CB

La gráfica 84 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 84 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CB en el año 2016



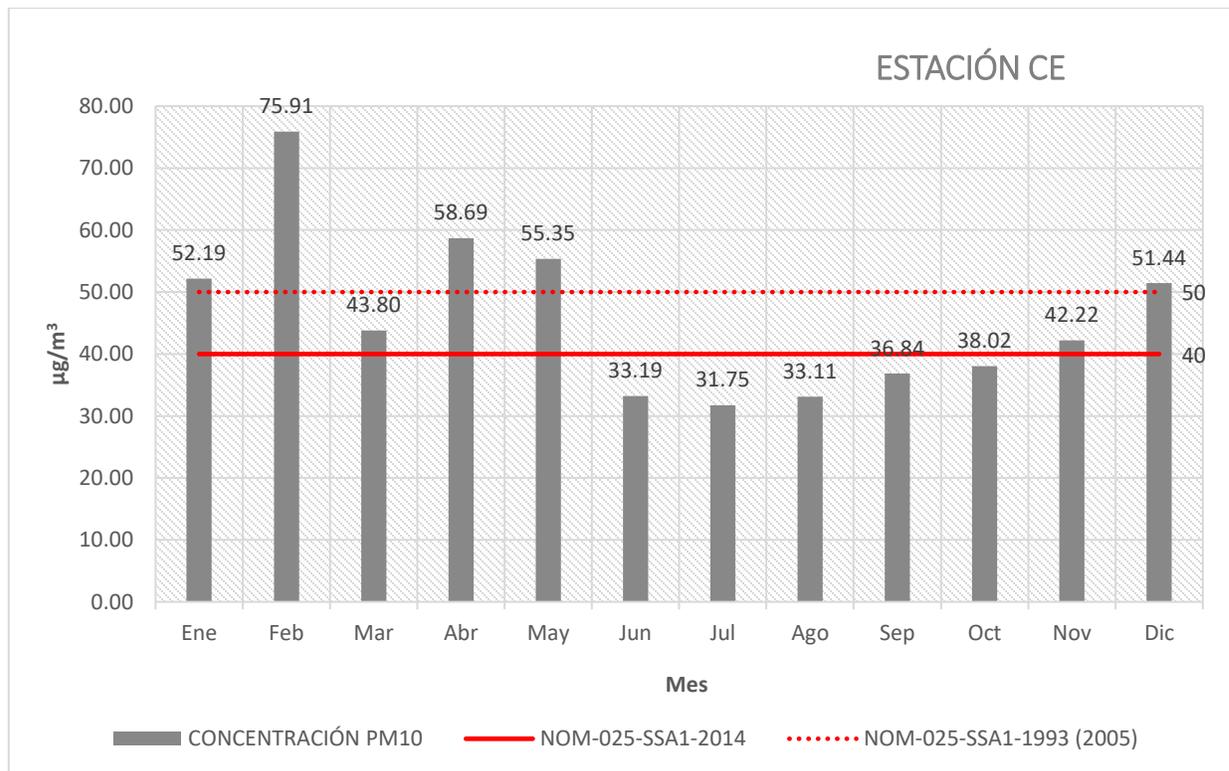
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 84 se observa que las concentraciones rebasaron el límite establecido en la NOM durante once meses del año. La concentración máxima se registró en febrero con 84.75 µg/m³, mientras que la concentración mínima se registró en agosto con 39.61 µg/m³.

4.2.6.2 Estación CE

La gráfica 85 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Toluca Centro (CE) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 85 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CE en el año 2016



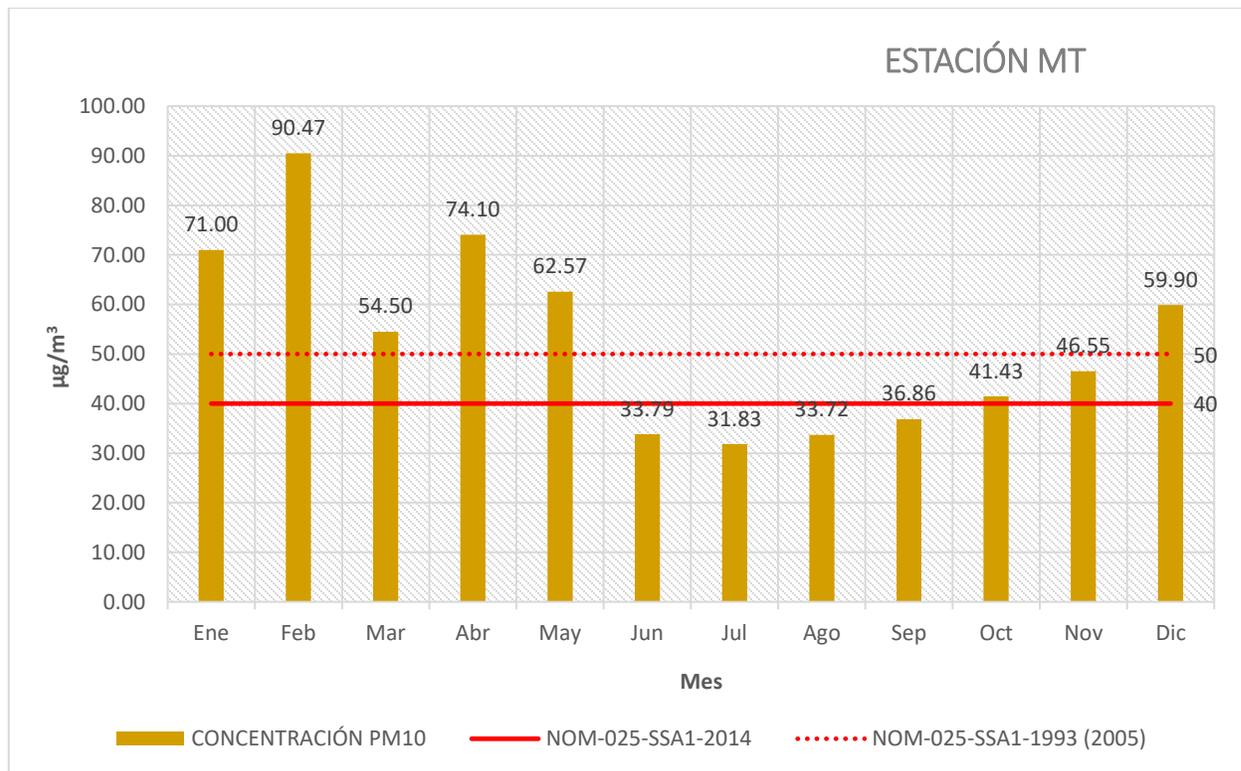
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 85 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo; incrementándose nuevamente en noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en febrero con 75.91 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre. La mínima concentración se registró en julio con 31.75 µg/m³.

4.2.6.3 Estación MT

La gráfica 86 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Metepec (MT) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 86 Concentraciones PM₁₀ por mes estación MT en el año 2016



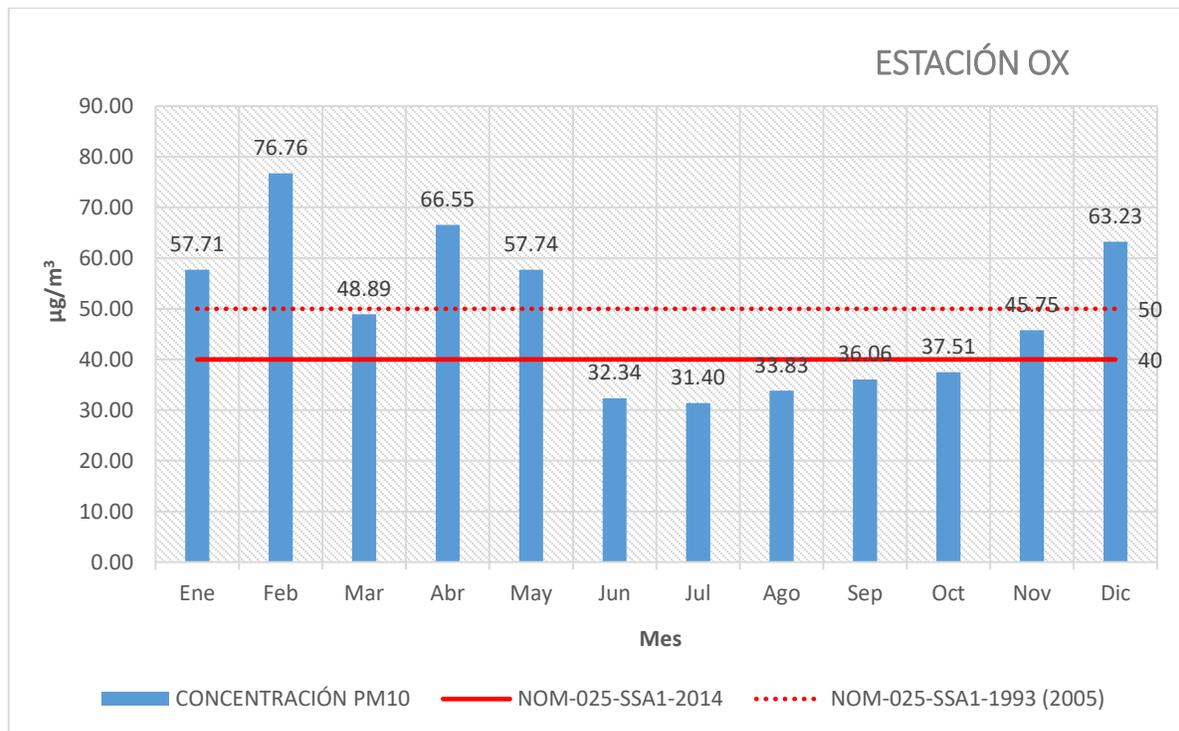
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 86 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM en los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo; incrementándose nuevamente en octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en febrero con 90.47 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, siendo julio el mes con la mínima concentración registrada con 31.83 µg/m³.

4.2.6.4 Estación OX

La gráfica 87 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 87 Concentraciones PM₁₀ por mes estación OX en el año 2016



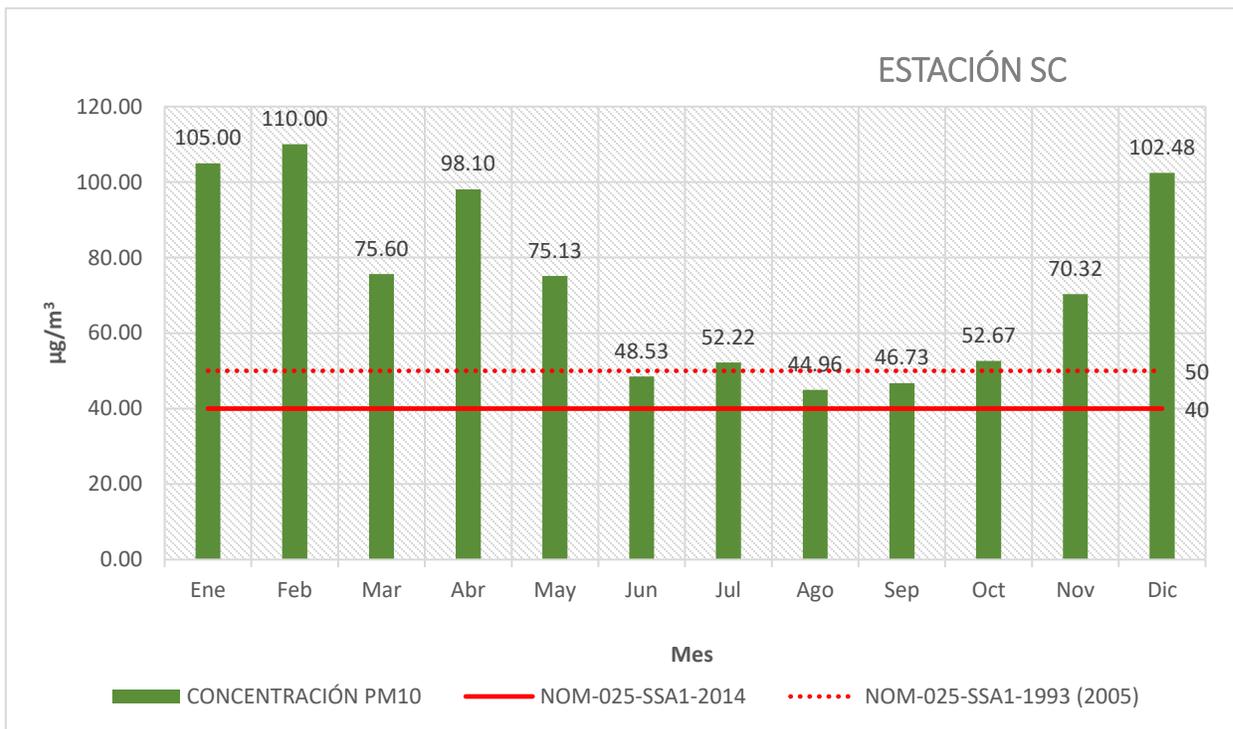
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 87 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM en los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo; incrementándose nuevamente en noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en febrero con 76.76 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre, siendo julio el mes con la mínima concentración registrada con 31.40 µg/m³.

4.2.6.5 Estación SC

La gráfica 88 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 88 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SC en el año 2016



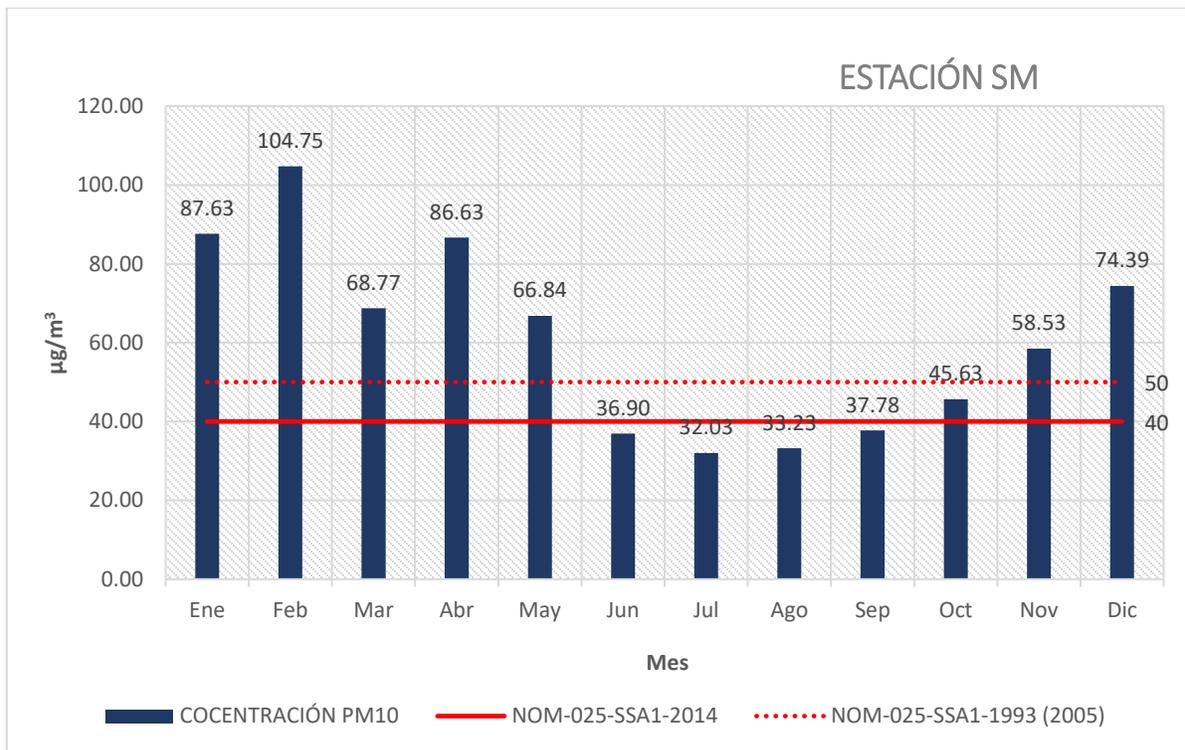
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 88 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los doce meses del año. Las concentraciones máximas se registraron en enero, febrero, abril y diciembre con 105 µg/m³, 110 µg/m³, 98.10 µg/m³ y 102.48 µg/m³ respectivamente. Por otro lado, la concentración mínima se registró en el mes de agosto con 44.96 µg/m³, sin embargo, este último aun rebasó la NOM.

4.2.6.6 Estación SM

La gráfica 89 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 89 Concentraciones PM₁₀ estación SM en el año 2016



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2016.

En la gráfica 89 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo, con otro incremento en octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en febrero 104.75 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en junio, julio, agosto y septiembre. La concentración mínima se registró en el mes de julio con 32.03 µg/m³.

