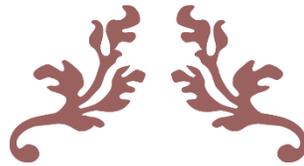




**Universidad Autónoma del Estado de México**

**Facultad de Planeación Urbana y Regional**



**Correlación entre la variabilidad de la  
temperatura y las concentraciones de  
Ozono a partir de los datos de la RAMA-  
ZMVT, 2011-2016**



**TESIS**

**Que para obtener el Título de:**

**Licenciada en Ciencias Ambientales**

**Presenta:**

**C. Laura Itzel Milpa Barrios**

**Directora de tesis:**

**Dr. en A. Ana Marcela Gómez Hinojos**

**Toluca de Lerdo, Estado de México, agosto 2018.**

## **Dedicatorias**

**A mis padres, que siempre me han dado su apoyo por más malas o impredecibles que parecieran mis decisiones y jamás dudar de mí,**

**A mi mamá por enseñarme que con la perseverancia y trabajo constante todo se puede, por brindarme un abrazo y palabras de aliento en los momentos más difíciles, y por siempre dar su mejor sonrisa a los demás,**

**A mi papá que nos demostró que las capacidades físicas no son limitantes de nada, que basta con querer para hacer las cosas, y que hay que tener coraje para enfrentarnos a lo que sea,**

**Gracias por eso y más**

**Los amo**

## **Agradecimientos**

**A mis hermanas por ser un ejemplo para mí, a Karen que ha estado presente, me alienta y me motiva a cumplir mis objetivos,**

**A mi hermana Ana por ser una persona cariñosa y darme el regalo más grande de ser tía.**

**A mis amigos por escucharme y por compartir juntos momentos especiales.**

**A Mau, por brindarme tu apoyo, ofrecerme palabras de consuelo y sobre todo por tú amor.**

**A la Dr. En A. Ana Marcela Gómez Hinojos que me apoyó en los momentos buenos y los más difíciles durante todos estos años de mi formación profesional, principalmente éste.**

**A mis revisoras M. en C. Adriana Guadalupe Guerrero Peñuelas y Dr. En G. María Estela Orozco Hernández que con sus observaciones fortalecieron este trabajo.**

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>ÍNDICE DE GRÁFICAS .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>RESUMEN.....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>METODOLOGÍA.....</b>  | <b>14</b> |
| A.    CONTRIBUCIÓN DE LA PROPUESTA .....   | 14        |
| B.    HIPÓTESIS .....  | 14        |
| C.    ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN .....  | 17        |
| D.    DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....   | 17        |
| E.    INSTRUMENTO DE MEDICIÓN .....  | 18        |
| F.    RECOLECCIÓN DE DATOS.....  | 18        |
| G.    ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....   | 18        |
| <b>1.    ANTECEDENTES .....</b>  | <b>19</b> |
| <b>2.    MARCO TEÓRICO- CONCEPTUAL .....</b>                                     | <b>27</b> |
| 2.1    RADIACIÓN SOLAR.....  | 28        |
| 2.2    EFECTO INVERNADERO .....  | 33        |
| 2.2.1 <i>Gases de efecto invernadero.....</i>                                    | <i>35</i> |
| 2.3    VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA.....                                       | 39        |
| 2.4    CAMBIO CLIMÁTICO .....  | 41        |
| 2.5    CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA .....   | 44        |
| 2.5.1 <i>Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).....</i>            | <i>45</i> |
| 2.6    REACCIONES FOTOQUÍMICAS.....  | 47        |
| 2.7    OZONO .....   | 48        |
| 2.7.1 <i>Ozono estratosférico.....</i>   | <i>49</i> |
| 2.7.2 <i>Ozono troposférico.....</i>   | <i>51</i> |
| 2.7.3 <i>Sustancias Agotadoras de Ozono .....</i>                                | <i>53</i> |
| 2.8    SMOG FOTOQUÍMICO .....  | 58        |
| 2.9    EFECTOS EN LA SALUD Y EL AMBIENTE.....                                    | 61        |
| 2.10    CORRELACIÓN DE PEARSON .....   | 65        |
| <b>3    MARCO CONTEXTUAL .....</b>   | <b>66</b> |
| 3.1    RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO (RAMA) DE LA ZMVT .....           | 69        |
| 3.1.1 <i>Sitios de muestreo de la RAMA-ZMVT .....</i>                            | <i>70</i> |
| 3.1.2 <i>Medición de lo contaminantes criterios en la RAMA-ZMVT.....</i>         | <i>75</i> |
| <b>4    MARCO NORMATIVO .....</b>  | <b>78</b> |
| 4.1    MARCO NORMATIVO INTERNACIONALES SOBRE EL OZONO .....                      | 79        |
| 4.1.1 <i>Convenio de Viena.....</i>  | <i>79</i> |
| 4.1.2 <i>Protocolo de Montreal.....</i>  | <i>80</i> |
| 4.1.3 <i>Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.....</i> | <i>80</i> |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.1.4    | <i>Protocolo de Kioto</i> .....  | 81         |
| 4.1.5    | <i>NAAQS, Estados Unidos</i> .....   | 82         |
| 4.2      | <b>NORMATIVIDAD NACIONAL</b> .....   | 83         |
| 4.2.1    | <i>Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos</i> .....                   | 83         |
| 4.2.2    | <i>Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEGEEPA)</i> ..... | 84         |
| 4.2.3    | <i>Ley General de Cambio Climático (LGCC)</i> .....                                  | 87         |
| 4.2.4    | <i>NOM-156-SEMARNAT-2012</i> .....   | 88         |
| 4.2.5    | <i>NOM-020-SSA1-2014</i> .....   | 89         |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS</b> .....  | <b>92</b>  |
| 5.1      | <b>ANÁLISIS POR AÑO DE LAS VARIABLES</b> .....                                       | 94         |
| 5.1.1    | <i>Análisis año 2011</i> .....   | 94         |
| 5.1.2    | <i>Análisis año 2012</i> .....   | 100        |
| 5.1.3    | <i>Análisis año 2013</i> .....   | 107        |
| 5.1.4    | <i>Análisis año 2014</i> .....   | 113        |
| 5.1.5    | <i>Análisis año 2015</i> .....   | 119        |
| 5.1.6    | <i>Análisis año 2016</i> .....   | 125        |
| 5.2      | <b>ANÁLISIS DE TODOS LOS AÑOS DE LAS ESTACIONES</b> .....                            | 130        |
| 5.2.1    | <i>Por años</i> .....  | 130        |
| 5.2.2    | <i>Por estaciones</i> .....  | 138        |
| 5.3      | <b>CORRELACIÓN DE CONCENTRACIONES DE O<sub>3</sub> Y TEMPERATURA</b> .....           | 143        |
|          | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....  | <b>148</b> |
|          | <b>RECOMENDACIONES</b> .....   | 152        |
|          | <b>ANEXOS</b> .....  | <b>154</b> |
|          | <b>ANEXO 1</b> .....   | 155        |
|          | <i>Características socioeconómicas</i> .....   | 155        |
|          | <i>Dinámica poblacional</i> .....  | 155        |
|          | <i>Estructura poblacional por edades</i> .....                                       | 156        |
|          | <b>ANEXO 2</b> .....   | 158        |
|          | <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....  | <b>165</b> |

## Índice de ilustraciones

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1 Metodología .....  |    |
| Ilustración 2 Espectro electromagnético .....                              | 29 |
| Ilustración 3 Capas de la atmósfera .....                                  | 31 |
| Ilustración 4 Radiación solar .....  | 32 |
| Ilustración 5 Efecto invernadero .....                                     | 34 |
| Ilustración 6 Degradación de O <sub>3</sub> .....                          | 56 |
| Ilustración 7 Formación de smog fotoquímico.....                           | 59 |
| Ilustración 8 Mapa de la zona de estudio.....                              | 67 |
| Ilustración 9 Mapa de ubicación de las 7 estaciones de la RAMA-ZMVT .....  | 72 |
| Ilustración 10 Radio de influencia de las estaciones de la RAMA-ZMVT ..... | 73 |