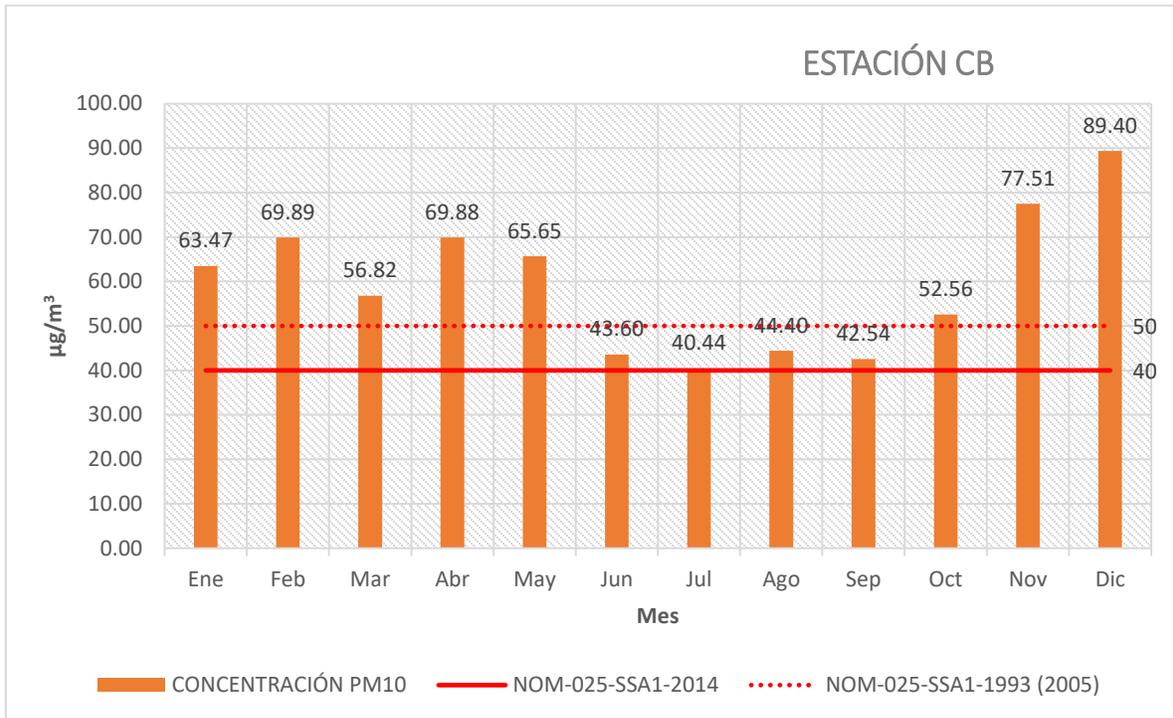
4.2.7 PM₁₀/mensual por estación en el año 2017

Se presentan las gráficas de cada estación de la RAMA-ZMVT para observar el comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ durante cada uno de los 12 meses del año 2017, e identificar las estaciones que registran las concentraciones fuera del LMP de la NOM-025-SSA1-2014 que establece un valor de 40 µg/m³ (anual) para la protección de la salud.

4.2.7.1 Estación CB

La gráfica 90 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Ceboruco (CB) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 90 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CB en el año 2017



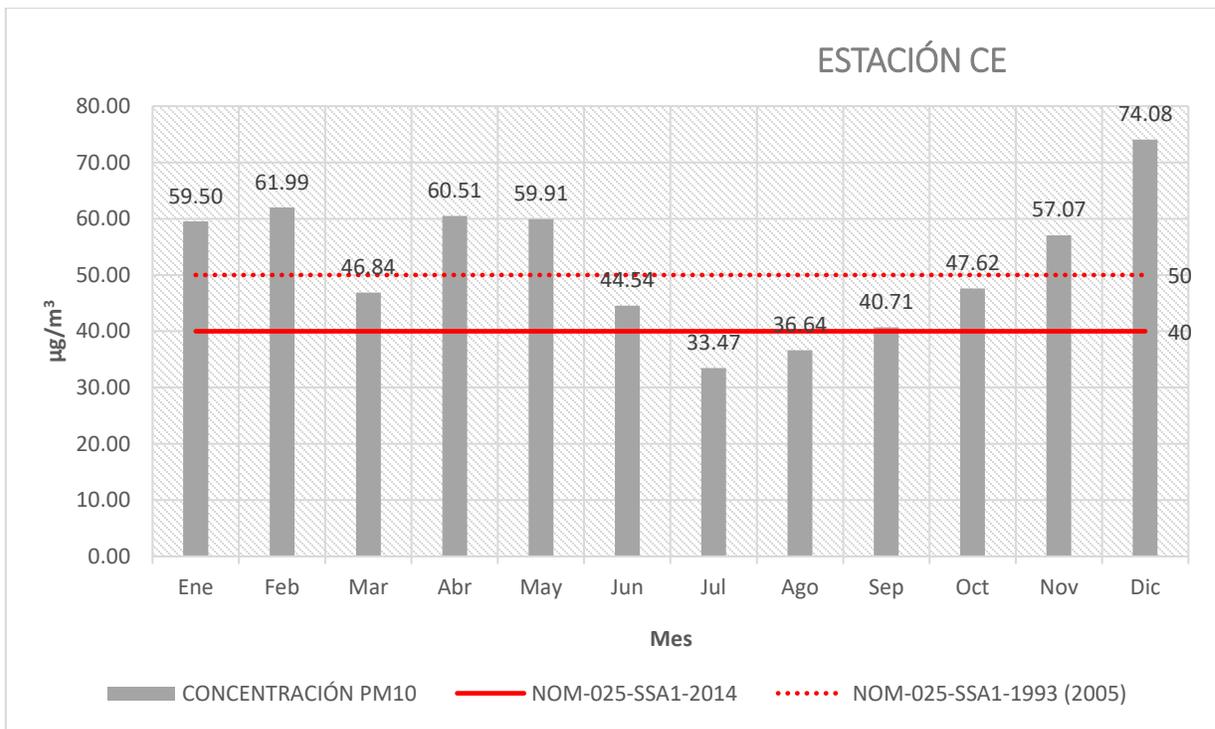
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 90 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los doce meses del año. La concentración máxima se registró en diciembre con 89.40 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones mínimas, se registraron en los meses junio, julio, agosto y septiembre, sin embargo, éstas rebasaron ligeramente el límite establecido por la NOM. La concentración mínima se presentó en el mes de julio con 40.44 µg/m³.

4.2.7.2 Estación CE

La gráfica 91 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Toluca Centro (CE) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014 (vigente).

Gráfica 91 Concentraciones PM₁₀ por mes estación CE en el año 2017



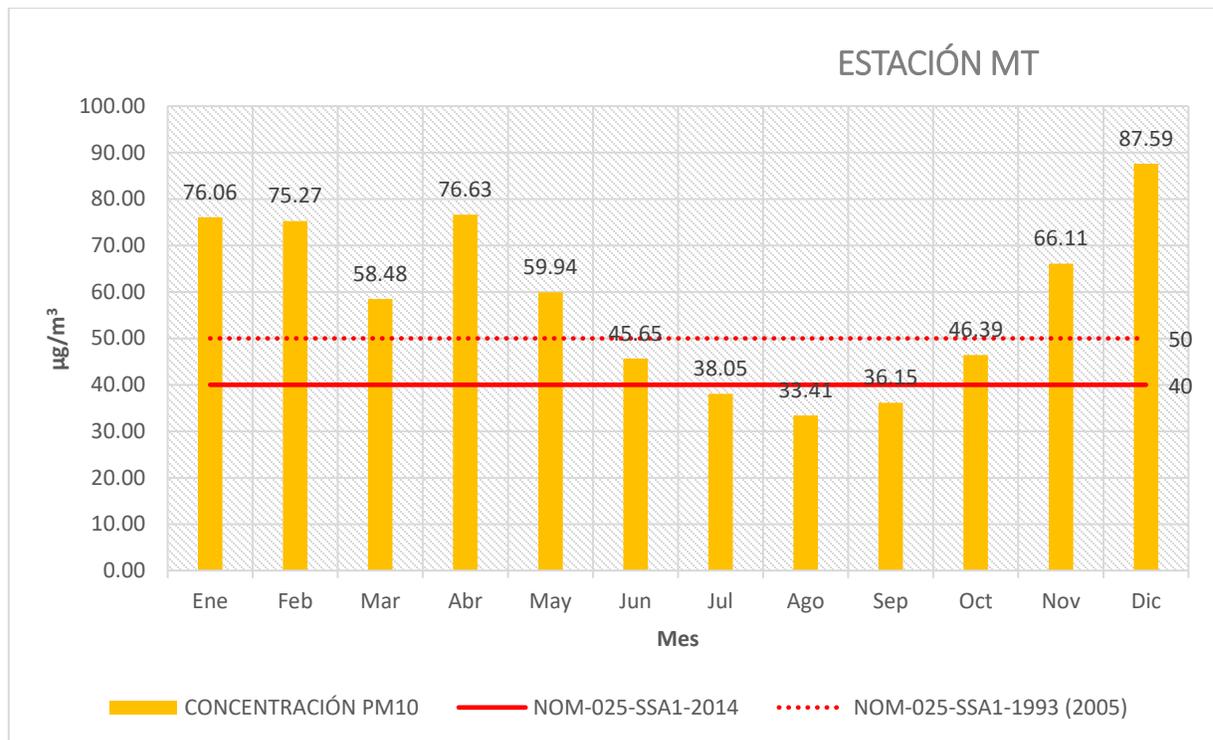
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 91 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y posteriormente septiembre, octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en diciembre con 74.08 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en los meses de julio y agosto, siendo julio el mes que presentó la concentración mínima con 33.47 µg/m³.

4.2.7.3 Estación MT

La gráfica 92 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Metepec (MT) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 92 Concentraciones PM₁₀ por mes estación MT en el año 2017



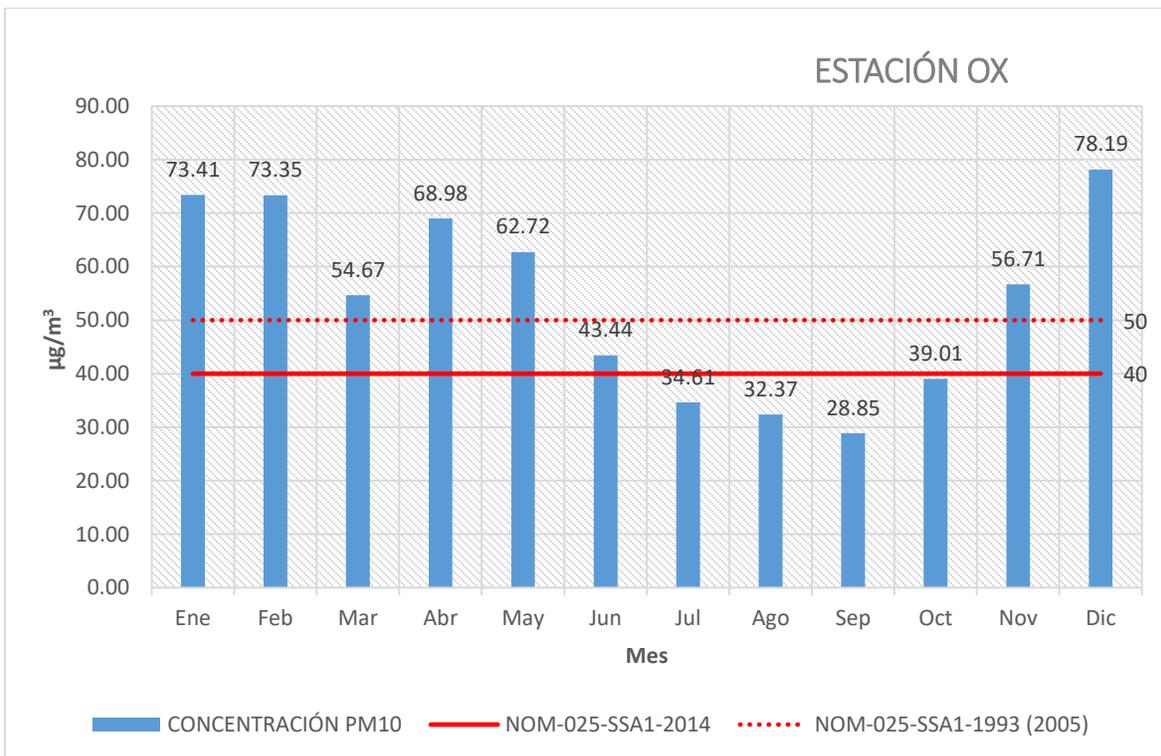
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 92 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido por la NOM durante nueve meses del año: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en diciembre con 87.59 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo de la NOM se registraron en los meses de julio, agosto y septiembre. La concentración mínima se presentó en el mes de agosto con 33.41 µg/m³.

4.2.7.4 Estación OX

La gráfica 93 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación Oxtotitlán (OX) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 93 Concentraciones PM₁₀ por mes estación OX en el año 2017



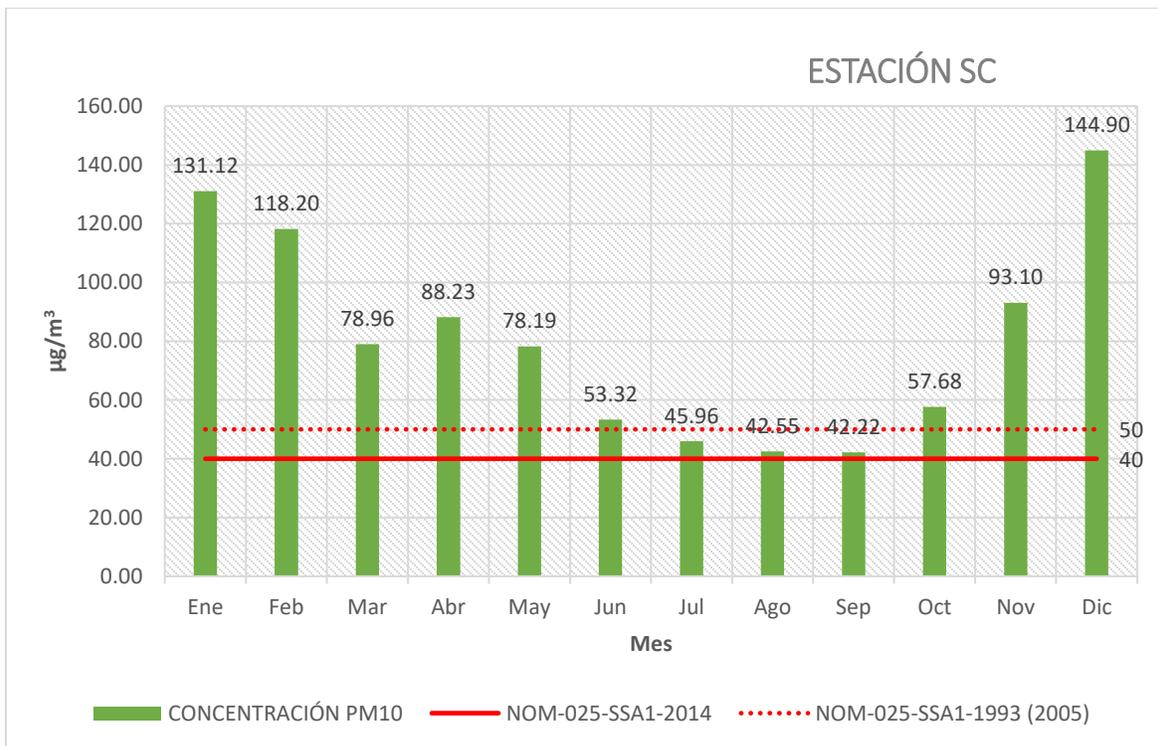
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 92 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante ocho meses del año: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y posteriormente en los meses de noviembre y diciembre. La concentración máxima se registró en diciembre con 78.19 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones por debajo del límite establecido por la NOM se registraron en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, siendo el mes de septiembre el que presentó la concentración mínima con 28.85 µg/m³.

4.2.7.5 Estación SC

La gráfica 94 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 94 Concentraciones PM₁₀ estación SC en el año 2017



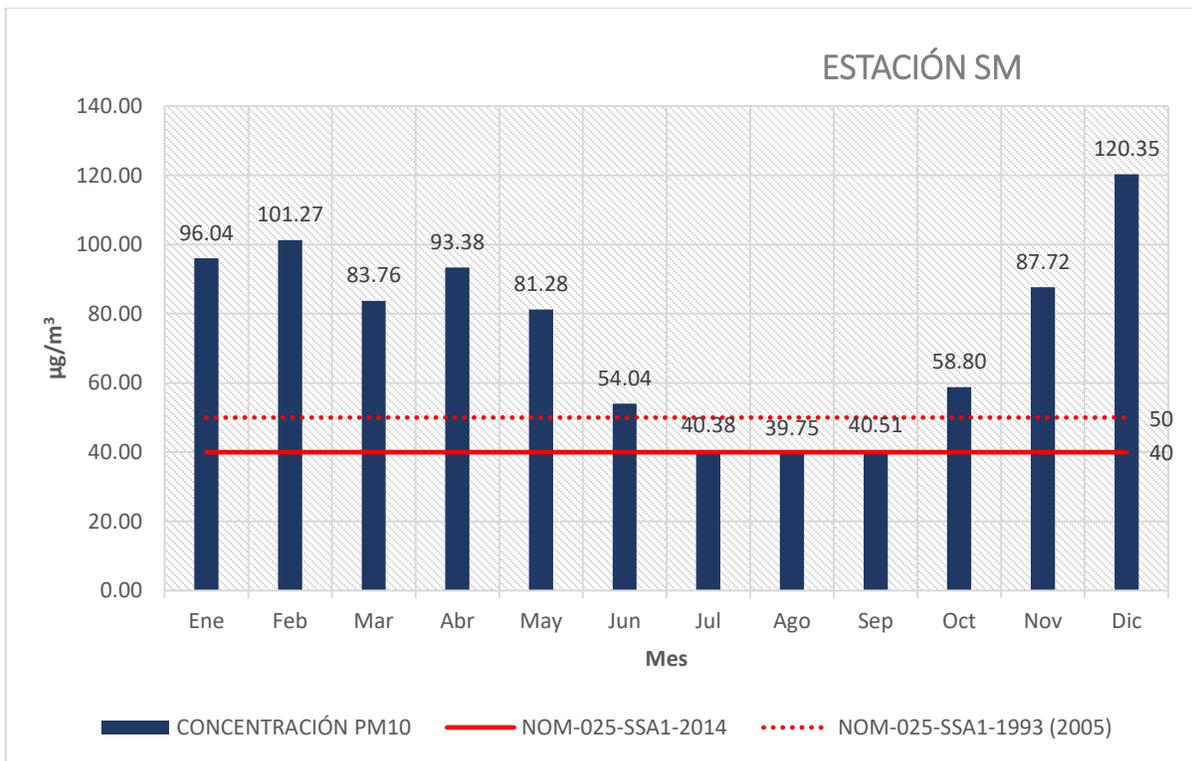
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 94 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante los doce meses del año. La concentración máxima se presentó en diciembre con 144.90 µg/m³. Por otro lado, las concentraciones más bajas se presentaron en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre, sin embargo, éstas aún rebasaron el límite establecido por la NOM. La concentración mínima se presentó en el mes de septiembre con 42.22 µg/m³.

4.2.7.6 Estación SM

La gráfica 95 representa el promedio de concentración de PM₁₀ por mes en la estación San Mateo Atenco (SM) durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones registradas de enero a diciembre respecto del límite establecido en la NOM-025-SSA1-1993 (Modificación 2005) y la NOM-025-SSA1-2014 (vigente).

Gráfica 95 Concentraciones PM₁₀ por mes estación SM en el año 2017



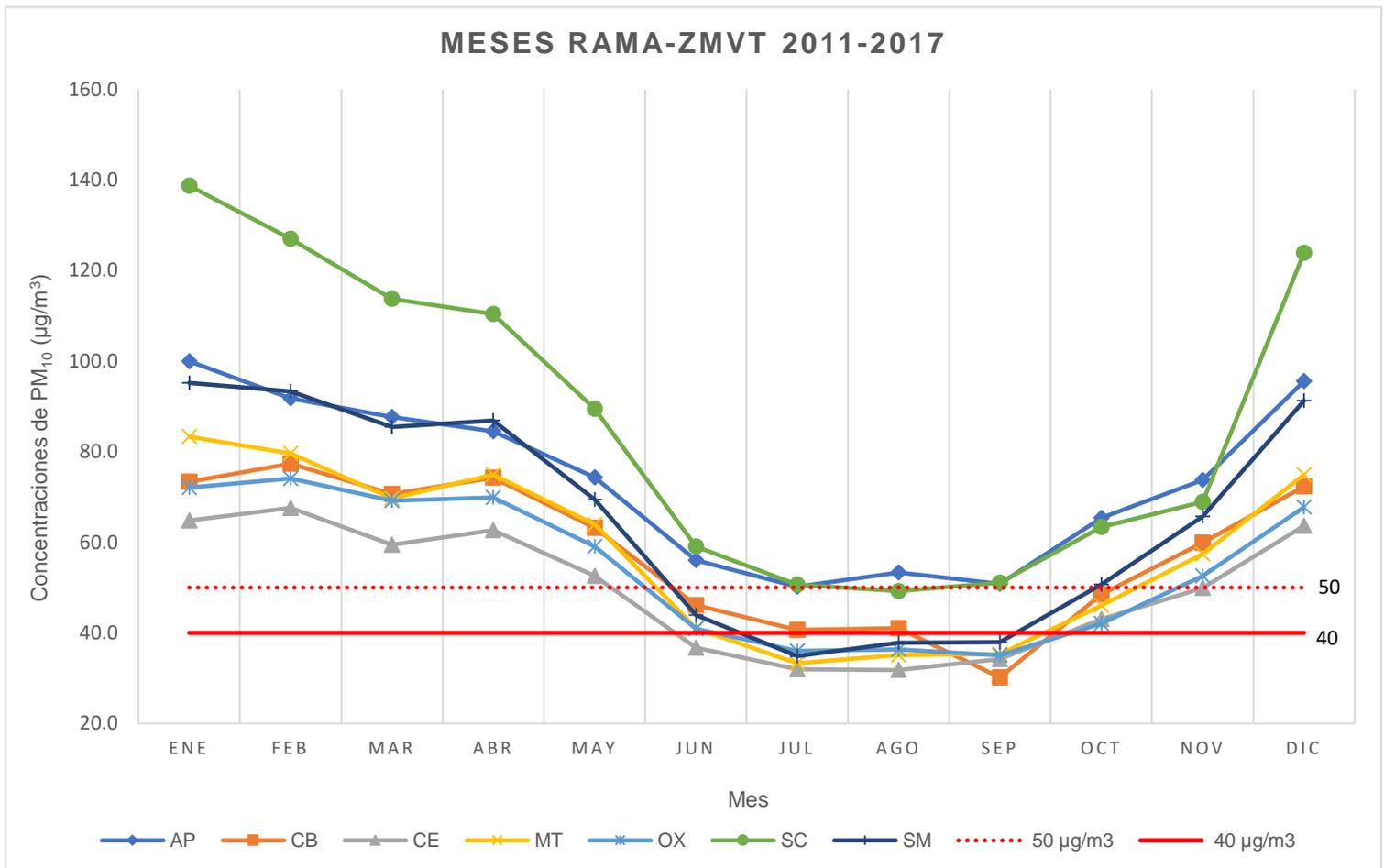
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2017.

En la gráfica 95 se observa que las concentraciones rebasaron el LMP establecido en la NOM durante once meses del año, es decir, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. La concentración máxima se presentó en diciembre con 120.35 µg/m³. Las concentraciones más bajas se presentaron durante julio, agosto y septiembre, sin embargo, rebasan la NOM a excepción del mes de agosto, el cual presentó la concentración mínima y por debajo del LMP de la NOM con 39.75 µg/m³.

4.2.7.7 Comportamiento mensual de PM₁₀ en la RAMA-ZMVT (2011-2017)

En la **Gráfica 96**, se presenta conjuntamente el comportamiento de las concentraciones mensuales de PM₁₀ en cada estación respecto de la NOM-025-SSA1-2014 (40 µg/m³) durante el periodo de estudio 2011-2017.

Gráfica 96 Comportamiento mensual de PM₁₀ en la RAMA-ZMVT durante 2011-2017



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la gráfica 96 se observa que entre las estaciones que registran concentraciones de PM_{10} fuera del LMP¹ establecido en la NOM-025-SSA1-2014 durante los doce meses (enero a diciembre), sobresalen San Cristóbal Huichochitlán (SC) y Aeropuerto (AP). La estación San Mateo Atenco (SM) también registró concentraciones fuera de la NOM en mención, sin embargo, registró concentraciones por debajo del LMP entre los meses de julio a septiembre.

Las mayores concentraciones de PM_{10} fuera del Límite Máximo permisible se presentaron en durante los meses de noviembre a febrero (época seca-fría). Esto se explica por las condiciones meteorológicas de la época invernal (GEM, 2012; INE, 2007). En estos meses, la velocidad del viento disminuye y su estabilidad aumenta permitiendo la permanencia de PM_{10} por mayor tiempo (PMDUT, 2013-2015).

Las concentraciones intermedias se presentaron en marzo y abril (época seca-cálida), ya que, al tratarse de la época seca del año, hay una mayor acumulación de partículas y luego estas son sometidas a un proceso de suspensión eólica, por la presencia de vientos de mayor intensidad (INE, 2007; GEM, 2012).

En la mayoría de las estaciones las concentraciones por debajo del Límite Máximo Permisible (LMP) establecido en la NOM se presentaron de junio a octubre (época de lluvias) influyendo probablemente el aumento en la precipitación, la cual produce un efecto de limpieza de la atmósfera (INE, 2007), por tanto, disminuyendo las concentraciones de PM_{10}

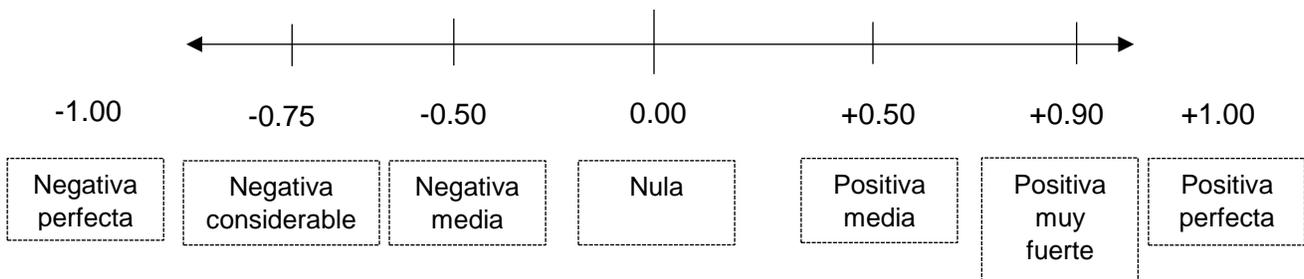
Para corroborar si el aumento de la precipitación fue un factor que influyó en la disminución de las concentraciones de PM_{10} , se llevó a cabo una correlación lineal simple entre la precipitación media anual y las concentraciones promedio de PM_{10} reportadas en las estaciones de la RAMA-ZMVT

¹ Límite Máximo Permisible

4.2.7.8 Correlación lineal simple entre las concentraciones de PM₁₀ y precipitación anual durante el periodo 2011-2017

Para determinar la correlación entre la presencia de mayor precipitación que da como resultado la disminución de las concentraciones de PM₁₀, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, el cual se utiliza para analizar la relación entre dos variables. Prueba supuestos del tipo de “a mayor X, mayor Y”, “a mayor X, menor Y”. Considera dos variables, sin embargo, no como variable independiente y dependiente ya que no evalúa la causalidad entre ambas variables. Su interpretación va de -1.00 a +1.00; el signo indica la dirección de la correlación, es decir, si es negativa o positiva (Hernández-Sampieri, et al., 2010)

Figura 20 Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson



Fuente: Elaboración propia con base en Hernández-Sampieri, et al., 2010.

Para lo anterior, se obtuvieron los datos de precipitación anual del periodo de estudio (2011-2017) igualmente de las bases de datos de la RAMA-ZMVT. Cabe señalar que para el año 2014 no se obtuvieron registros de la precipitación anual, probablemente afectando esto en cierta medida el resultado.

Debido a que las unidades de medida de las concentraciones de PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y la precipitación anual (mm) son diferentes entre sí, se llevó a cabo una conversión de los datos para igualar las unidades, fue así como, los datos de las variables se convirtieron en porcentaje (%) con base en (Salazar-Ávila , 2018).

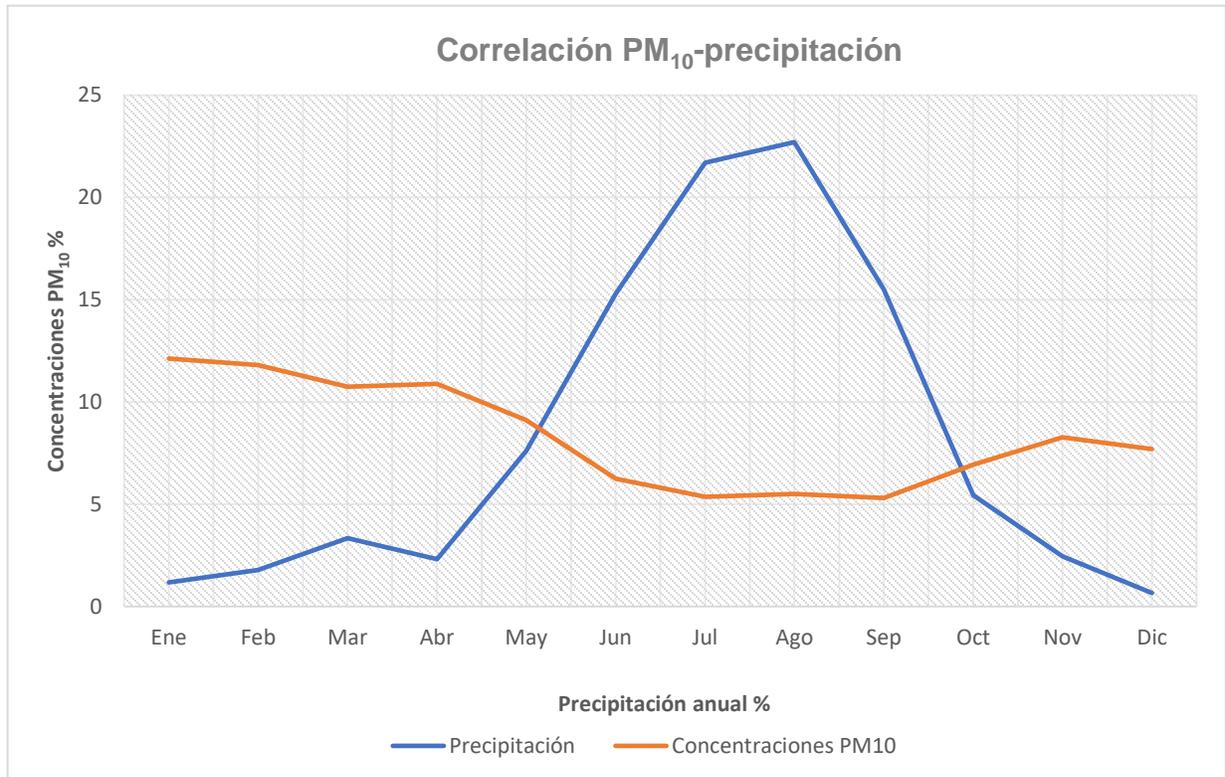
Tabla 27 Porcentaje de precipitación y concentraciones de PM₁₀

	Precipitación (%)	PM₁₀ (%)
Ene	1.18	12.12
Feb	1.79	11.80
Mar	3.34	10.74
Abr	2.32	10.89
May	7.6	9.12
Jun	15.29	6.26
Jul	21.71	5.37
Ago	22.71	5.50
Sep	15.51	5.31
Oct	5.44	6.94
Nov	2.45	8.27
Dic	0.66	7.69
Total	100.00	100.00

Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la **Gráfica 97** se presenta la gráfica de la correlación entre la precipitación y las concentraciones de PM₁₀ durante la época de lluvias (junio-octubre).