## Índice de tablas

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1 Gases de Efecto Invernadero directos .....   | 36  |
| Tabla 2 Gases de Efecto Invernadero indirectos.....  | 37  |
| Tabla 3 Potencial de Calentamiento Global de los GEI regulados por el Protocolo de Kioto.....  | 38  |
| Tabla 4 -Tipos de factores de forzamiento.....   | 39  |
| Tabla 5 Interpretación del IMECA.....  | 46  |
| Tabla 6 Sustancias agotadoras de O <sub>3</sub> consideradas por el protocolo de Montreal..... | 57  |
| Tabla 7 Efectos en humanos a exposiciones de O <sub>3</sub> .....                              | 63  |
| Tabla 8 Estaciones de la RAMA-ZMVT .....   | 71  |
| Tabla 9 municipios de la RAMA-ZMVT .....   | 71  |
| Tabla 10 Parámetros medidos por la RAMA y unidad de medida (BDH).....                          | 76  |
| Tabla 11 Parámetros monitoreados en las estaciones de la RAMA-ZMVT.....                        | 77  |
| Tabla 12 NAAQS para el O <sub>3</sub> .....  | 82  |
| Tabla 13 Normas de calidad del aire de la OMS, EUA y México .....                              | 91  |
| Tabla 14 Datos de correlación. Promedios por hora de todos los años .....                      | 144 |
| Tabla 15 Datos de correlación. Promedios por mes de todos los años.....                        | 146 |
| Tabla 16 Número de población por municipio.....  | 155 |

## Índice de gráficas

|  |     |
|--|-----|
| Gráfica 1 Temperatura por mes año 2011 .....   | 94  |
| Gráfica 2 Promedio de temperatura por hora año 2011 .....                            | 95  |
| Gráfica 3 Promedio de concentraciones de O <sub>3</sub> año 2011 .....               | 96  |
| Gráfica 4 Registros máximos de O <sub>3</sub> por mes del año 2011 .....             | 97  |
| Gráfica 5 Promedio de las concentraciones de O <sub>3</sub> por hora año 2011 .....  | 99  |
| Gráfica 6 Registros máximos de O <sub>3</sub> por hora del 2011 .....                | 100 |
| Gráfica 7 Promedio de temperatura por mes año 2012 .....                             | 101 |
| Gráfica 8 Temperatura por hora año 2012 .....  | 102 |
| Gráfica 9 Promedio de concentraciones de O <sub>3</sub> año 2012 .....               | 103 |
| Gráfica 10 Registros máximos de O <sub>3</sub> por mes del año 2012 .....            | 104 |
| Gráfica 11 Promedio de las concentraciones de O <sub>3</sub> por hora año 2012 ..... | 105 |
| Gráfica 12 Registros máximos de O <sub>3</sub> por hora del 2012 .....               | 106 |
| Gráfica 13 Promedio de temperatura por mes año 2013 .....                            | 107 |
| Gráfica 14 Promedio de temperatura por hora año 2013 .....                           | 108 |
| Gráfica 15 Promedio de concentraciones de O <sub>3</sub> año 2013 .....              | 109 |
| Gráfica 16 Registros máximos de O <sub>3</sub> por mes del año 2013 .....            | 110 |
| Gráfica 17 Promedio de las concentraciones de O <sub>3</sub> por hora año 2013 ..... | 111 |
| Gráfica 18 Registros máximos de O <sub>3</sub> por hora del 2013 .....               | 112 |
| Gráfica 19 Promedio de temperatura por mes año 2014 .....                            | 113 |
| Gráfica 20 Promedio de temperatura por hora año 2014 .....                           | 114 |
| Gráfica 21 Promedio de concentraciones de O <sub>3</sub> año 2014 .....              | 115 |
| Gráfica 22 Registros máximos de O <sub>3</sub> por mes del año 2014 .....            | 116 |
| Gráfica 23 Promedio de las concentraciones de O <sub>3</sub> por hora año 2014 ..... | 117 |
| Gráfica 24 Registros máximos de O <sub>3</sub> por hora del 2014 .....               | 118 |
| Gráfica 25 Promedio de temperatura por mes año 2015 .....                            | 119 |
| Gráfica 26 Promedio de temperatura por hora año 2015 .....                           | 120 |
| Gráfica 27 Promedio de concentraciones de O <sub>3</sub> año 2015 .....              | 121 |
| Gráfica 28 Promedio de las concentraciones de O <sub>3</sub> por hora año 2015 ..... | 122 |
| Gráfica 29 Registros máximos de O <sub>3</sub> por mes del año 2015 .....            | 123 |
| Gráfica 30 Registros máximos de O <sub>3</sub> por hora del 2015 .....               | 124 |
| Gráfica 31 Promedio de temperatura por mes año 2016 .....                            | 125 |
| Gráfica 32 Promedio de temperatura por hora año 2016 .....                           | 126 |
| Gráfica 33 Promedio de concentraciones de O <sub>3</sub> año 2016 .....              | 127 |
| Gráfica 34 Promedio de las concentraciones de O <sub>3</sub> por hora año 2016 ..... | 128 |
| Gráfica 35 Registros máximos de O <sub>3</sub> por mes del año 2016 .....            | 129 |

|   |     |
|---|-----|
| Gráfica 36 Registros máximos de O <sub>3</sub> por hora del 2016.....                             | 130 |
| Gráfica 37 Promedio anual de temperatura de 2011-2016.....  | 131 |
| Gráfica 38 Días al año excedentes de la NOM-020-SSA1-2014 .....                                   | 132 |
| Gráfica 39 Promedios de O <sub>3</sub> y temperatura por mes (2011-2016) .....                    | 134 |
| Gráfica 40 Registros máximos de O <sub>3</sub> y temperatura por mes (2011-2016) .....            | 135 |
| Gráfica 41 Promedios de O <sub>3</sub> y temperatura por hora (2011-2016).....                    | 136 |
| Gráfica 42 Promedios máximos de O <sub>3</sub> y temperatura por hora (2011-2016).....            | 137 |
| Gráfica 43 Promedios de O <sub>3</sub> y temperatura de los meses por estación .....              | 139 |
| Gráfica 44 Registros máximos de O <sub>3</sub> y temperatura de los meses por estación .....      | 140 |
| Gráfica 45 Promedios de O <sub>3</sub> y temperatura de las horas por estación.....               | 141 |
| Gráfica 46 Registros máximos de O <sub>3</sub> y temperatura de las horas por estación.....       | 142 |
| Gráfica 47 Diagrama de dispersión entre O <sub>3</sub> y temperatura .....                        | 143 |
| Gráfica 48 Diagrama de dispersión de los promedios de O <sub>3</sub> y temperatura por hora ..... | 145 |
| Gráfica 49 Diagrama de dispersión de los promedios por mes.....                                   | 147 |
| Gráfica 50 Pirámide por edades de los 7 municipios del 2010 .....                                 | 157 |

## Resumen

Grandes concentraciones de  $O_3$  en la tropósfera son consideradas como un contaminante de tipo secundario ya que su formación es potenciada por ciertas reacciones que se dan entre la radiación solar y la presencia de Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ), repercutiendo severamente a la salud del ser humano, el medio ambiente y la infraestructura.

En la presente investigación se analizó el comportamiento del  $O_3$  durante las horas del día y los meses durante los años 2011-2016, así como la correlación entre la Variabilidad de la Temperatura y las concentraciones de éste; a partir de los datos registrados por las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, efectuando el procesamiento estadístico a través del programa Excel® y las correlaciones de Pearson.

Encontrando que las horas del día con más concentraciones de  $O_3$  son las horas después de las 11:00 a las 18:00. De igual manera, los meses con más presencia de  $O_3$  durante los años son de abril a junio. Así. los resultados obtenidos muestran coeficientes de correlación de Pearson altos, con relaciones positivas directas, para los casos estudiados.