Gráfica 97 Correlación lineal simple entre las concentraciones de PM₁₀ y la precipitación media anual en la RAMA-ZMVT



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

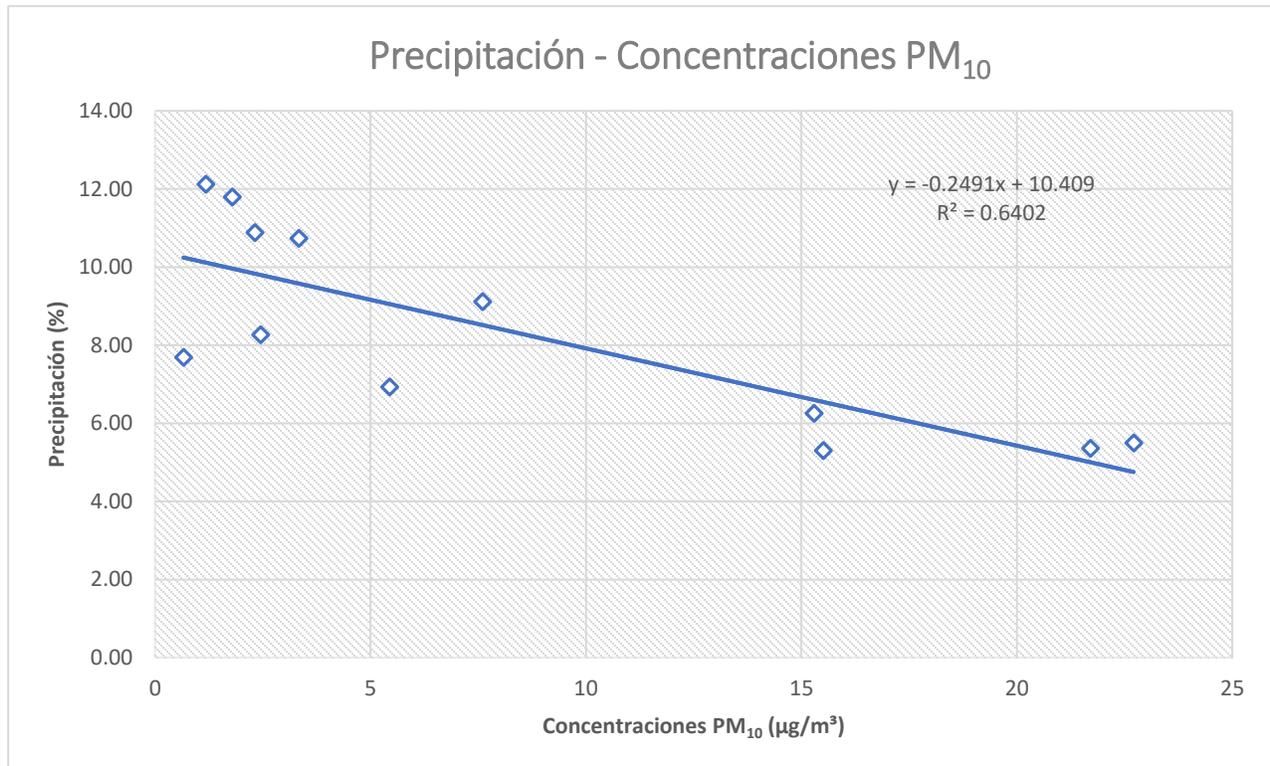
Como se puede observar en la gráfica 97 existe una correlación negativa entre las concentraciones de PM₁₀ y la precipitación media anual registrada en las estaciones de la RAMA-ZMVT. Se dice negativa, ya que cuando la variable de precipitación se incrementa, las concentraciones de PM₁₀ disminuyen en los meses de junio a octubre (época de lluvias). Esto se explica debido a que la precipitación actúa como removedor de las partículas produciendo un efecto de limpieza de la atmósfera, comúnmente citado en la literatura como lavado atmosférico, en el cual las gotas de lluvia retienen a las partículas y las lavan de la atmósfera (INE, 2007; GEM, 2012).

El coeficiente de correlación se obtuvo a través del programa de Microsoft de Excel® dando como resultado **-0.80** y representando una correlación negativa considerable según la interpretación de la figura 20, comprobando así que existe una relación del **80%** entre ambas variables.

4.2.7.9 Variación entre la Precipitación - concentraciones de PM₁₀

Posterior a la correlación entre precipitación y concentraciones de PM₁₀ se obtuvo el coeficiente de determinación para conocer si la variación de la precipitación influyó en la variación de las concentraciones de PM₁₀. Esto se llevó a cabo elevando al cuadrado el coeficiente de Pearson (r^2) dando como resultado la varianza de factores comunes, esto es, el porcentaje de la variación de una variable debido a la variación de la otra variable y viceversa (Hernández-Sampieri, et al., 2010).

Gráfica 98 Variación precipitación-concentraciones PM₁₀



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

El resultado de r^2 fue de 0.6402 que, al transformarse en porcentaje, permite determinar que la variación de la precipitación media anual explica el 64% de la variación de las concentraciones medias mensuales de PM₁₀, comprobando así

que, no sólo existe una correlación entre ambas variables, sino que además efectivamente, la variación que se presentó en la precipitación media anual influyó en las variaciones de las concentraciones promedio mensuales de PM_{10} .

4.3 Concentraciones anuales de PM_{10} en la RAMA-ZMVT durante 2011-2017

En este apartado se presentan las gráficas de las concentraciones de PM_{10} por año en cada estación de la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017 respecto del límite máximo permisible (LMP) establecido en la NOM-025-SSA1-2014 vigente, no obstante, solo para fines ilustrativos se señala en las gráficas el valor límite establecido en la NOM de PM_{10} anterior (modificación 2005).

Límites Máximos Permisibles (LMP):

- 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual NOM-025-SSA1-2014 (vigente).
- 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. NOM-025-SSA1-1993 (modificación 2005):

Cabe señalar que los resultados para la estación AP se reportan únicamente hasta septiembre del año 2015, ya que ésta fue desconectada. Al respecto de las seis estaciones restantes, los datos se reportan para el periodo de estudio 2011-2017.

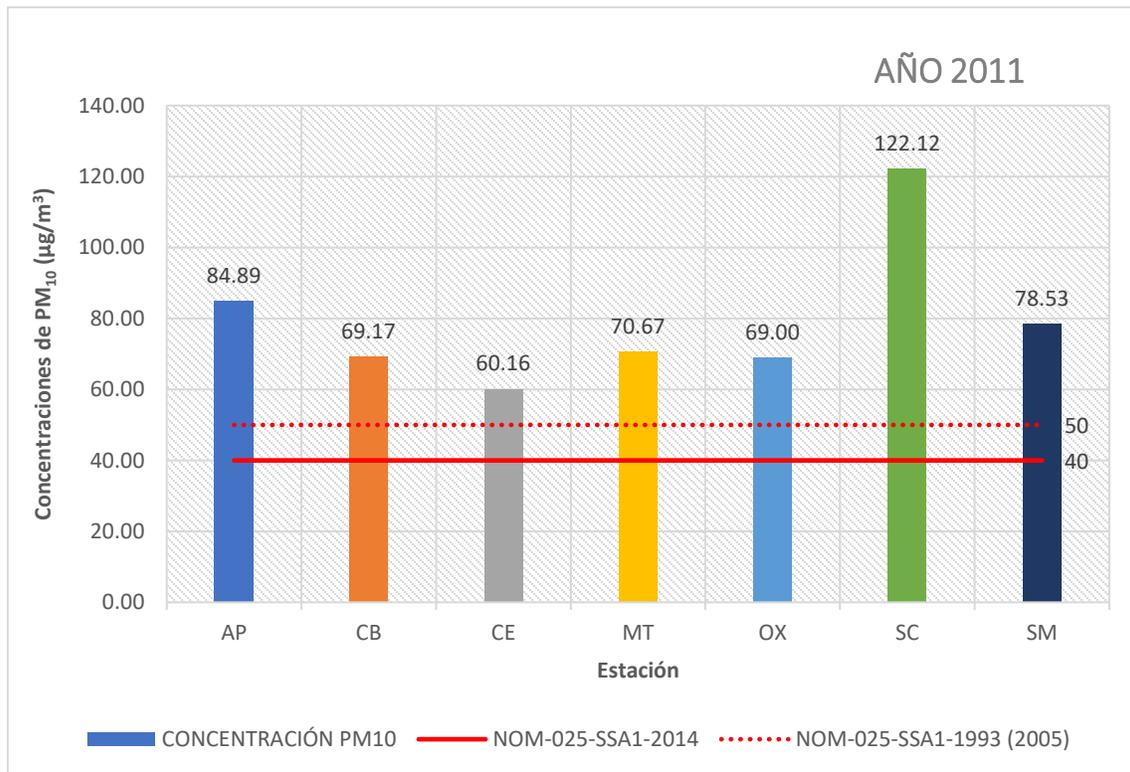
Cada estación tiene un color de identificación:

- **AP** Azul cielo
- **CB** Anaranjado
- **CE** Gris
- **MT** Amarillo
- **OX** Azul claro
- **SC** Verde
- **SM** Azul marino

4.3.1 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2011

La **Gráfica 99** representa el promedio anual de concentraciones de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante el año 2011. Se tomaron en cuenta las concentraciones promedio respecto del límite establecido de 40 µg/m³ (promedio anual) en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 99 Concentraciones PM₁₀ anual RAMA-ZMVT-2011



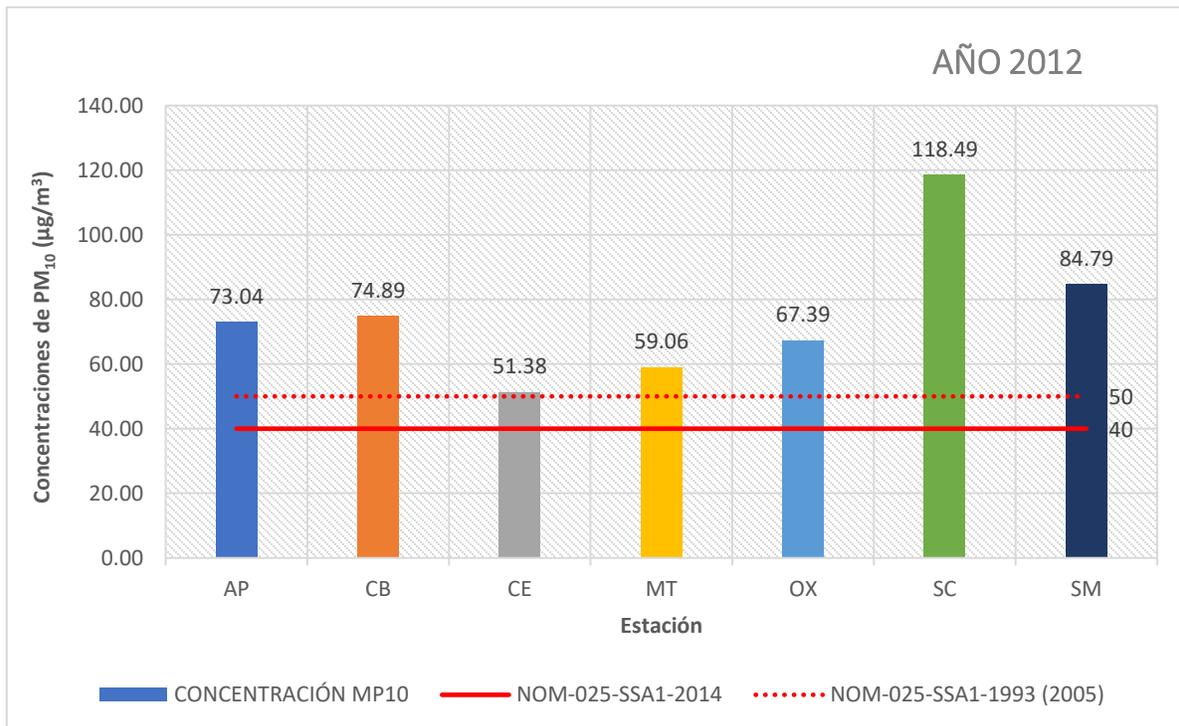
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la gráfica 99 se observa que las siete estaciones de la RAMA-ZMVT presentaron concentraciones de PM₁₀ que rebasaron el LMP de la NOM, sin embargo, es notorio que la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) registró las concentraciones que rebasaron mayormente dicho límite con un promedio de 122.12 µg/m³, seguida de Aeropuerto (AP) con 84.89 µg/m³ y San Mato Atenco (SM) con 78.53 µg/m³. Las estaciones que presentaron las concentraciones mínimas (rebasando la NOM) fueron Toluca Centro y Oxtotitlán (OX) con 60.16 µg/m³ y 69 µg/m³ respectivamente.

4.3.2 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2012

La **Gráfica 100** representa el promedio anual de concentraciones de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante el año 2012. Se tomaron en cuenta las concentraciones promedio respecto del límite establecido de 40 µg/m³ (promedio anual) en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 100 Concentraciones PM₁₀ anual RAMA-ZMVT 2012



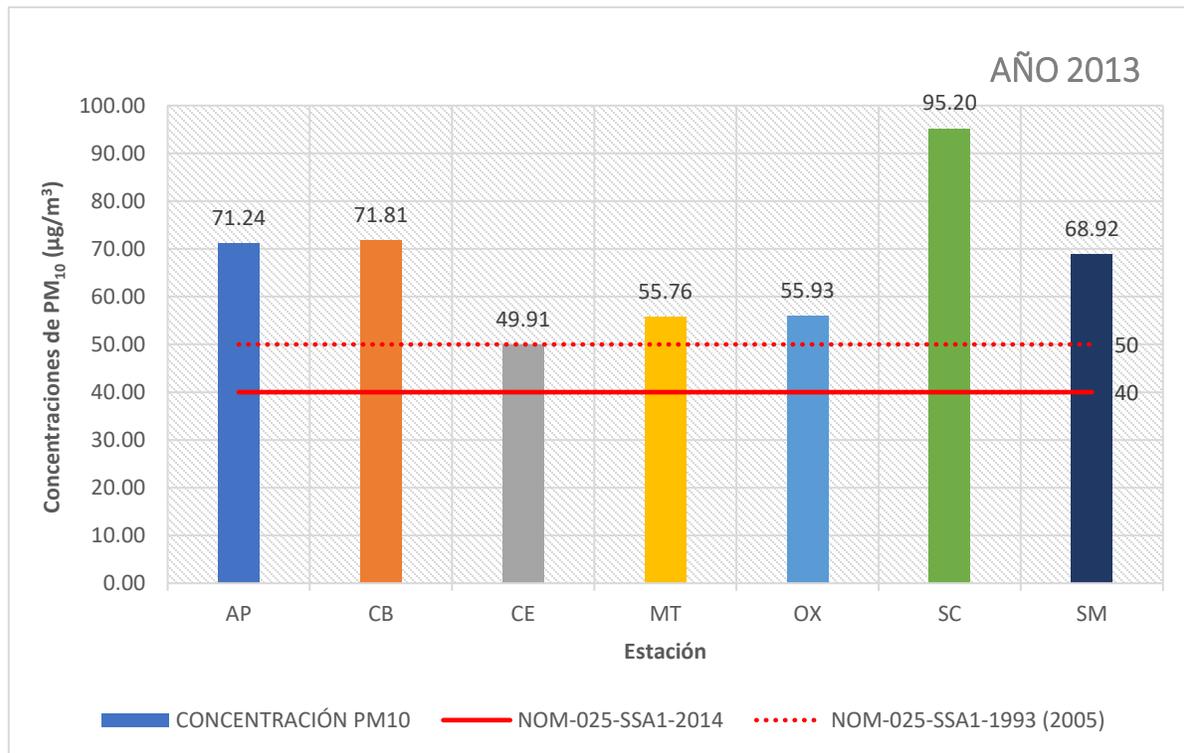
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la gráfica 100 se observa que las siete estaciones de la RAMA-ZMVT presentaron concentraciones de PM₁₀ que rebasaron el LMP establecido por la NOM, sin embargo, es notorio que la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) es la que presentó las concentraciones más elevadas con 118.49 µg/m³. A estas le siguen San Mateo (SM) con 84.79 µg/m³ y Ceboruco (CB) con 74.89 µg/m³. Las estaciones que presentaron las concentraciones mínimas (rebasando la NOM) fueron la estación CE (Toluca Centro) y Metepec (MT) con 51.38 µg/m³ y 59.06 µg/m³ respectivamente.

4.3.3 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2013

La **Gráfica 101** representa el promedio anual de concentraciones de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante el año 2013. Se tomaron en cuenta las concentraciones promedio respecto del límite establecido de 40 µg/m³ (promedio anual) en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 101 Concentraciones PM₁₀ anual RAMA-ZMVT 2013



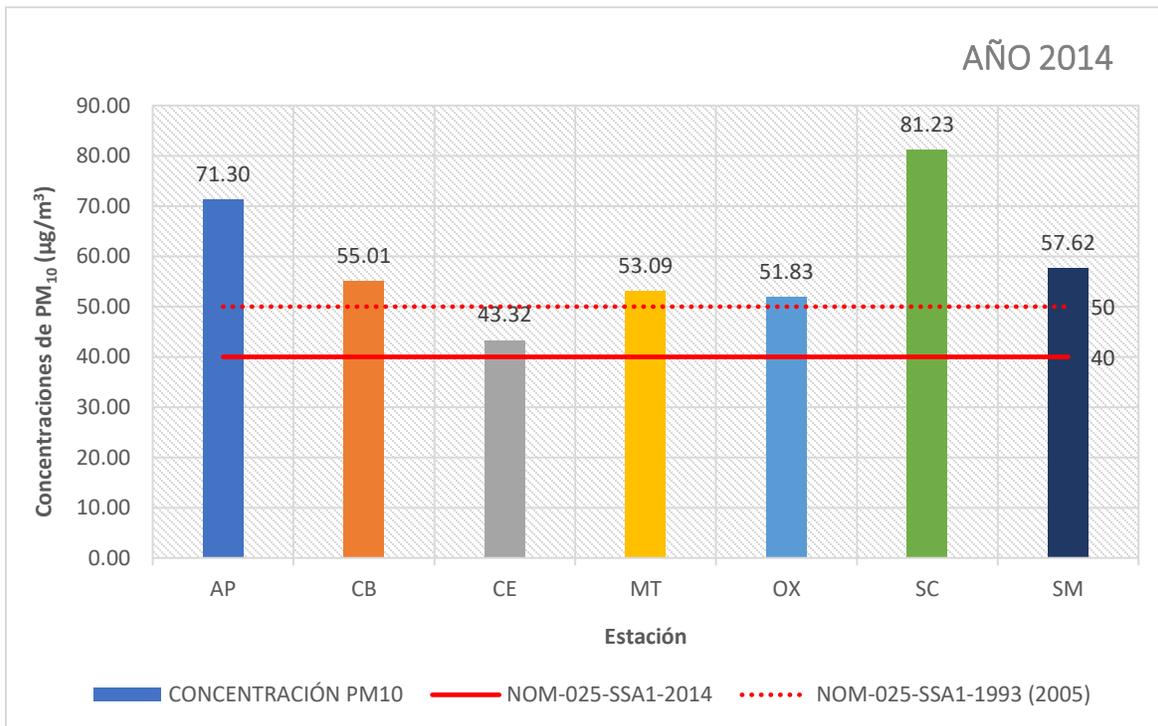
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la gráfica 101 se observa que las siete estaciones de la RAMA-ZMVT presentaron concentraciones de PM₁₀ que rebasaron el LMP establecido por la NOM, siendo notoria la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) con un promedio de 95.20 µg/m³, seguida de Ceboruco (CB) con 71.81 µg/m³ y Aeropuerto (AP) con 71.24 µg/m³. Las estaciones que registraron concentraciones mínimas (rebasando la NOM) fueron Toluca Centro (CE) y Metepec (MT) con 49.91 µg/m³ y 55.76 µg/m³ respectivamente.

4.3.4 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2014

La **Gráfica 102** representa el promedio anual de concentraciones de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante el año 2014. Se tomaron en cuenta las concentraciones promedio respecto del límite establecido de 40 µg/m³ (promedio anual) en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 102 Concentraciones PM₁₀ anual RAMA-ZMVT 2014



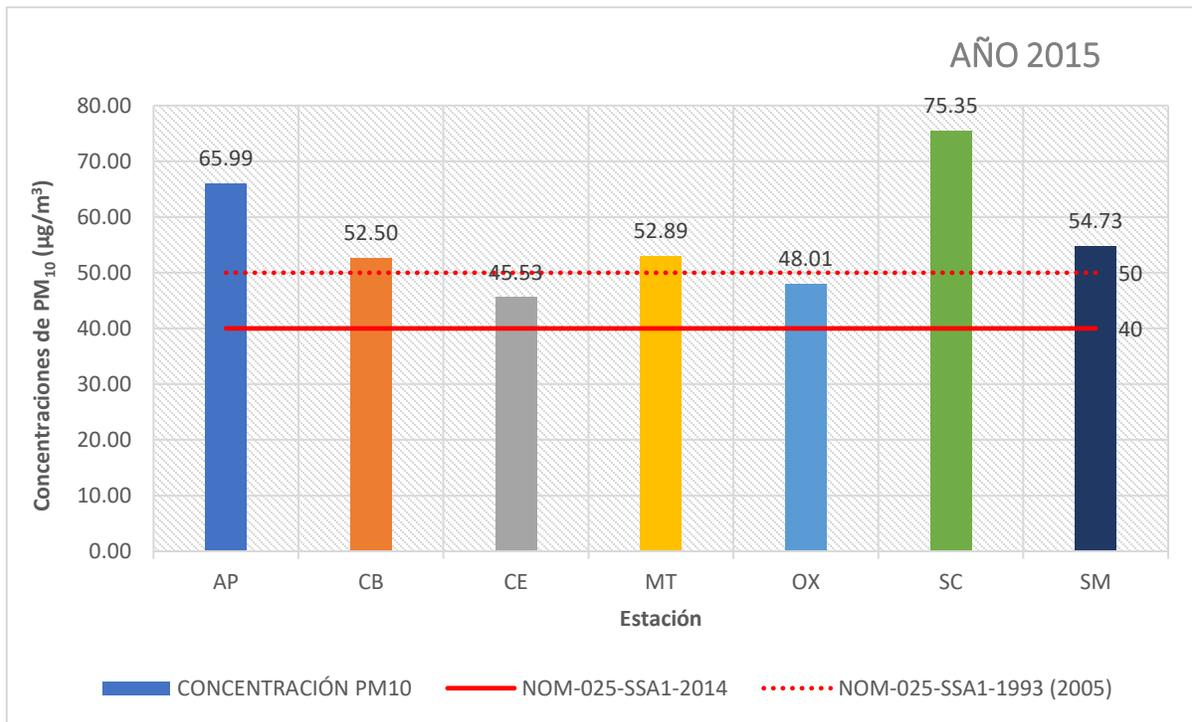
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la gráfica 102 se observa que las siete estaciones de la RAMA-ZMVT presentaron concentraciones de PM₁₀ que rebasaron el LMP establecido por la NOM, es notoria la estación de San Cristóbal Huichochitlán (SC) con un promedio de 81.23 µg/m³, seguida de Aeropuerto (AP) con 71.30 µg/m³ y San Mateo Atenco (SM) con 57.62 µg/m³. Las estaciones que registraron concentraciones mínimas (rebasando la NOM) fueron Toluca Centro (CE) y Oxtotitlán (OX) con 43.32 µg/m³ y 51.83 µg/m³ respectivamente.

4.3.5 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2015

La **Gráfica 103** representa el promedio anual de concentraciones de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante el año 2015. Se tomaron en cuenta las concentraciones promedio respecto del límite establecido de 40 µg/m³ (promedio anual) en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 103 Concentraciones PM₁₀ anual RMA-ZMVT 2015



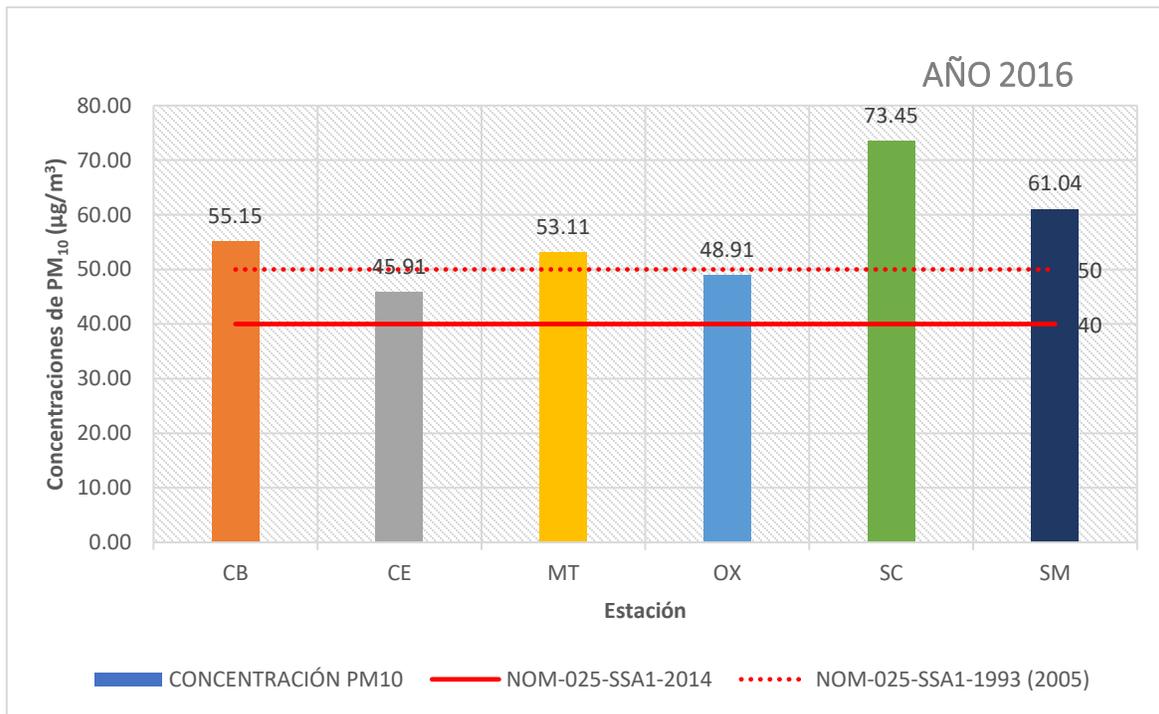
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la gráfica 103 se observa que las siete estaciones de la RAMA-ZMVT presentaron concentraciones de PM₁₀ que rebasaron el LMP establecido en la NOM, resulta notoria la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) con un promedio de 75.35 µg/m³, seguida de Aeropuerto (AP) con 65.99 µg/m³ y San Mateo Atenco (SM) con 54.73 µg/m³. Las estaciones que presentaron las concentraciones mínimas (rebasando la NOM) fueron Toluca Centro (CE) y Oxtotitlán (OX) con 45.53 µg/m³ y 48.01 µg/m³ respectivamente.

4.3.6 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2016

La **Gráfica 104** representa el promedio anual de concentraciones de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante el año 2016. Se tomaron en cuenta las concentraciones promedio respecto del límite establecido de 40 µg/m³ (promedio anual) en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 104 Concentraciones PM₁₀ anual RAMA-ZMVT 2016



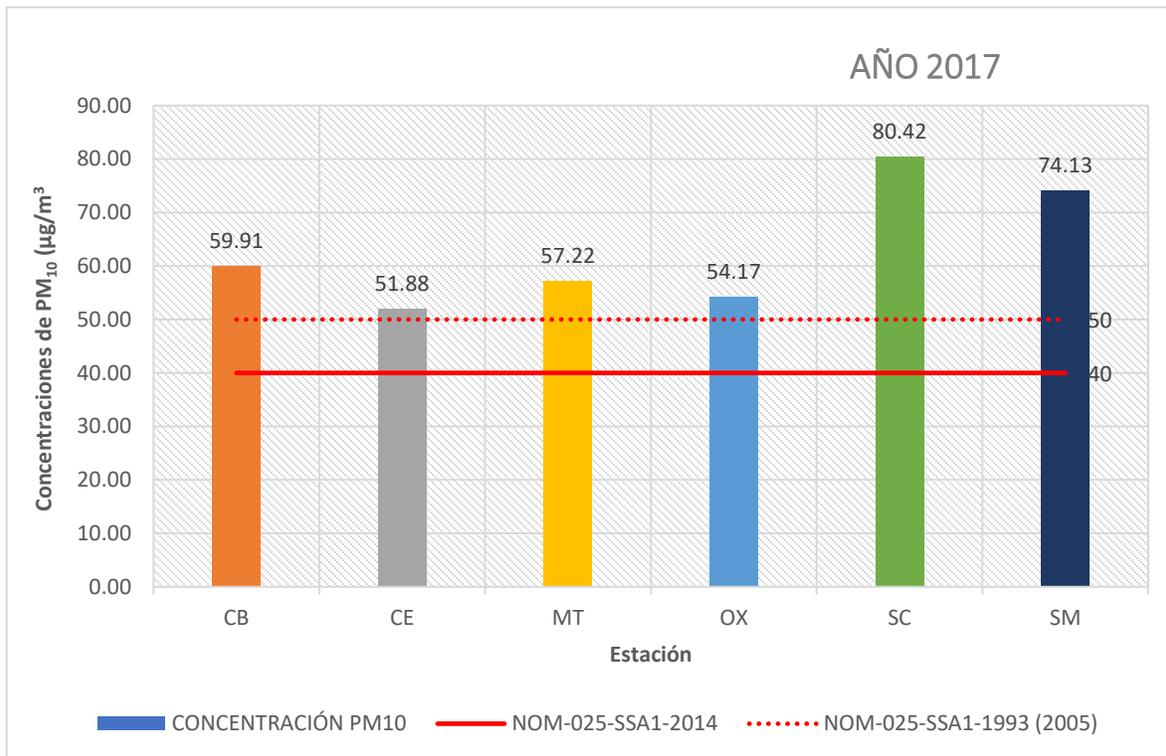
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la gráfica 104 se observa que las siete estaciones de la RAMA-ZMVT presentaron concentraciones de PM₁₀ que rebasaron el LMP establecido en la NOM, siendo notoria la estación de San Cristóbal Huichochitlán (SC) con un promedio de 73.45 µg/m³, seguida de San Mateo Atenco (SM) con 61.04 µg/m³ y Ceboruco (CB) con 55.15 µg/m³. Las estaciones que presentaron concentraciones mínimas (aun rebasando la NOM) fueron Toluca Centro (CE) y Oxtotitlán (OX) con 45.91 µg/m³ y 48.91 µg/m³ respectivamente.

4.3.7 Concentraciones PM₁₀ anual en la RAMA-ZMVT año 2017

La **Gráfica 105** representa el promedio anual de concentraciones de PM₁₀ en cada estación de la RAMA-ZMVT durante el año 2017. Se tomaron en cuenta las concentraciones promedio respecto del límite establecido de 40 µg/m³ (promedio anual) en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 105 Concentración promedio de PM₁₀ en el año 2017



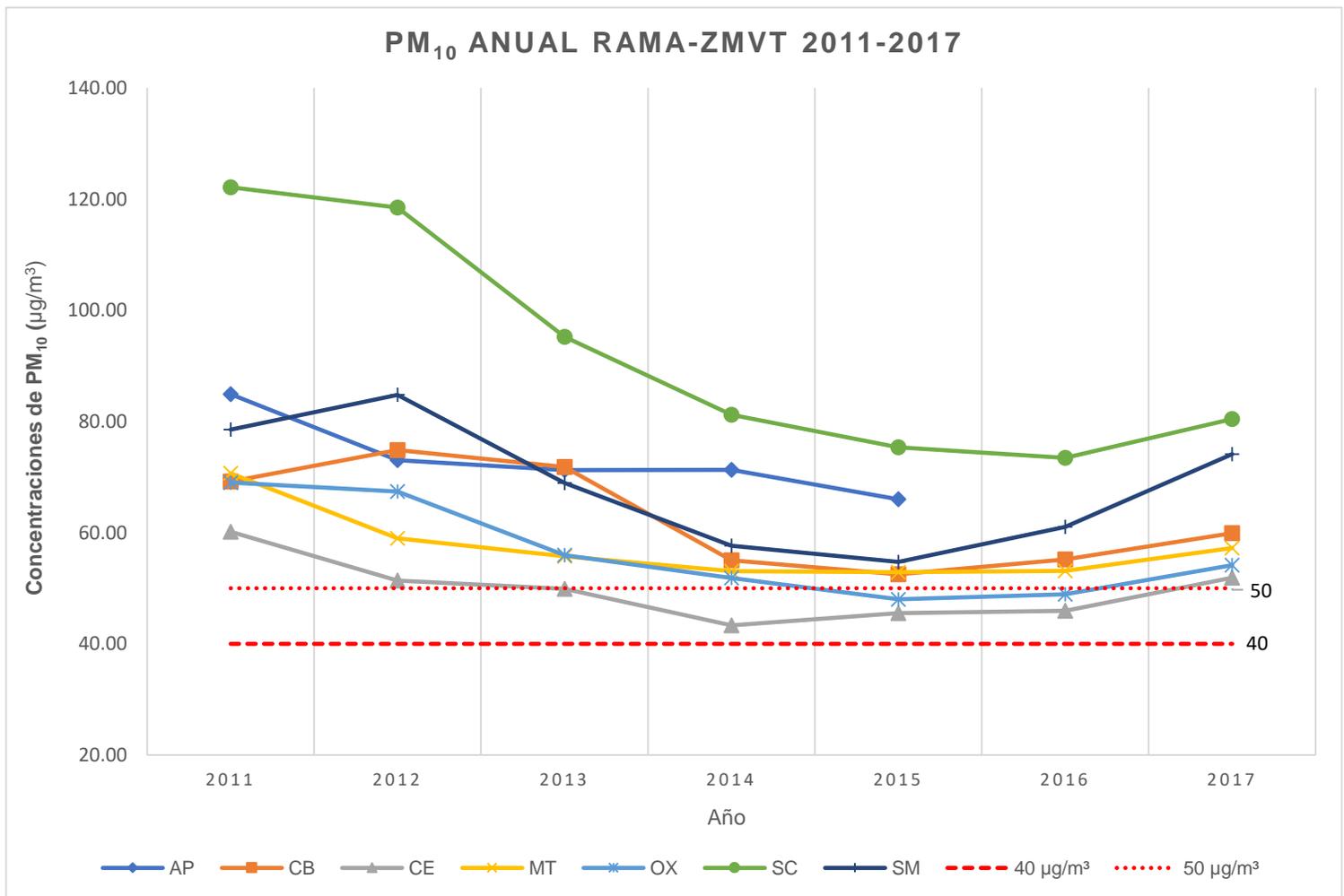
Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la gráfica 105 se observa que las concentraciones rebasaron el límite establecido por la NOM en la estación de San Cristóbal Huichochitlán (SC) con un promedio de 80.42 µg/m³, seguida de San Mateo Atenco (SM) con 74.13 µg/m³ y Ceboruco (CB) con 59.91 µg/m³. Ninguna de las estaciones registró concentraciones que no rebasaran el límite establecido por la NOM, sin embargo, las que registraron concentraciones mínimas, aun rebasando la NOM fueron Toluca Centro, Oxtotitlán (OX) y Metepec (MT) con 51.88 µg/m³, 54.17 µg/m³ y 57.22 respectivamente.