## Introducción

Las zonas urbanas tienen la característica de que las principales actividades económicas superan los límites de un municipio, uniendo las áreas vecinas urbanas o rurales por medio de la integración socioeconómica. Estas zonas, son vistas como el equivalente del desarrollo, un componente integral, un generador de continuo crecimiento económico y un punto de migración para la búsqueda de nuevas oportunidades para las poblaciones rurales vecinas, en contra parte, en términos ambientales, estas zonas tiende a destruir los recursos naturales y a alterar el medio natural, resultando así efectos perjudiciales para el hombre y el medio natural; uno de estos es la alteración en la calidad del aire a consecuencia de la concentración de grandes cantidades y con ciertas condiciones de algunos elementos en la tropósfera, que los convierten en contaminantes dañinos para el ser humano y el medio ambiente. Tal es el caso de los Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), emitidos por los vehículos y las industrias principalmente, que en combinación con la radiación solar crea al Ozono ( $\text{O}_3$ ), el cual, su función en la estratósfera es de retener el calor como principal GEI, pero en la troposfera representa un peligro para la salud de la población.

En la estratósfera se encuentra una capa de  $\text{O}_3$ , encargada en primer lugar de retener el calor requerido dentro de la atmósfera para mantener la vida en la Tierra, en segundo lugar, se encarga de detener la radiación Ultravioleta de tipo B, radiación perjudicial para los ecosistemas marinos, la productividad agrícola y la vida animal. La destrucción de esta capa se debe a la acción de los Clorofluorocarbonos, CFC, y otras sustancias de origen antropogénico, la liberación de este tipo de sustancias, según González (2010) hacía la atmósfera comenzó a principios del siglo pasado por refrigerantes y aerosoles, desde entonces, éstos han ido ascendiendo lentamente hasta la estratósfera; allí, los átomos de Cloro se liberan reaccionando activamente con el Oxígeno, impidiendo que éste genere  $\text{O}_3$  y formando Monóxido de Cloro (ClO), el cual reacciona con el  $\text{O}_3$  para formar Oxígeno y Cloro, así iterativamente se mantiene la cadena destructora del  $\text{O}_3$  estratosférico,

el resultado ha sido un aumento en los niveles de radiación, impactando sobre la salud humana aumentando el riesgo a contraer cáncer de piel y cataratas, así como el debilitamiento del sistema inmunológico (Coordinación del Programa acción por el Ozono en América Latina y el Caribe, 2010).

En cambio, el O<sub>3</sub> de origen antropogénico encontrado en los niveles más bajos de la atmósfera, la tropósfera, produce daños a la salud y el ambiente, clasificados como de corto plazo, prolongados y de largo plazo, siendo los efectos agudos más presentados la tos y el dolor de pecho, irritación de los ojos, dolor de cabeza pérdidas en la función pulmonar y ataque de asma, la exposición crónica a niveles elevados de O<sub>3</sub> es responsable de pérdidas en el funcionamiento del sistema inmune, envejecimiento acelerado y aumento de la susceptibilidad ante otras infecciones, presentando también daños a las cosechas y a la vegetación (Molina & Molina, 2005).

Estos niveles de O<sub>3</sub> troposférico se ven condicionados por componentes meteorológicos, tales como viento, insolación, humedad y temperatura (Vázquez Garfias, et al., 2005), esta última a causa de las propiedades naturales del O<sub>3</sub> como GEI que lo convierte en un problema, puesto que incentiva las reacciones catalíticas en la atmósfera alterando sus condiciones normales, es decir que mientras se presenten mayores temperaturas las reacciones para la creación de O<sub>3</sub> se verán exponencialmente potenciadas, viendo en este punto la necesidad de monitorear el comportamiento de estas dos variables como efecto de las actividades antropogénicas.

Con base en lo anteriormente expuesto resulta importante observar la relación entre los niveles de O<sub>3</sub> troposférico y el aumento de la temperatura en los últimos años dentro de las áreas de influencia de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de Valle de Toluca (RAMA-ZMVT). Es por eso, que el presente trabajo de investigación busca analizar el comportamiento de las concentraciones de O<sub>3</sub> durante las horas del día y los meses durante los años 2011-2016, así como la correlación entre la Variabilidad de la Temperatura y las concentraciones de éste utilizando los datos de la RAMA-ZMVT,

ya que ésta última es la encargada de monitorear el  $O_3$  y la temperatura junto con otros contaminantes criterio y otras variables ambientales a partir de siete estaciones de monitoreo ubicadas en siete municipios.

La presente investigación se abordó a partir de una metodología cuantitativa de tipo no experimental, en donde mediante el programa de Excel® se obtuvieron promedios de los datos por días, meses y años de las variables de temperatura y concentraciones de Ozono ( $O_3$ ), así como los máximos registrados por horas y meses, permitiendo con esto identificar que las horas del día con más concentraciones de  $O_3$  son las horas después de las 11:00 a las 18:00, y que los meses con más presencia de  $O_3$  durante los años son de abril a junio, que en el área de estudio ha habido una variabilidad de la temperatura con un aumento de dos grados. Así también que las variables muestran coeficientes de correlación de Pearson positivas en los casos estudiados. Como objetivo general se planteó el analizar la correlación entre la Variabilidad de Temperatura y las concentraciones de Ozono a partir de los datos registrados por la RAMA-ZMVT, durante el periodo del 2011-2016, teniendo como objetivos particulares a lo largo de la investigación se buscó contextualizar el área geográfica de influencia de las siete Estaciones de la RAMA y los 7 municipios considerados por la misma, procesando los datos obtenidos de la RAMA por promedios y máximos registrados por mes y año. Así como, correlacionar los datos obtenidos y analizar la representatividad de los datos de la RAMA- ZMVT con base en su área de medición, para así determinar si ha existido variabilidad en la temperatura en ésta zona durante los años 2011-2016.

Para lo cual, el trabajo se encuentra dividido en cinco capítulos: en el primero, los antecedentes, citan las principales investigaciones, trabajos e informes que anteceden a esta investigación; en el segundo a través del marco teórico-conceptual, se abordan los conceptos más relevantes tratados, mencionando por ejemplo las diferencias entre al Efecto Invernadero, Variabilidad de la Temperatura y Cambio Climático; contaminación atmosférica, y las métodos de formación del  $O_3$  en las diferentes partes de la atmósfera junto con sus efectos a la salud y el medio ambiente. El marco contextual del capítulo 3, busca describir y delimitar el área de

estudio como parte del monitoreo atmosférico, describiendo algunos de sus aspectos ambientales y ahonda en la RAMA-ZMVT, su diseño, métodos de análisis, localización de sus siete estaciones en los municipios de Zinacantepec, Toluca, Lerma, Metepec, Ocoyoacac, San Mateo Atenco y Xonacatlán, describiendo los parámetros medidos por cada una de ellas.

El capítulo cuarto, muestra el marco normativo, refiere los principales protocolos y convenios internacionales referentes a la disminución de la capa de O<sub>3</sub> y a la polución de mismo, así como a los estándares de exposición de Estados Unidos; en la segunda parte de este capítulo, se hace mención de la base normativa de México comenzando por la Constitución Mexicana y las leyes que rigen el control de la contaminación a nivel federal y las normas mexicanas vigentes relativas a la exposición al O<sub>3</sub>. Los resultados se exponen en el capítulo 5, a través de diferentes gráficas que representan el comportamiento de los promedios y los máximos registrados en los diferentes años por meses y horas y su análisis; así como el producto de las correlaciones y sus gráficas de dispersión.