4.3.8 Comportamiento anual de PM₁₀ en las estaciones de la RAMA-ZMVT (2011-2017)

La **Gráfica 106** representa el comportamiento anual de las concentraciones de PM₁₀ por año en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017 respecto del Límite Máximo Permissible (LMP) establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

Gráfica 106 Comportamiento anual de las concentraciones de PM₁₀ por estación durante 2011-2017



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

En la gráfica 106 se observa que las siete estaciones de la RAMA-ZMVT presentaron concentraciones de PM₁₀ fuera del Límite Máximo Permisible establecido en la NOM-025-SSA1-2014 (40 µg/m³ promedio anual) en todos los años del periodo de estudio 2011-2017, Particularmente, la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) fue la que registró mayores concentraciones fuera de la NOM, seguido de las estaciones Aeropuerto (AP) y San Mateo Atenco (SM).

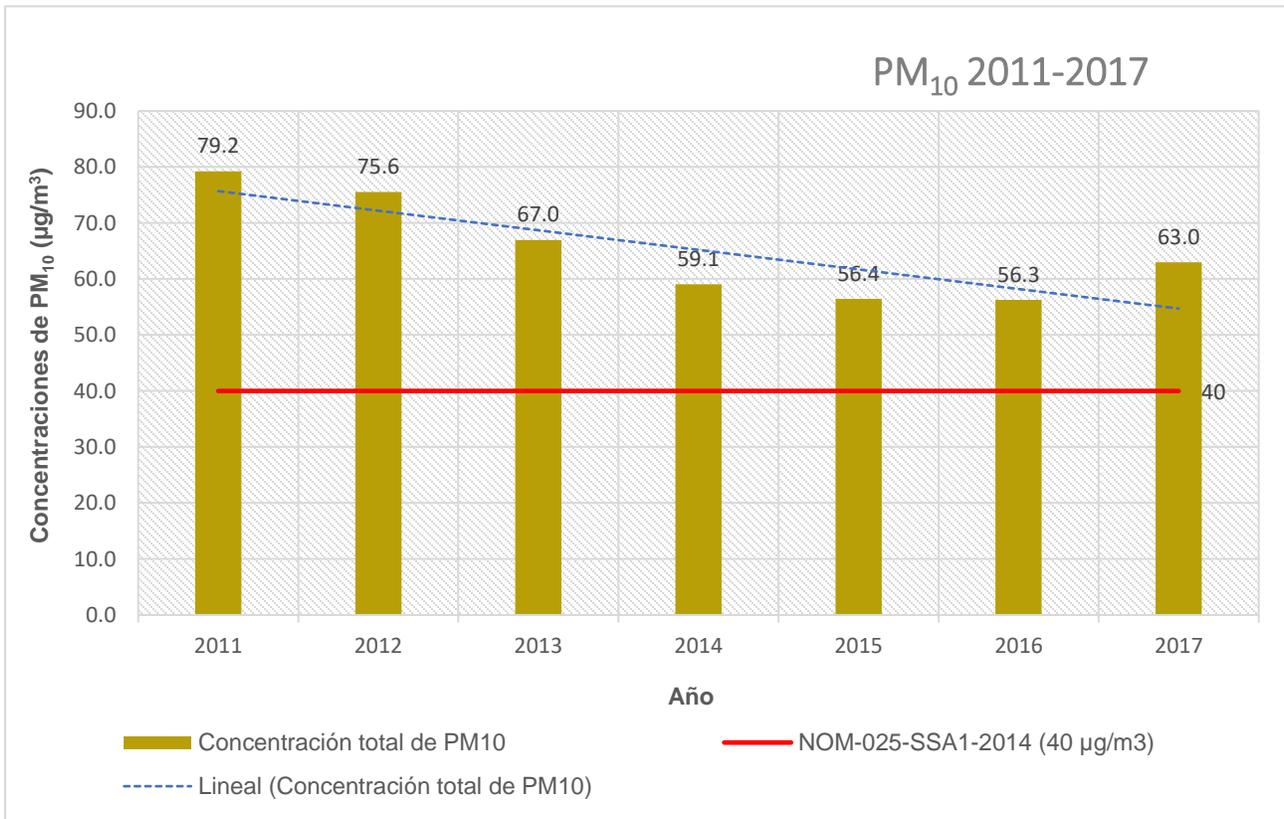
Las siete estaciones presentan concentraciones fuera de la NOM principalmente durante los primeros años del periodo de estudio, es decir de 2011 a 2013 y a partir de ahí, disminuyen hasta el año 2016, sin embargo, las concentraciones de PM₁₀ se incrementaron nuevamente en el año 2017.

Es evidente que la línea que representa a la estación Aeropuerto (AP) se corta a partir del año 2015, y para los años 2016 y 2017 ya no registró datos de las concentraciones de PM₁₀ debido a que ésta fue apagada en septiembre del año 2015. Es así como, las principales estaciones que mantuvieron las concentraciones más elevadas durante el periodo fueron San Cristóbal Huichochitlán (SC), Aeropuerto (AP) y San Mateo Atenco (SM).

Para observar la tendencia de las concentraciones de PM₁₀ durante el periodo de estudio, se llevó a cabo una gráfica de las concentraciones promedio de PM₁₀ registradas en cada año, sin embargo, son resultados generales y no tan precisos, puesto que se contaba con una gran cantidad de datos, y se consideró la media de las concentraciones de PM₁₀ para cada año dificultando determinar una tendencia de manera más precisa.

En la **Gráfica 107** se presenta la tendencia de las concentraciones de PM₁₀ y sus concentraciones alcanzadas en cada año del periodo de estudio.

Gráfica 107 Promedio total de concentraciones PM₁₀ por año



Elaboración propia con base en datos de la RAMA, 2011-2017.

Las concentraciones de PM₁₀ presentaron una tendencia descendente durante el periodo de estudio, no obstante, éstas se mantuvieron año con año fuera del Límite Máximo Permisible de 40µg/m³ (promedio anual), establecido en la NOM-025-SSA1-2014.

La concentración máxima de PM₁₀ se registró en el año 2011 con una concentración promedio de 79.2 µg/m³, mientras que la concentración mínima se registró en el año 2016 con 56.3 µg/m³. El incremento de las concentraciones de PM₁₀ en 2017 registro una concentración promedio de 63 µg/m³.

Como ya se mencionó en párrafos anteriores la estación Aeropuerto (AP) fue desconectada a finales del año 2015 para reubicarla y desde entonces no ha sido activada. Dada la importancia de sus mediciones por la zona de influencia del Aeropuerto Internacional de Toluca, se cree que probablemente influyó en este

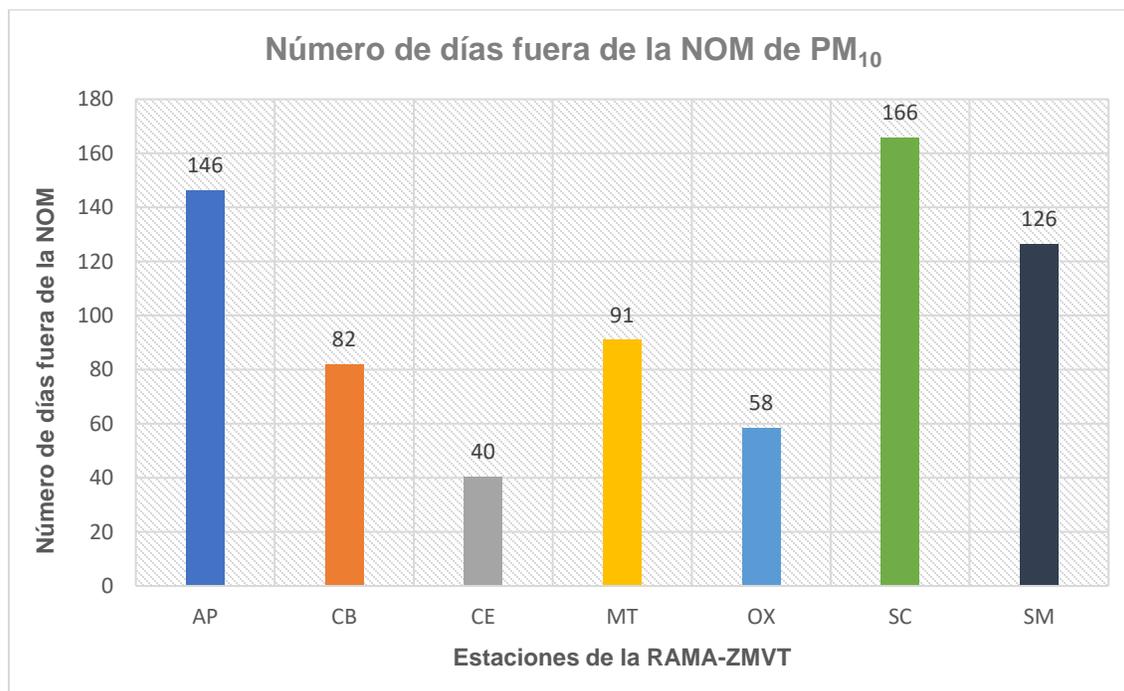
descenso de las concentraciones de PM₁₀ durante 2016. Por otro lado, el incremento de las concentraciones de PM₁₀ durante el año 2017 probablemente se debe al incremento del parque vehicular y al incremento de las industrias.

4.3.9 Número de días fuera de la Norma Oficial Mexicana de PM₁₀ por estación (2011-2017)

Finalmente se calcularon los días en los cuales cada estación incumplió con la NOM-025-SSA1-2014 durante el periodo 2011-2017.

La **Gráfica 108** representa el número de días en los que cada estación rebasó el Límite Máximo Permisible establecido en la NOM de PM₁₀ (75µg/m³ promedio 24 horas) durante el periodo de análisis 2011-2017.

Gráfica 108 Número de días fuera de la NOM de PM₁₀ 2011-2017



Elaboración propia con base en datos de la RAMA.

En la gráfica 108 se observa que las estaciones que registraron un mayor número de días rebasando la NOM-025-SSA1-2014 durante 2011-2017 fueron San Cristóbal Huichochitlán (SC), Aeropuerto (AP) y San Mateo Atenco (SM).

La estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) rebasó la NOM en 166 días (45%), seguida de Aeropuerto (AP) que rebasó la NOM en 146 días (40%) y San Mateo Atenco en 126 días (34%). Mientras que las estaciones que presentaron un menor número de días fuera de la NOM fueron Metepec (MT) con 91 días (25%), Ceboruco (CB) con 82 días (22%), Oxtotitlán (OX) con 58 días (16%) y Toluca Centro (CE) con 40 días (11%).

Epílogo

Las gráficas demostraron que todas las estaciones de la RAMA-ZMVT tuvieron un comportamiento similar y en particular la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC), presentó las concentraciones más elevadas en el análisis de las concentraciones horarias, mensuales y anuales Asimismo fue la estación que rebasó el LMP de la NOM-025-SSA1-2014 en un mayor número de días durante el periodo de estudio.

Respecto al análisis de las concentraciones horarias, la mayoría de las estaciones demostró el mismo comportamiento, es decir rebases a la NOM en horario matutino de 8:00 a 12:00 horas y alcanzaron las concentraciones máximas de PM_{10} a las 10:00 horas exponiendo la salud de la población de la RAMA-ZMVT, ya que es el horario en el que, por lo general, la zona de estudio se torna más dinámica respecto a las actividades propias de la población y al desarrollo de las actividades industriales

Respecto al comportamiento mensual, las concentraciones de PM_{10} y la precipitación obtuvieron un 80% de correlación entre ambas variables, demostrando que efectivamente la lluvia remueve las PM_{10} durante los meses junio a octubre (época de lluvias) siendo esta la razón de la disminución de las concentraciones en todas las estaciones de la RAMA-ZMVT y durante el periodo de estudio.

Resulta interesante ver como las concentraciones de PM_{10} pueden verse afectadas por variables meteorológicas e incluso por la presencia de otros contaminantes en la atmósfera.

Respecto al comportamiento anual, fue evidente el descenso de las concentraciones de PM_{10} , sin embargo tuvo un incremento en el año 2017, dejando ver que pudieran presentarse fallas en las estrategias planteadas para mantener la calidad del aire; o bien plantear la necesidad de profundizar sobre las verdaderas causas que originaron este incremento, que si bien es menor al de años anteriores no se debe olvidar que el PM_{10} más allá de sus efectos negativos en el ambiente, tiene severo efectos sobre la salud humana a corto y largo plazo.

Se pudo comprobar a través de la desviación estándar y el coeficiente de variación que los datos registrados en cada estación son muy variables y heterogéneos, lo cual dificulta que se pueda determinar una tendencia específica del comportamiento de las concentraciones de PM_{10} en los siguientes años e incluso durante 24 horas.

Si bien, se llevó a cabo el análisis del comportamiento de las PM_{10} en cada estación de la RAMA-ZMVT a través de las gráficas elaboradas y con el apoyo de algunas medidas de dispersión y correlación, los datos se obtuvieron de bases de datos que en ocasiones no contaban con datos o contaban con datos no válidos. En este sentido, no se debe dejar de lado que trabajar con este tipo de datos no resulta sencillo, ya que se pueden presentar fallas en las mediciones de las PM_{10} , afectando los cálculos correspondientes y produciendo un sesgo en la información.

El análisis llevado a cabo en el presente trabajo nos permitió hacer una aproximación del comportamiento de las PM_{10} durante 2011-2017, sin embargo, los datos y los resultados obtenidos pueden someterse a otras pruebas estadísticas que reduzcan tanto como sea posible los errores que pudieran presentarse y establecer un análisis más preciso.

Discusión de resultados

Se llevó a cabo el análisis de las concentraciones de PM_{10} a partir de los datos de la RAMA-ZMVT durante el periodo 2011-2017 para conocer si se encuentran dentro del Límite Máximo Permisible (LMP) establecido por la normatividad oficial, en este caso, la NOM-025-SSA1-2014, de tal manera que no representan un riesgo para la salud de la población. Las concentraciones se analizaron por hora, por mes y por año en cada una de las estaciones.

Respecto a los resultados del análisis de las concentraciones por hora de PM_{10} durante 2011-2017, se encontró que las siete estaciones de la RAMA-ZMVT registraron concentraciones fuera del límite de la NOM-025-SSA1-2014; resulta notorio en horario matutino, entre las 8:00 y 12:00 horas y alcanza el máximo de concentraciones a las 10:00 horas en la mayoría de los casos, coincidiendo con la hora de mayor actividad económica e industrial en la zona de estudio. Particularmente, la estación SC presentaba concentraciones pico a las 18:00 horas y a partir de ahí, se mantiene fuera de la Norma Oficial Mexicana (NOM) en mención, hasta las 24:00 horas.

De acuerdo con la desviación estándar, la varianza y el coeficiente de variación se demostró que las estaciones San Cristóbal Huichochitlán (SC), Ceboruco (CB), San Mateo Atenco (SM) y Aeropuerto (AP) presentaron una mayor dispersión de los datos. San Cristóbal Huichochitlán (SC) fue la principal estación que mostró un comportamiento con mayor variación o heterogéneo.

La variabilidad observada en las diferentes estaciones puede estar influenciada por variables meteorológicas que dispersan las PM_{10} y por el entorno de cada estación. Por ejemplo, la estación SC al estar en una zona rural recibe material particulado de las vialidades que aún no están pavimentadas y por la erosión de suelos de cultivo, sumadas las contribuciones de PM_{10} provenientes de la zona industrial, ya que esta estación se encuentra a favor del viento de la zona industrial. Las estaciones AP y SM se encuentran cercanas a zonas industriales y vialidades con

alto tráfico vehicular y de todo tipo de transporte; y la estación CB tiene alrededor vialidades con tráfico vehicular intenso y frecuentes embotellamientos.