## **Metodología**

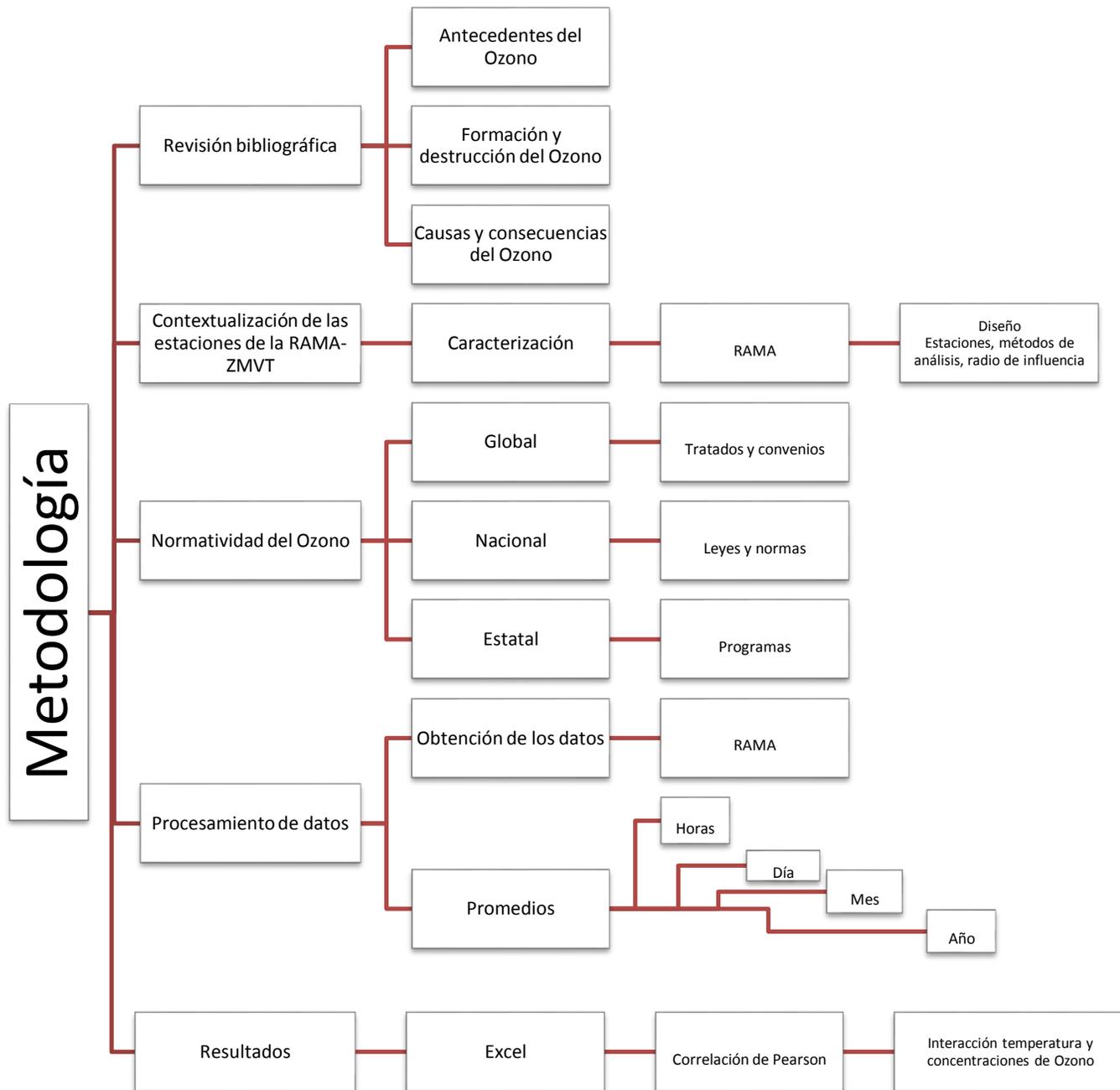
### **A. Contribución de la propuesta**

El análisis de las concentraciones de Ozono, con base en los datos de la RAMA-ZMVT, se constituye en un referente para estudios posteriores con respecto a los posibles daños que la presencia de este gas pudiera representar a la población y el medio ambiente.

### **B. Hipótesis**

Existirá un aumento de la temperatura y las concentraciones de Ozono en los años 2011-2016, acorde con la literatura, en el radio de influencia de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT se deberá observar esta correlación en diferentes momentos, con base en nuevas condiciones derivadas del crecimiento urbano.

Ilustración 1 Metodología



 Revisión bibliográfica:

Investigación documental acerca de los procesos de formación del Ozono ( $O_3$ ), así como sus causas y consecuencias en la salud y el medio ambiente, con el fin de obtener una base referencial para los siguientes capítulos detectando estudios afines realizados en el pasado.

 Contextualización:

Descripción y análisis de las estaciones de la RAMA-ZMVT con el propósito de caracterizar y resaltar peculiaridades de relevancia para la investigación, priorizando a los municipios donde se establecen las siete estaciones de la RAMA y ésta misma.

 Normatividad:

Marco Legal establecido en los diferentes niveles de gobierno (internacional, nacional y estatal) respecto al Ozono ( $O_3$ ) como: concentraciones permisibles, sistemas precautorios y sistemas de minimización.

 Procesamiento de datos:

- Obtención de los datos registrados por las siete estaciones de monitoreo ambiental registradas por la RAMA-ZMVT.
- Por medio del programa de Excel® se cancelaron los datos no válidos identificados con el número -99,999, para que no fueran considerados en los promedios.
- Mediante el mismo programa de Excel® se obtuvieron promedios y valores máximos de los datos por días, meses y años de las variables de temperatura y concentraciones de Ozono ( $O_3$ ).

 Resultados:

Los promedios y máximos obtenidos fueron cargados al programa de Excel®, con el fin de obtener la correlación entre las variables y sus respectivas gráficas.

### **C. Alcance de la investigación**

El alcance de la investigación se elaboró de acuerdo a la clasificación de Danhke (1989,) en la que el tipo de investigación se divide en cuatro, de los que pueden ser: exploratorios, descriptivos, correlacionales y explicativos o experimental, en donde más que ser un tipo de investigación se consideran como puntos o espacios dentro de un continuo de casualidad según (Hernández Sampieri, et al., 2003).

En la realización de la presente investigación únicamente se llevaron a cabo estudios de tipo:

- Descriptivo, debido a que se evalúan y recolectan datos sobre las concentraciones de Ozono y de otras variables como temperatura y radiación solar en un tiempo dado, para describir su comportamiento (Hernández Sampieri, et al., 2003).
- Correlacional, ya que el propósito del estudio es evaluar la relación existente entre las concentraciones de Ozono y la variabilidad de la temperatura en la zona de estudio (Hernández Sampieri, et al., 2003).

### **D. Diseño de la investigación**

La presente investigación es cuantitativa de tipo no experimental, debido a que no se pretende hacer ninguna manipulación intencional de las variables, éstas se presentan continuamente en la atmósfera y sólo se recaban los datos de 2011 a 2016 para su análisis. Con base en la recolección de datos que se realiza en un tiempo único, la investigación es de tipo transeccional o transversal (Hernández Sampieri, et al., 2003).

### **E. Instrumento de medición**

Los instrumentos de medición utilizados para los fines de esta investigación serán en primera instancia una base de datos otorgada por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT de los años 2011- 2016 que por medio de tablas y gráficas elaboradas con ayuda del programa estadístico Microsoft Excel® registrará datos observables que ayudarán a la resolución de la hipótesis. Así también se utilizará de información geográfica, obtenida del portal digital de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) procesada a través del programa ArcGis®, software que se utilizará para el tratamiento, diseño y edición de tal información.

### **F. Recolección de datos**

Se realizaron diferentes visitas a las instalaciones centrales de la RAMA-ZMVT, con la finalidad de obtener los registros de sus estaciones de las variables en cuestión.

### **G. Análisis estadístico**

Se hizo un procesamiento de los datos en el programa de Excel® de la paquetería de Microsoft, obteniendo promedios por día, mes y año, y eliminando los valores no validos de la base de datos, para después correlacionar los promedios con la fórmula de Correlación de Pearson en el mismo programa.

# 1. Antecedentes

En 1974 el Doctor Mario Molina, pionero y uno de los principales investigadores a nivel mundial de la química atmosférica, junto con F.S. Rowland fueron los autores del artículo original prediciendo el adelgazamiento de la capa de O<sub>3</sub> como consecuencia de la emisión de ciertos gases industriales, los clorofluorocarburos (CFC), un conjunto de productos químicos industriales de amplio uso sobre todo en refrigeración y equipos de aire acondicionado, que podían estar poniendo en peligro la integridad de la capa de O<sub>3</sub> (Centro Mario Molina, 2012), ellos predijeron que un solo átomo de Cloro (Cl), liberado en la atmósfera superior por la descomposición de los CFC's, podría destruir hasta 100,000 moléculas de O<sub>3</sub>. Mario Molina siguió con su investigación para probar la conexión entre los CFC's y el agujero de O<sub>3</sub> de la Antártida descubierto en 1985, confirmada en 1991, y lo que les mereció el Premio Nobel de Química en 1995 (Medellín Milán , 2001). Asimismo, sus investigaciones y publicaciones sobre el tema condujeron al Protocolo de Montreal de las Naciones Unidas, el primer tratado internacional que ha enfrentado con efectividad un problema ambiental de escala global y de origen antropogénico (Centro Mario Molina, 2012). Con esto, Mario Molina logró un lugar en la historia al presentar la primera demostración definitiva de que las acciones humanas pueden dañar el ambiente a escala global (Medellín Milán , 2001).

En marzo de 1997 como respuesta a la agudización de la problemática de agotamiento de la Capa de O<sub>3</sub>, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) convocó a una conferencia que adoptó un Plan de Acción Sobre la Capa de Ozono y estableció un Comité de Coordinación para elaborar guías internacionales de acciones futuras (Coordinación del Programa acción por el Ozono en América Latina y el Caribe, 2010)

De este modo, en 1981 iniciaron las acciones globales y negociaciones intergubernamentales, las cuales concluyeron con el Convenio de Viena para la Protección de la capa de O<sub>3</sub> el 22 de marzo de 1985. Convenio que tuvo como principal objetivo establecer mecanismos de cooperación en investigación y la observación sistemática de la capa de O<sub>3</sub>, así como establecer controles y la posterior eliminación de sustancias agotadoras del O<sub>3</sub>, sobre todo los CFC's. Para

este último punto se adoptó el Protocolo de Montreal el 16 de septiembre de 1987 (Centro Mario Molina, 2012).

El 1 de enero de 1989 entra en vigor el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de  $O_3$ , siendo un ejemplo de cooperación internacional para superar un problema de dimensión global que amenaza el medio ambiente, sus partes han debido ser adaptadas continuamente en respuesta a la nueva evidencia científica y los avances tecnológicos. La producción y consumo de peligrosos grupos de sustancias, con capacidad para agotar la capa de  $O_3$ , han sido exitosamente suprimidos en los países desarrollados y el mismo proceso está en marcha en los países en vías de desarrollo, el protocolo ha sido ajustado cinco veces y enmendado cuatro (PNUMA, 2006).

En el 2000, Bravo, Nava, y Muhlia en su estudio “Relaciones entre la magnitud del valor máximo de  $O_3$ , la radiación solar y la temperatura ambiente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)”, se plantean los objetivos de definir cuál de las dos variables, radiación solar o temperatura ambiente, es más útil para modelar el valor máximo de  $O_3$  en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), encontrando que el máximo de temperatura se presenta en promedio 1.9 horas después del máximo de  $O_3$ , por lo que se descarta como variable que explique el máximo de  $O_3$ , arrojando la hipótesis de que el valor máximo de  $O_3$  puede ser una variable que explica el máximo de temperatura o que la radiación solar es la causa común para la variación de ambos parámetros. Por otro lado, demuestran que la correlación entre el valor máximo diario a las 13 horas del día del  $O_3$  y la temperatura ambiente es menor que la existente entre el  $O_3$  y la radiación solar en el mismo horario. Presentando también, que los valores máximos de  $O_3$  durante el día se presentan primero en la parte norte y después en el sur de la ZMCM, debido a que en la parte norte se encuentra la zona industrial, y por tanto el mayor transporte de las emisiones.

En el 2004 Hernández Romero, Madrigal Uribe, y Morales Méndez, en su artículo “Comportamiento del Monóxido de Carbono y el clima en la ciudad de Toluca, de 1995 a 2001, realizaron una investigación en la que pretenden caracterizar la

distribución de diversos gases como el Monóxido de Carbono (CO), el Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), las partículas suspendidas y el Ozono (O<sub>3</sub>), cuya descripción se basa en los datos aportados por la RAMA de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca (ZMCT), realizando también una ilustración cartográfica de la distribución de diversos gases, analizando su distribución respecto a factores climáticos y geográficos como la temperatura, la precipitación, el patrón de vientos, el relieve y las fuentes de contaminación, que constituye el objetivo central del trabajo. Concluyendo que el CO en Toluca y su ZM está estrechamente relacionado con la manifestación de los diversos fenómenos atmosféricos que se originan o convergen en territorio mexicano; que las condiciones meteorológicas tanto del invierno como del verano determinan la mayor y menor concentración de Monóxido de Carbono a lo largo del año; también que los datos de CO en Toluca durante el año oscilan entre 0.5 y 7 ppm siendo un nivel satisfactorio según el IMECA.

En el 2004, Sigró Rodríguez en su tesis doctoral plantea evaluar la evolución experimentada por la temperatura en Cataluña durante la segunda mitad del siglo XX, caracterizando la diversidad espacial temporal térmica catalana en función de áreas climáticas definidas por una evolución térmica similar, así como examinar los modos acoplados de variabilidad de la temperatura de superficie en Cataluña con diversos índices teleconectivos que rigen la evolución de la señal térmica en las diferentes áreas climáticas singularizadas en el territorio catalán; siendo uno de sus objetivos particulares evaluar la existencia de demoras entre diversos modos de variabilidad atmosférica de baja frecuencia y las señales térmicas de las regiones aisladas dentro del territorio catalán. En el cual concluye con la observación de influencias ejercidas por modos de variabilidad atmosférica propios del periodo estival; y que los dos principales modos de variabilidad atmosférica invernal presentan correlación con la evolución térmica en el conjunto del territorio catalán, especialmente entre enero y marzo, cuando se observan correlaciones significativas entre los índices y la evolución de la temperatura en los patrones térmico-espaciales.

En el 2007, Quevedo Urías, García, Salas Plata, Domínguez Chicas, y Esquivel Ceballos en su “Análisis estadístico de Ozono a nivel del suelo” aplicaron métodos para modelar las concentraciones de O<sub>3</sub> troposférico observadas en el Parque Chamizal, una estación de muestreo localizada en la línea divisoria entre El Paso Texas, EU y Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Dónde se modelaron las concentraciones de O<sub>3</sub> (variable dependiente) y la temperatura del punto de rocío, Óxido de Nitrógeno (NO), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), temperatura ambiental, humedad relativa, radiación solar, intensidad y dirección del viento resultante y ráfagas máximas (variables independientes), ajustando un modelo de regresión lineal múltiple y un modelo de regresión polinomial, a las variaciones espaciotemporales de 1 hora de O<sub>3</sub>, para el periodo 1999-2003. Concluyendo que la temperatura debería estar contribuyendo una cantidad positiva a la producción de O<sub>3</sub> a nivel suelo, de acuerdo con un razonamiento a posteriori, concluyen también que los modelos de regresión con muchas variables independientes, no necesariamente los hace mejor, porque esto no ayuda a economizar tiempo dinero y recursos.

En 2008, un informe sobre “Perspectiva de los efectos del cambio climático en la calidad del aire; estudio de análisis, la Ciudad de México”, por Ruiz Suárez, Telma Castro y Agustín García, hacen mención a que las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) directos están ya contempladas en el inventario nacional de emisiones, pero su influencia a través del smog fotoquímico es más difícil de estudiar, siendo por esto de gran interés en la comunidad científica, concluyendo que la calidad del aire depende de una gran variedad de factores. En primer término, depende de cambios en el clima. Las emisiones de COV altamente reactivos pueden incrementarse, las reacciones fotoquímicas iniciadoras del smog fotoquímico pueden incrementarse también si por efecto del aumento de la temperatura disminuye la formación de aerosoles secundarios; y por otro lado, manteniendo todos estos factores constantes, el aumento de temperatura puede reducir marginalmente la formación de Ozono a partir de la foto-oxidación de los COV analizados de manera individual (Ruiz Suárez, et al., 2008).