En lo que se refiere a las concentraciones de PM_{10} por mes, todas las estaciones registraron la misma tendencia por encima de los LMP establecidos en la NOM-025-SSA1-2014. Las mayores concentraciones de PM_{10} se presentaron en los meses de noviembre a febrero. Este patrón va acorde con las condiciones meteorológicas de la época invernal. En estos meses, la velocidad del viento disminuye y su estabilidad aumenta permitiendo la permanencia de PM_{10} por mayor tiempo. Además, por tratarse de una época seca existe una mayor resuspensión de las partículas.

Otro de los factores que explica las altas concentraciones de PM_{10} es que durante estos meses se presentan desplazamientos de masas de aire frío en la zona de estudio; lo cual produce un tiempo atmosférico estable y seco, dando lugar a inversiones térmicas y dificultando que los contaminantes se dispersen.

Posteriormente en los meses de marzo, abril y mayo, correspondientes a la época seca-cálida, si bien se registraron concentraciones por encima del LMP establecidos en la NOM, resulta interesante observar como las concentraciones son menores a las que se presentan en la época invernal. Al tratarse de la época seca del año, hay una mayor acumulación de partículas y luego éstas son sometidas a un proceso de suspensión eólica, por la presencia de vientos con velocidades mayores a las que presentan en la época invernal.

Las concentraciones de PM_{10} descienden en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre, y sólo en algunos casos se observa fuera de los LMP establecidos en la NOM. Estos meses corresponden a la temporada de lluvias en la zona de estudio. Se llevó a cabo la correlación entre la precipitación y las concentraciones de PM_{10} demostrando una correlación negativa considerable del 80%, mientras que la precipitación incrementó, las concentraciones de PM_{10} disminuyeron. También se encontró que la variación en la precipitación media anual influyó un 64% en la variación de las concentraciones de PM_{10} .

En la época de lluvias las PM₁₀ son eliminadas por la retención en las gotas de lluvia produciendo un efecto de limpieza de la atmósfera comúnmente conocido como lavado atmosférico. Además, los siete municipios de la RAMA-ZMVT, se encuentran bajo la influencia de ciclones durante esta época, los cuales aportan abundante humedad en forma de lluvias abundantes contribuyendo significativamente a la remoción de los contaminantes presentes en la atmósfera.

En lo que se refiere a las concentraciones anuales de PM₁₀ se observa que las concentraciones disminuyeron de 2011 a 2017. Los años con mayores concentraciones de PM₁₀ fueron 2011, 2012 y 2013. Los años siguientes también registraron concentraciones que rebasaron el LMP de la NOM, sin embargo, la tendencia es descendente. Lo anterior resultó interesante, ya que tomando en cuenta que el parque vehicular y el número de industrias se ha incrementado a lo largo de estos años, podría pensarse que las concentraciones de PM₁₀ se elevarían, sin embargo, resulta importante verificar si las operaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Toluca influyen en estos resultados, ya que la actividad de éste ha disminuido un 50.5% en los últimos siete años, atendiendo a **120,842** pasajeros en el 2011; **66,395** pasajeros en el 2012; **105, 834** pasajeros en 2013; **64, 666** pasajeros en el 2014; **70, 821** pasajeros en el 2015, **65, 115** pasajeros en el año 2016 y finalmente en el año 2017 atendió a **61, 051** pasajeros (SCT, 2017) citado en (Salazar-Ávila , 2018).

Otro factor que probablemente influyó en la disminución de las concentraciones de PM₁₀ en los últimos dos años fue la desconexión de la estación Aeropuerto (AP) en el año 2015, ya que en los resultados de 2011 a 2015 se mantuvo dentro de las primeras tres estaciones que registró las concentraciones promedio de PM₁₀ por encima de la NOM-025-SSA1-2014. De ser así, se puede deducir la importancia de que ésta sea habilitada.

En lo que se refiere a las estaciones que registraron concentraciones elevadas de PM₁₀, la hipótesis se cumplió parcialmente, ya que las estaciones de Aeropuerto (AP) y San Mateo Atenco (SM) localizadas en la zona norte registraron las mayores concentraciones de PM₁₀, sin embargo, la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC)

encabezó la problemática, alcanzando las concentraciones más elevadas durante el periodo de análisis (2011-2017), hecho que no se consideró inicialmente.

Las siete estaciones registraron concentraciones que rebasaron los Límites Máximos Permisibles de la NOM de PM_{10} , $75 \mu g/m^3$ (24 horas) y $40 \mu g/m^3$ (anual). La estación más representativa fue San Cristóbal Huichochitlán (SC), la cual alcanzó una concentración promedio de $92.3 \mu g/m^3$ para el periodo 2011-2017, le siguieron las estaciones Aeropuerto (AP) con $73.6 \mu g/m^3$ y San Mateo Atenco (SM) con $68.5 \mu g/m^3$. Las estaciones mencionadas se caracterizan por la cercanía de parques industriales, vialidades que presentan un intenso tráfico vehicular y embotellamientos frecuentes, además de considerar la presencia del Aeropuerto Internacional de Toluca, lo que podría señalarlas como probables fuentes de emisión, respondiendo a lo planteado en la hipótesis del presente trabajo.

Las estaciones Ceboruco (CB) con $62.6 \mu g/m^3$, Metepec (MT) con $57.4 \mu g/m^3$, Oxtotitlán (OX) con $56.5 \mu g/m^3$ y Toluca Centro (CE) con $49.7 \mu g/m^3$, registraron menores concentraciones de PM_{10} , pero continúan rebasando el LMP anual de la NOM.

La estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) presentó concentraciones de PM_{10} que disminuyeron de 2011 a 2017, aunque se mantuvieron por encima de la NOM. Dicha estación se encuentra en un área poco urbanizada que aún tiene caminos de terracería y un flujo vehicular medio principalmente de transporte de carga y público, sin embargo, ésta se encuentra a favor del viento respecto de la zona industrial (INE, 2007; INE, 2009). En este contexto, se cree que dicha estación reporte altas concentraciones probablemente derivadas de la suspensión del material de los caminos y de la erosión de suelos de cultivo.

Derivado de las altas concentraciones encontradas, se llevó a cabo el estudio de los días en los que cada una de las estaciones se hallaba fuera de la NOM, siendo notorio que, durante todo el periodo de análisis, San Cristóbal Huichochitlán rebasa la NOM en 166 días, Aeropuerto en 146 días y San Mateo en 126 días. Las estaciones que registraron un menor número de días fuera de la NOM fueron Toluca Centro y Oxtotitlán en 40 y 58 días al año respectivamente.

Los resultados demuestran que la población de los municipios de la RAMA-ZMVT, sobre todo en la zona norte, se encuentra expuesta a niveles que rebasan el LMP establecido en la NOM en la mayoría del periodo de estudio, situación que debe ser atendida por los organismos competentes, ya que representa un riesgo para la salud. Las exposiciones a largo plazo, aunque se han reducido, continúan por encima de los límites para la protección de la salud de la población, en este sentido, no se debe desestimar la desconexión de la estación Aeropuerto, ya que podría representar una deficiencia en la medición de PM₁₀ en la zona.

Los efectos de la exposición a concentraciones de PM₁₀ fuera de la NOM-025-SSA1-2014 impactan directamente en la salud, principalmente por la composición química, misma que depende de las fuentes de emisión, adquiriendo componentes tóxicos para la salud humana. De acuerdo con el estudio de Romero-Guzmán (2009), en la RAMA-ZMVT se han encontrado PM₁₀ compuestas por enlaces¹ como C-S, Ca-S-O, C-S-V-Ti, Si-Al-O, C-O, así como Fe, originados por procesos de combustión, materiales de construcción y material de origen biológico. Además de encontrar algunos Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

Otro estudio llevado a cabo por González-González (2009), determinó la distribución y composición química de las PM₁₀ en la RAMA-ZMVT. Encontró elementos como C, O, F, Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Ba y Pb² provenientes algunos de ellos de fuentes fijas y móviles, así como de procesos de combustión y partículas por las obras de construcción. Se encontró Fe probablemente emitido por los escapes de los vehículos o procesos de transformación en la industria.

Encontró que las PM₁₀ registradas en la zona norte presentaron cantidades elevadas de C, Fe y Zn, atribuidas a la cercanía con la zona industrial, al tráfico vehicular y las actividades del Aeropuerto Internacional de Toluca.

¹ C= Carbono; S= Azufre; Ca= Calcio; O= Oxígeno; V= Vanadio; Ti= Titanio; Al= Aluminio
; Si= Silicio; Fe= Hierro

² F = flúor; Na= Sodio; Mg= Magnesio; Al= Aluminio; Cl= Cloro; K= Potasio; Mn= Manganeseo; Zn= Zinc; Ba= Bario; Pb=Plomo

Para el caso específico de la estación San Cristóbal que como se ha mencionado se ubica en una zona rural, se encontró una acumulación de K, por la quema de cultivos; y Zn probablemente por el desgaste de las llantas y como antidetonante de combustibles. La mayoría de estos elementos contenidos en las PM_{10} son nocivas para el organismo humano, incrementando el riesgo de la exposición de la población a las concentraciones de PM_{10} encontradas en la presente investigación.

Como es de observarse, la ZMVT presenta un fuerte problema de contaminación atmosférica por PM_{10} , puesto que sus concentraciones exceden los Límites Máximos Permisibles de la NOM-025-SSA1-2014, sumando a ellos que estamos respirando constantemente estas partículas tóxicas para nuestro organismo por su composición química.

Según SEMARNAT, 2013, la ZMVT ocupa el cuarto lugar de las ciudades con mayores concentraciones de PM_{10} según datos del periodo 2000-2016. El primer lugar lo ocupa Mexicali; en segundo lugar, Ciudad Juárez; y en tercer lugar el Área Metropolitana de Monterrey (AMM). Por otro lado, entre las ciudades que presentan un mayor número de días fuera de la NOM están AMM, la ZMVT, la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) y la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

Los datos anteriores y los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten deducir que, si bien la zona de estudio lleva a cabo el monitoreo de las PM_{10} y se han creado programas para la gestión de la calidad del aire en relación con el cumplimiento de la normatividad oficial, no se ha logrado disminuir la contaminación por PM_{10} . En este sentido, aunque la zona de estudio cuenta con los instrumentos necesarios para la gestión de la calidad del aire, es posible cuestionar su funcionalidad. No existe una regulación concreta de la calidad del aire, pues hasta ahora la RAMA no tiene una justificación objetiva de la desactivación de la estación aeropuerto aun cuando ésta se encuentra en un punto clave, con presencia de actividad aeroportuaria causante de emisiones de PM_{10} y otros contaminantes criterio.

Conclusiones

Dando respuesta al objetivo general se llevó a cabo el análisis del comportamiento de las concentraciones de PM_{10} a partir de los datos de la RAMA-ZMVT, el cual permitió identificar las estaciones que reportaron mayor problema de contaminación por PM_{10} durante el periodo 2011- 2017

Respecto al comportamiento horario, se encontró que la población está expuesta a concentraciones de PM_{10} por encima del Límite Máximo Permisible establecido en la NOM-025-SSA1-2014 en un horario matutino, entre las 8:00 y 12:00 horas, alcanzando las concentraciones máximas a las 10:00 horas en la mayoría de los casos, coincidiendo con la hora de mayor movimiento económico e industrial en la zona de estudio.

En lo que se refiere a las concentraciones de PM_{10} por mes, todas las estaciones registraron la misma tendencia por encima de los Límites Máximos Permisibles establecidos en la NOM-025-SSA1-2014 durante los meses de la época invernal (noviembre a febrero) derivado de las condiciones meteorológicas que se presentan en la época. Respecto a la época de lluvias (junio a octubre) se presentaron concentraciones por debajo del límite de la NOM presentando una correlación negativa considerable del 80% entre la precipitación y las concentraciones de PM_{10} . La variación de la precipitación media anual en estos meses determinó el 64% de la variación de las concentraciones de PM_{10} , representando una variable meteorológica importante para la remoción o permanencia de dicho contaminante en la atmósfera.

En las concentraciones anuales se encontró que los primeros años del periodo de estudio (2011 a 2013) presentaron las concentraciones más elevadas y por supuesto por encima del Límite Máximo Permisible establecido en la NOM-025-SSA1-2014. Pese a que, del año 2014 al año 2016 se presentó una disminución de las concentraciones de PM_{10} , en el año 2017 nuevamente se incrementaron, sin embargo, dicho incremento no fue mayor al presentado durante 2011-2013, probablemente por causas como el incremento de las industrias y del parque

vehicular, resultando necesario la aplicación de otras pruebas estadísticas para explicar dicho fenómeno.

La mayoría de las estaciones, sobre todo las ubicadas en la zona norte (San Cristóbal Huichochitlán, Aeropuerto y San Mateo Atenco) presentaron una heterogeneidad en los datos de las concentraciones de PM_{10} dificultando deducir la tendencia del comportamiento de las PM_{10} en el tiempo.

Las estaciones que registraron las concentraciones de PM_{10} por encima del Límite Máximo Permisible establecido en la NOM-025-SSA1-2014 fueron San Cristóbal Huichochitlán (SC), Aeropuerto (AP) y San Mateo Atenco (SM). Particularmente la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) presentó un comportamiento notorio en el análisis horario, mensual y anual registrando frecuentemente concentraciones por encima de la NOM. Dicha estación probablemente recibe contribuciones de PM_{10} primario por el material en suspensión de los caminos sin pavimentar o proveniente de la erosión del suelo, ya que se encuentra en una zona rural, mientras que las estaciones Aeropuerto y San Mateo Atenco probablemente reciben contribuciones de PM_{10} emitidas de los automóviles y las industrias.

Respecto a la evaluación del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 que establece el Límite Máximo Permisible de PM_{10} para la protección de la salud, se encontró que las estaciones que rebasaron en un mayor número de días la NOM en mención fueron San Cristóbal Huichochitlán (SC), la cual rebasó la NOM en 166 días, Aeropuerto (AP) en 146 días y San Mateo Atenco en 126 días. Las estaciones que registraron un menor número de días fuera de la NOM fueron Toluca Centro (CE) y Oxtotitlán (OX) con 40 y 58 días al año respectivamente.

La hipótesis se cumplió parcialmente, ya que las estaciones de la zona norte de la RAMA-ZMVT, Aeropuerto (AP) y San Mateo Atenco (SM) efectivamente estuvieron dentro de las que registraron mayores concentraciones de PM_{10} durante el periodo de estudio, coincidiendo con su cercanía a la zona industrial y con las avenidas de intenso tráfico vehicular. Sin embargo, la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) al estar ubicada en una zona rural, no se esperaba que presentara las mayores concentraciones de PM_{10} .

Recomendaciones

Los efectos de la contaminación atmosférica dependen del tiempo de exposición y concentración a la que se someten las personas, a mayores concentraciones de PM_{10} , mayor deterioro en la salud por la aparición de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (WHO, 2018). Según los resultados obtenidos en el presente trabajo se considera oportuno enlazarlos con investigaciones sobre las afectaciones en la salud en relación con las concentraciones de PM_{10} para el caso específico de la población asentada en los municipios de la RAMA-ZMVT.

Informar a la población sobre los efectos de las PM_{10} en la salud y en el medio ambiente, ya que por su tamaño es material que constantemente estamos respirando además de la heterogeneidad en su composición química la cual incrementa el riesgo ante la exposición a este contaminante.

La OMS estima que una reducción media anual de las PM_{10} de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, permitiría reducir el número de defunciones relacionadas con la contaminación alrededor de un 15% (OMS, 2018). Derivado del incumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 observado en el presente estudio, se sugiere disminuir los Límites Máximos Permisibles con base en las recomendaciones de la OMS, o en su caso impulsar el cumplimiento de la normatividad actual, la cual no representa gran utilidad si no se cumple.

Se sugiere el aumento en el número de estaciones y su ubicación en zonas estratégicas y representativas para cubrir en su totalidad los municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, y de este modo contar con información más completa y sea posible llevar a cabo un mejor diagnóstico de la calidad del aire. A su vez, se sugiere un mantenimiento constante de los equipos de medición para garantizar su funcionamiento, ya que una debilidad identificada en los datos de la RAMA-ZMVT fueron bases de datos incompletas, las cuales reportaron datos no válidos.