En el 2008, Reyes Cervantes en su tesis doctoral con el título de “Estimación de tendencias en Niveles Máximos de Contaminación usando Regresión por Cuantiles ajustando el efecto por variables meteorológicas” propone dos metodologías de análisis basada en la teoría de valores extremos para modelar tendencias de contaminación, aplicándose en el caso particular de la contaminación ambiental de la Ciudad de México; en la primera metodología las tendencias se obtienen para las veinte estaciones meteorológicas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México durante el periodo de 1986 a 2005, el análisis de la información indica una disminución en los niveles muy altos de Ozono para los últimos años. La segunda metodología involucra las covariables ambientales mensuales al parámetro de escala de la distribución GVE (generalizada de Valores Extremos), para investigar tendencias en las concentraciones de Ozono. Concluyendo con esto que los niveles altos de Ozono van a la baja en todas las estaciones meteorológicas, aunque no se ha alcanzado el nivel de Ozono impuesto por la Organización Mundial para la Salud (OMS) y dando como recomendación la investigación futura de la pérdida de información de un periodo corto de tiempo común y frecuente en un día, cuando los aparatos se descomponen o se tienen que calibrar para coleccionar la información, suponiendo observaciones de una distribución GVE.

González (2010), describe la situación actual de la capa de Ozono en el planeta y presenta argumentos para mostrar la necesidad de investigar para ayudar a la vigilancia permanente de la Capa de Ozono en la Sabana de Bogotá, presentando un resumen del proyecto de investigación Institucional que ha emprendido la fundación universitaria Los Libertadores, a través de la Línea Institucional de Calidad Ambiental y Producción más Limpia, según la cual dio inicio al proyecto de investigación “valoración de las condiciones atmosféricas que determinan riesgo por exposición a la radiación Ultravioleta Solar en la Sabana de Bogotá”, teniendo como objetivo general medir los niveles de radiación UV-B, para determinar el riesgo que tiene la población de Bogotá por la exposición a dichas radiaciones, complementario a eso se comenzó a realizar un seguimiento a la capa de ozono total para lo cual se compara el valor obtenido en la estación con el valor satelital que reporta la NASA.

Pérez, y otros (2010) en su estudio “Variaciones climáticas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, Estado de México: 1960-2007” estudiaron el comportamiento de la temperatura y la precipitación entre 1960 y 2007, y para demostrar la existencia de variaciones ambientales que pueden contribuir al cambio climático. Teniendo como sustento la geografía ambiental, la estadística, trabajo de campo, método comparativo y la cartografía automatizada, concluyendo que el clima en la ZMCT y su *hiterland*<sup>1</sup> están en proceso de cambio, quizás a causa de las actividades humanas no sustentables, demostrando que se tienen registros de incrementos de temperatura y variaciones en las precipitaciones.

En el 2011, Villaseñor González en su trabajo de tesis doctoral que lleva por nombre “Caracterización del gradiente altitudinal de Ozono y su impacto en bosques aledaños a la ciudad de México”, caracteriza los gradientes altitudinales de concentración de Ozono en dos áreas de estudio contrastantes en la geografía del Valle de México, en áreas montañosas de Huixquilucan, en el Estado de México en tres temporadas de medición, y correlaciona las concentraciones de exposición acumulada al Ozono en un periodo de tiempo contra la salud en los bosques más susceptibles; dando como resultado que en el Monte de las Cruces se presenta una correlación entre el daño en los árboles y la presencia de Ozono en el ambiente, mientras que en el cerro Tláloc no existe correlación entre la presencia de Ozono y el daño en los árboles, existiendo diferentes factores que podrían explicar los daños.

Domínguez Arce (2015), en su tesis de licenciatura “Representación espacial por interpolación con Kriging de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca en el año 2011” tuvo como objetivo representar la distribución de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la ZMVT en el año 2011 interpolando el promedio anual de cada contaminante criterio en cada estación, creando mapas de distribución donde se observa el área de influencia, concluyendo que donde se presenta mayores concentraciones es en la estación San Cristóbal en casi todos los casos, y que las normas para el O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub> anual se

---

<sup>1</sup> Zona de influencia de un puerto o de una gran ciudad

incumplen. Más detalladamente explica que en la ZMVT se rebasaron las normas diaria y anual para el O<sub>3</sub> con 12 días por encima de la norma durante el año de estudio.

García, Ramírez, Ulloa , Arias, & Pérez (2012), en su estudio “Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de Guadalajara” tuvieron como objetivo analizar el comportamiento de las inversiones térmicas y contaminantes atmosféricos en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) durante el periodo 2005-2007. En dónde se analizó la información de las inversiones térmicas y concentraciones de los contaminantes: Monóxido de Carbono, Bióxido de Nitrógeno, Ozono, Bióxido de Azufre y Partículas menores a 10 micras de las ocho estaciones de la Red de Monitoreo Atmosférico del Gobierno de Jalisco. Sus resultados mostraron relación significativa entre los días con inversión térmica de gran espesor, y duración con acumulación de contaminantes, lo cual provoca que se incrementen los índices de contaminación en la zona. Los meses con presencia importante de inversiones térmicas y contaminación elevada ocurrieron durante las estaciones de invierno y primavera (noviembre-mayo). Concluyendo que las inversiones térmicas fuertes han sido factor en elevados índices de contaminación en la ZMG y que el riesgo ambiental comienza a exhibirse similar a la Ciudad de México aun cuando existen diferencias significativas entre sus características climáticas y topográficas.

## **2. Marco teórico- conceptual**

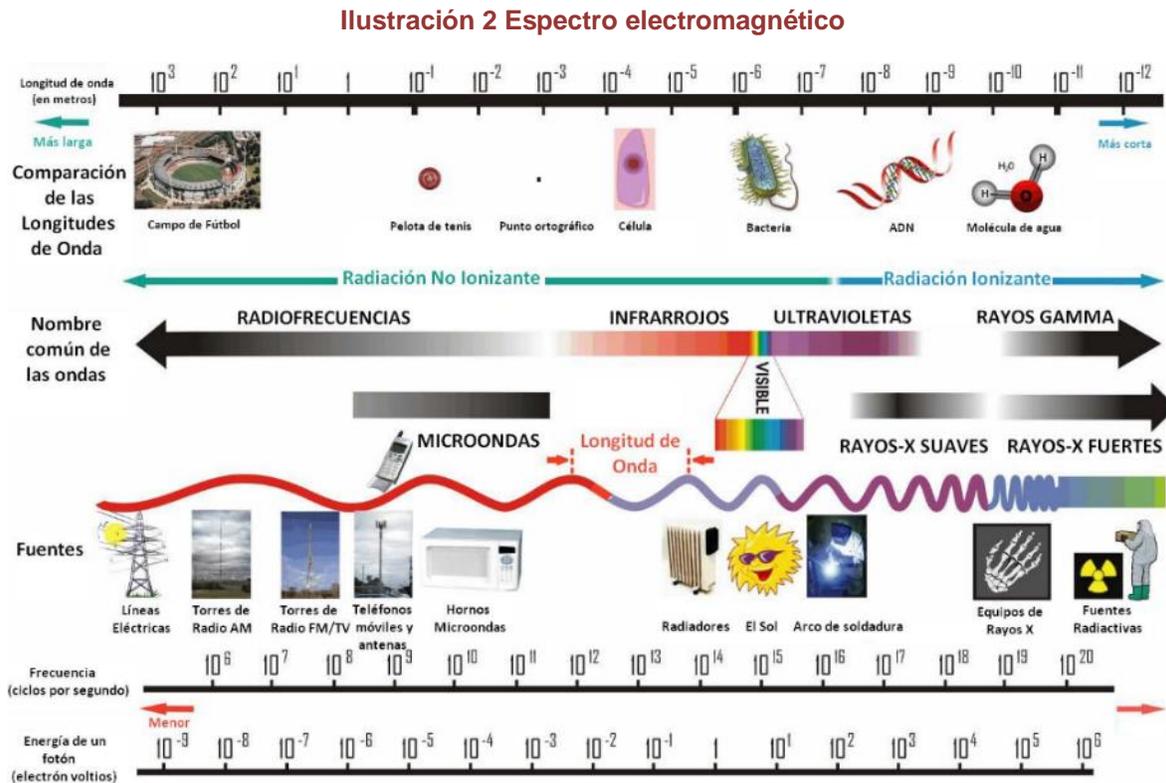
Este capítulo tiene como finalidad presentar de forma general los conceptos usados para la investigación, integrándolos de forma esquemática, estableciendo los conocimientos con los que se trabajarán, definiendo así a la contaminación atmosférica, las causas y efectos de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), así como también, se puntualiza en las diferencias entre Efecto Invernadero (EI), variabilidad climática y cambio climático; delimitando el enfoque y asegurando el entendimiento de la formación y efectos del Ozono en la salud y el entorno, así como de la variabilidad de la temperatura.