Asimismo, la estación Aeropuerto se sugiere sea reubicada a la brevedad por la importancia de la medición de contaminantes de la zona, ya que durante el periodo

de estudio fue una de las estaciones que reportó las concentraciones más elevadas de PM_{10} y a partir de su desconexión, las concentraciones de PM_{10} disminuyeron, indicando que las mediciones reportadas en dicha estación probablemente aporten una buena parte de la información sobre la contaminación por PM_{10} en la zona de estudio.

Incentivar una movilidad urbana sustentable, que contribuya a despejar los puntos de conflicto vial causantes de emisión de PM_{10} .

Claro está que no es posible hacer mucho respecto a las políticas públicas, sin embargo, es una atribución o responsabilidad del gobierno del Estado de México exigir a las industrias que cumplan con los requerimientos ambientales para su funcionamiento dentro del territorio considerando en este caso, que pueden ser fuentes directas generadoras de PM_{10} , pero también de gases precursores de éstas por ejemplo Óxidos de Azufre (SO_x) y Óxidos de nitrógeno (NO_x).

Respecto a estudios posteriores, se sugiere profundizar en el análisis del comportamiento de las concentraciones anuales de PM_{10} utilizando herramientas que permitan un análisis más concreto y preciso, como el uso de estadística inferencial, la cual permitiría explicar la causalidad del incremento y decremento de las concentraciones de PM_{10} en determinados años en la zona de estudio.

Bibliografía

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.)*. Acta Nova, 3(2), pp. 422-442.

Auffhammer, M., Bento, A. M. & Lowe, S. E., 2009. *Measuring the effects of the Clean Air Act Amendments on Ambient PM₁₀ concentrations: The critical importance of a spatially disaggregated analysis*. Journal of Environmental Economics & Management.

Camacho-García, M. O. & Flamand, L., 2008. *Políticas intergubernamentales para controlar la contaminación del aire en ciudades mexicanas. Una evaluación*. Gestión y Política Pública, XVII(2), pp. 261-313.

Campos, A. y otros, 2008. *Monitoreo de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Chihuahua (Norte de México) como una herramienta para la gestión de la calidad del aire*. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales , 4(3), pp. 357-366.

Canales-Rodríguez, M. Á., 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*. Información Tecnológica, 25(6), pp. 13-22.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2017. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. México: DOF: Diario Oficial de la Federación.

Cuellar, F., Borja, M. A., Ordoñez, E. & Rodríguez, I., 2009. *Análisis temporal de las concentraciones y morfología de partículas suspendidas menores a 10 micrómetros de la zona industrial del Valle de Toluca, Estado de México*. Afinidad LXVI, Septiembre-October.

Darré-Castell, E., 2011. *Líquenes como Bioindicadores de Contaminación Atmosférica en Montevideo - Uruguay*. Universidad de la República.

De la Luz-González, G., 2000. *Calidad del Aire en las Principales Ciudades de México*. México: Dirección General de Gestión e Información Ambiental. Instituto Nacional de Ecología.

Dickson, 2000. *Química Enfoque Ecológico*. México: Limusa, S.A. DE C.V..

EC, 2017. (European Comission). [En línea] Disponible en: http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm#_blank [Último acceso: 26 abril 2018].

EEA, 2017. *Contaminación Atmosférica. La contaminación atmosférica perjudica la salud humana y el medio ambiente*. [En línea] Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/themes/air/intro>

EPA, 2017. *AirNow*. [En línea] Disponible en: <https://cfpub.epa.gov/airnow/index.cfm?action=aqibasics.particle> [Último acceso: 22 Febrero 2018].

Figueroa-Montaño, A. y otros, 2016. *PM₁₀ y O₃ como factores de riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y neumonía en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México*. Ingeniería, 20(1), pp. 14-23.

Figueruelo, J. E. & Dávila, M. M., 2004. *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales*. España: Reverté, S.A..

Flores-Ruiz, J. H. y otros, 2010. *Estimación del riesgo a la exposición de partículas suspendidas en el Valle de Toluca*. Ciencia Ergo Sum, 17(1), pp. 72-80.

García-Chávez, M. d. I. A., 2014. *Análisis correlacional entre el incremento de los automóviles particulares y la concentración de partículas menores a diez micrómetros (PM₁₀) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante el periodo 2006-2011*. Toluca, Estado de México: Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma del Estado de México.

GEM, 2004. *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2004*. Secretaría de Medio Ambiente.

GEM, 2005. *Plan Regional de Desarrollo Urbano del Valle de Toluca*. Estado de México.

GEM, 2007. *Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 2007-2011*. Estado de México: Secretaría del Medio Ambiente.

GEM, 2010. *Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 2007-2011. Informe de evaluación año 2009*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

GEM, 2012. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de Toluca 2012-2017*. Estado de México(Estado de México): Secretaría del Medio Ambiente.

GEM, 2014. *Inventario de Emisiones del Estado de México*. Estado de México: Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático (IEECC).

Gobierno de España, 2017. *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. [En línea] Disponible en: https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatiles.aspx [Último acceso: 08 Agosto 2018].

Gómez-Comba, C. A., 2017. *Contaminación del Aire en Medellín por PM₁₀ y PM_{2.5} y sus efectos en la Salud*. Medellín: Universidad Militar Nueva Granada.

González-González, C. A., 2009. *Análisis de PST por microscopía y COV por cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas en el Valle de Toluca*. Toluca: Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

GPA. Gobierno del Principado de Asturias, 2016. *Modelización de la contaminación por partículas PM₁₀ en la Aglomeración de Gijón*. Consejería de Fomento, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente.

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. & Baptista-Lucio, M. P., 2010. *Metodología de la investigación*. Quinta ed. México: Mc Graw Hill.

Holst, J., Mayer, H. & Holst, T., 2008. *Effect of meteorological exchange conditions on PM₁₀ concentration*. Meteorologische Zeitschrift, Junio, 17(3), pp. 273-282.

IGCEM, 2015. *Datos e Indicadores de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*.

INE, 2007. *Instituto Nacional de Ecología. Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas*. México, D.F. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

INE, 2009b. *El estado de la calidad del aire en México: 18 ciudades*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

INE, 2009. *Instituto Nacional de Ecología. Cuarto Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

INECC, 2017. *Estado de la Calidad del Aire en México*. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación Ambiental.

INEGI, 2010. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. [En línea] Disponible en: http://www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/consulta.aspx?p=pob&c=1 [Último acceso: agosto 2018].

INEGI, 2015. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. [En línea] Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=15#tabMCcollapse-Indicadores> [Último acceso: agosto 2018].

INEGI, 2018. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Mapa digital de México*. [En línea] Disponible en: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jE5LjM1Mzk1LGxvbjotOTkuNjg4MTIsejo2LGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3xjMTAxfGN1c3Y2> [Último acceso: 28 julio 2018].

INEGI, 2018. *Mapa Digital de México para escritorio Versión 6.3.0. Marco Geoestadístico Nacional 2010*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Inza-Aguirre, A. y otros, 2006. *Estudio de los niveles de PM₁₀ y PM_{2.5} en un área urbana con influencia industrial siderometalúrgica (Beasain, Guipúzcoa)*. Servicio de Geocronología y Geoquímica Isotópica. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad del País Vasco.

Larissi, I. K. y otros, 2010. *PM₁₀ Concentration Levels in the Greater Athens Area, Greece*. Fresenius Environmental Bulletin, 19(2), pp. 226-231.

LGEEPA, 2012. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México: DOF: Diario Oficial de la Federación.

Maraziotis, E., Sarotis, L., Marazioti, C. & Marazioti, P., 2008. *Statistical analysis of inhalable (PM₁₀) and fine particles (PM_{2.5}) concentrations in urban region of patras, Greece*. Global Nest Journal, 10(2), pp. 123-131.

Martin, P. B., 2005. *Contaminación del aire por material particulado en la Ciudad de Buenos Aires*. Buenos Aires : Universidad de Buenos Aires.

Mercado-García, A. & Fernández-Constantino, Ó. A., 2002. *La emisión de contaminantes industriales en las entidades federativas de México*. Comercio Exterior, 52(3), pp. 208-214.

Mogrovejo-Tenecela, F. M., 2015. *Evaluación de las tendencias de calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante los años 2000-2013*. Cuenca Ecuador: Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca.

NOM-025-SSA1-2014, 2014. *NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas*. México: DOF: Diario Oficial de la Federación.

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. Actualización Mundial 2005*. Organización Mundial de la Salud.

OMS, 2018. *Calidad del Aire y Salud*. [En línea] Disponible en [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) [Último acceso: 21 06 2018].

OMS, 2018. *Organización mundial de la Salud*. [En línea] Disponible en http://www.who.int/publications/list/who_sde_phe_oeh_06_02/es/ [Último acceso: 10 agosto 2018].

OMS, 2018. *Salud Pública y Medio Ambiente*. [En línea] Disponible en http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_agg/es/ [Último acceso: 10 agosto 2018].

OPS, 2017. *Organización Panamericana de la Salud*. [En línea] Disponible en https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918%3A2017-ambient-air-pollution&catid=2619%3Aenvironmental-health&Itemid=42246&lang=es [Último acceso: 10 agosto 2018].

Pachón, J. E. & Sarmiento-Vela, H., 2008. *Análisis espacio-temporal de la concentración de metales pesados en la localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia*. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquía, pp. 120-133.

Pacsi-Valdivia, S. A., 2016. *Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por Material Particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en Lima Metropolitana*. Anales Científicos, 77(2), pp. 273-283.

Plan Regional de Desarrollo Urbano del Valle de Toluca, 2005. *Plan Regional de Desarrollo Urbano del Valle de Toluca*. Gobierno del Estado de México.

PMDUT, 2013-2015. *Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca*. Toluca: H. Ayuntamiento de Toluca 2013-2015.

RAMA, 2018. RAMA. [En línea]
Disponible en <http://rama.edomex.gob.mx/calidad-aire>
[Último acceso: julio 2018].

RAMA, 2018. *Red Automática de Monitoreo Ambiental. Contaminación Atmosférica.* [En línea]

Disponible en <http://rama.edomex.gob.mx/contaminacion-atmosferica>

RAMA, 2018. *Red Automática de Monitoreo Atmosférico.* [En línea]
Disponible en http://rama.edomex.gob.mx/equipos_medicion
[Último acceso: 10 agosto 2018].

RAMA, 2018. *Red Automática de Monitoreo Atmosférico. Contaminación Atmosférica.* [En línea]

Disponible en <http://rama.edomex.gob.mx/contaminacion-atmosferica/>

Reglamento de la LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, 2014. *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.* México: DOF: Diario Oficial de la Federación.

Riojas-Rodríguez, H., Schilman, A., López-Carrillo, L. & Finkelman, J., 2013. *La salud ambiental en México: situación actual y perspectivas futuras.* salud pública de México, noviembre-diciembre, 55(6), pp. 638-649.

Rojas, N. Y., 2007. *Aire y problemas ambientales de Bogotá.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.

Romero-Guzmán, E. T., 2009. *Insitituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).* [En línea]

Disponible en <http://www.inin.gob.mx/plantillas/investigacion.cfm?clave=4&campo=CB-705&id=215&year=2009>

[Último acceso: 12 Marzo 2018].

Romero-Guzmán, E. T., Reyes-Gutiérrez, L. R., Sandoval-Pérez, A. & Morelos-Martínez, J., 2007. *Análisis químico-morfológico y evaluación de la dsitribución de materia particulada en el Valle de Toluca.* XVII Congreso Técnico Científico ININ-SUTIN "Dr. Carlos Vélez Ocón", 4,5 y 6 Diciembre.pp. 1-5.

Rubiano-Olaya, L. J. & Chaparro De Valencia, M., 2006. *Delimitación de áreas de isocontaminación atmosférica en el Campus de la Universidad Nacional de Colmbia Mediante el Análisis de Bioindicadores (Líquenes epífitos).* Acta Biológica Colombiana, 11(2), pp. 87-102.

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.* Toluca: Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma del Estado de México .

Sánchez-Muñoz, E. H., 2015. *Comportamiento espacial de las partículas suspendidas PM₁₀ y estrategias de gestión ambiental del aire en la Zona Metropolitana de Toluca, México.* Toluca: Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México. .

Secretaría de Economía, 2016. *Información Económica y Estatal. Estado de México*. [En línea]

Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/115990/estado_de_mexico.pdf
[Último acceso: 13 03 2018].

SEMARNAT, 2007. *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. [En línea]
Disponible en <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>

SEMARNAT, 2007. *La atmósfera, esencial para el mantenimiento de la vida*. [En línea]
Disponible en <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/atmosfera?idiom=es>

SEMARNAT, 2011. *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}*. [En línea]
Disponible en <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>
[Último acceso: 8 agosto 2018].

SEMARNAT, 2013. *Cuadernos de divulgación ambiental. Calidad del aire: una práctica de vida*. Primera ed. México.

SEMARNAT, 2013. *Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México. Atmósfera- Calidad del aire*. [En línea]

Disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores13/conjuntob/01_atmosfera/01_calidad_aire_esquema.html

[Último acceso: 10 Septiembre 2018].

SEMARNAT, 2014. *coneval*. [En línea]

Disponible en https://www.coneval.org.mx/Informes/Evaluacion/Diagnostico/Diagnostico_2014/Diagnostico_2014_SEMARNAT_G026.pdf

[Último acceso: 15 07 2018].

SEMARNAT, 2018. *Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire)*. [En línea]

Disponible en <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>

[Último acceso: 6 agosto 2018].

SEMARNAT, 2018. *SEMARNAT*. [En línea]

Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE01_04&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce

[Último acceso: 26 04 2018].

Silva-Vinasco, J. P. & Canchala-Nastar, T. d. R., 2013. *Variación espacial y temporal de concentraciones de PM₁₀ en el área urbana de Santiago de Cali, Colombia*. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, 12, pp. 129-141.

SIMAT, 2018. *Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. El invierno y la calidad del aire. Guía para proteger tu salud*. [En línea]

Disponible en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/simat-folleto->

[invierno.pdf](#)

[Último acceso: julio 2018].

SIMAT, 2018. *Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Partículas. Contaminación del Aire.* [En línea]

Disponible en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/simat-folleto-particulas.pdf>

[Último acceso: julio 2018].

SIMAT, 2018. *Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).* [En línea]

[Último acceso: julio 2018].

SMA, 2018. *Red de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (RAMA).* [En línea]

Disponible en <http://rama.edomex.gob.mx/contaminacion-atmosferica/caracteristicas>

Solarte, P. I., Caicedo, M. & Restrepo, S., 2002. *Neumología. Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Bogotá.* Revista Médica Sanitas, 5(2).

Téllez-Rojo, M. y otros, 2000. *Daily respiratory mortality and PM₁₀ pollution in Mexico City: importance of considering place of death.* European Respiratory Journal, Volumen 16, pp. 391-396.

Triantafyllou, A. G., 2000. *Patterns and concentrations of PM₁₀ in a Mountainous Basin Region.* Journal of the Air & Waste Management Association, 50(6), pp. 1017-1022.

Unal, Y. S., Toros, H., Deniz, A. & Incecik, S., 2011. *Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in Istanbul metropolitan area.* Atmospheric Environment, Volumen 45, pp. 5504-5513.

UNICEF, 2016. *Clear the air for children.* Nueva York: United Nations Children's Fund (UNICEF).

UNICEF, 2018. *17 millones de bebés respiran aire contaminado.* [En línea] Disponible en: <https://www.unicef.es/noticia/17-millones-de-bebes-respiran-aire-contaminado>

[Último acceso: 10 agosto 2018].

UNICEF, 2018. *UNICEF para cada niño.* [En línea]

Disponible en <https://www.unicef.es/prensa/unicef-informe-polucion>

[Último acceso: 10 agosto 2018].

Vega, E. y otros, 2004. *Analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ in the Atmosphere of Mexico City during 2000-2002.* Journal of the Air & Waste Management Association, 54(7), pp. 786-798.

Velasco-García, M., 2005. *La Calidad del Aire Asociado con Metales Pesados en la Ciudad de Manizales.* Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

Versañez-Vences, C. M., 2014. *Estudio del estado y evolución de la cubierta vegetal en Áreas Naturales Protegidas y áreas verdes en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca del 2000 al 2008.* Toluca: Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Villa-Mar, F. V., 2007. *Beneficios económicos de reducir la contaminación por PM₁₀ en el Área Metropolitana de Monterrey*. Nuevo León: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey .

WHO, 2018. *World Health Organization*. [En línea] Disponible en http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/ [Último acceso: 13 agosto 2018].

Yang, K.-L., 2002. *Spatial and seasonal variation of PM₁₀ mass concentrations in Taiwan*. Atmospheric Environment, Volumen 36, pp. 3403-3411.

Zapata-Palacio, E. J., 2015. *Análisis ambiental descriptivo de patologías respiratorias y contaminación del aire por Material Particulado Respirable (PM₁₀) en la Localidad de Fontibón, Bogotá D.C.*. Bogotá.