## **2.1 Radiación solar**

El Sol es el proveedor directo e indirecto de la mayor parte de la energía que los seres vivos requieren en el Planeta Tierra, de forma directa llega en forma de luz o radiación; usada por ejemplo en los procesos fotosintéticos de las cadenas alimenticias, de manera indirecta llega a través de procesos que ocurrieron con el uso de la luz y la radiación hace mucho tiempo, como en el proceso de formación de los actuales combustibles fósiles, o que están ocurriendo actualmente como los fenómenos climáticos o las fuentes alternativas de energía. La luz y la radiación forman parte de un rango de medición muy amplio, del que no se conoce aún su límite inferior o superior, denominado Espectro Electromagnético, este espectro se ha dividido en diferentes regiones que no cuentan con fronteras exactas entre las regiones contiguas. Para referirse al espectro electromagnético se utilizan dos parámetros comunes la frecuencia y la longitud de onda (Frontal, et al., 2005).

La producción de la radiación electromagnética es un proceso que se lleva a cabo en todos los lugares del universo, a través de él, la radiación electromagnética llega a la Tierra en todas las regiones del espectro. A causa de que existen cargas eléctricas en movimiento que generan radiación electromagnética y dependiendo de la frecuencia pueden ocurrir diferentes procesos en los cuales los núcleos, los electrones o los átomos absorben los fotones y ocurre una transición cuantizada entre dos diferentes estados (puede ser del estado fundamental al estado excitado);

a estos estados les corresponde un determinado nivel de energía (Frontal, et al., 2005). Por lo que el espectro electromagnético se dividió en diferentes regiones, ver figura 2, cuyos límites son más o menos arbitrarios, dependiendo de la capacidad de poder producir o detectar esas regiones del espectro.



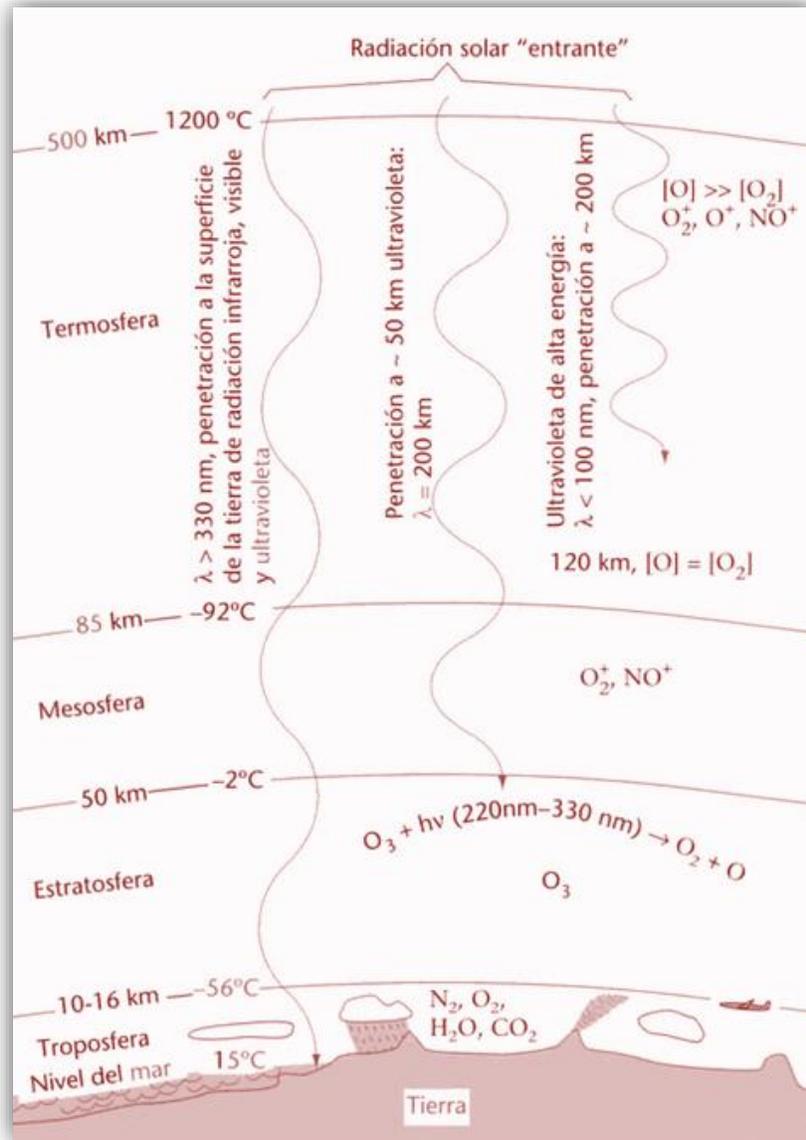
(Pérez Pérez, 2015)

La radiación ultravioleta (UV), la luz visible (Vis) y el infrarrojo (IR) forman parte de la región óptica del espectro electromagnético. El espectro visible es solo una pequeña proporción del espectro electromagnético, cualquier energía producida en esta banda producirá la sensación de visión cuando estimula el ojo humano normal (Frontal, et al., 2005). La luz visible es la radiación electromagnética y tiene colores diversos que van del rojo al violeta conforme su frecuencia va aumentando (Martínez & Fernández Bremauntz, 2004).

De acuerdo con Frontal, et al, (2005) y Colin Baird, (2001) el UV tiene longitudes de onda menor a la región visible, y se divide en UV cercano (370-200 nm de longitud de onda) y UV extremo o del vacío (200-10 nm), el sol emite radiación UV en las bandas UV-A, UV-B y UV-C, clasificación correspondiente a sus efectos en la salud y el medio ambiente con rangos de 380 a 315 nm de UV-A o llamada también de onda larga o “luz negra” ya que es invisible al ojo; UV-B u onda media de 315 a 280 nm, y el UV-C, onda corta o “germicida” menor a los 280 nm. Debido a la absorción por parte de la capa de Ozono de la atmósfera, el 99% de la radiación UV que llega a la superficie terrestre corresponde a la UV-A, ya que la región UV-C es la responsable de la generación del Ozono (Ver ilustración 3). Cabe señalar que estos rangos de longitud de onda varían entre autores.

Tanto en la atmósfera como en el clima dos tipos distintos de radiación ya mencionadas actúan sobre ellos: la luz VIS originada en el Sol y la radiación infrarroja (IR) emitida por la Tierra; la discrepancia entre ellas reside en la diferencia de temperaturas: el Sol emite su radiación alrededor de los 6 mil grados Celsius (°C) conocida como de onda corta; mientras que los elementos de la Tierra (el suelo, el mar, los casquetes polares, las capas atmosféricas, las nubes, etc.) lo hacen a temperaturas cerca de los 0°C; llamada de onda larga (Martínez & Fernández, 2004). De ahí que la radiación solar sea el principal factor que determina los microclimas; ya que su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis, por ejemplo, la intensidad de la radiación, el grado de intercepción y la eficiencia en el uso de la energía radiante son determinantes en la tasa de crecimiento de las plantas (Jaramillo-Robledo, et al., 2006).

### Ilustración 3 Capas de la atmósfera



Información de Manahan (2005)

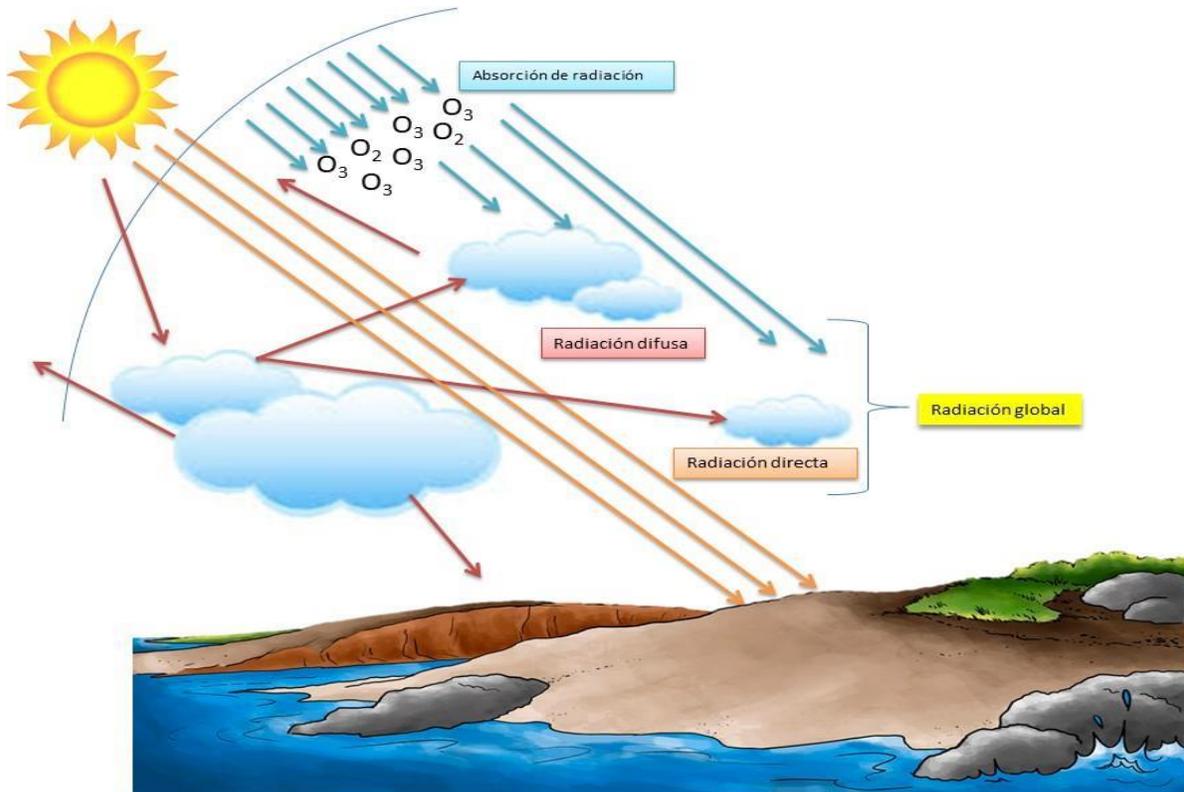
La radiación solar aparte de calentar y mantener la atmósfera planetaria a través de la capacidad de albedo<sup>2</sup>, también, es causante de los desequilibrios de la química atmosférica, debido a la iniciación de procesos químicos y consecuentemente a los cambios fotoquímicos primarios, es decir, a los choques intermoleculares de las

<sup>2</sup> Relación entre la radiación solar recibida y la radiación solar reflejada, capacidad de reflejar la radiación recibida. (Martínez & Fernández, 2004).

velocidades de reacción de toda la gama de contaminantes presentes (Cisniega Rojas, 2002). Por ejemplo, la química de la disminución del ozono, y de muchos otros procesos que ocurren en la estratosfera, es impulsada por la energía asociada a la luz del Sol (Colin Baird, 2001).

La cantidad de energía radiante recibida entre el Sol y la Tierra se denomina constante solar, la atmósfera absorbe y dispersa selectivamente la radiación solar, cambiando tanto el flujo como la calidad del espectro que incide en la superficie terrestre, esta radiación dispersada, a su vez, es esparcida a otras regiones del cielo antes de salir de la atmósfera o alcanzar la superficie terrestre y el resultado del proceso es conocido como radiación difusa, en cambio, la radiación que no presenta modificaciones al pasar por la atmósfera se denomina radiación directa. La suma de las cantidades de ambas radiaciones es denominada radiación global (Ver ilustración 4); esta radiación es de onda corta, con rangos espectrales comprendidos entre 300 y 3000 nanómetros (nm) (Jaramillo-Robledo, et al., 2006).

**Ilustración 4 Radiación solar**



Elaboración propia con información de Jaramillo-Robledo, et al. (2006)

La radiación global, así como las cantidades separadas en radiación directa y radiación difusa, pueden conocerse a partir de la latitud del lugar, su número de horas de brillo solar y el número del día del año (Jaramillo-Robledo, et al., 2006).

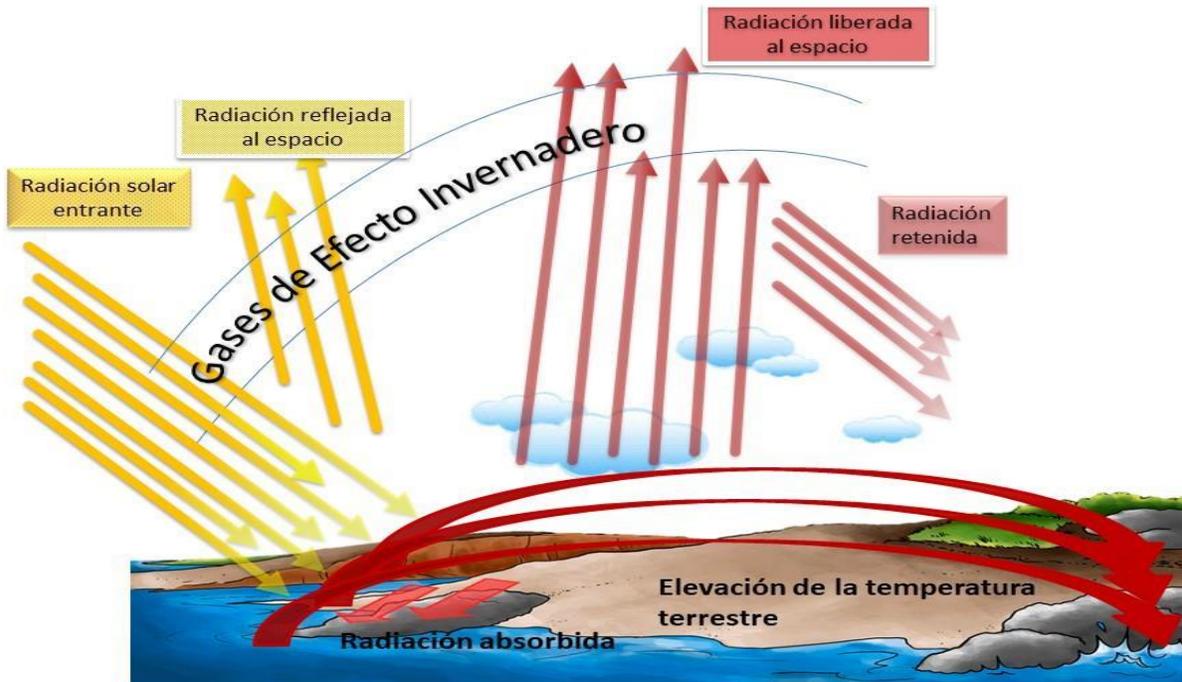
## **2.2 Efecto invernadero**

Para Colque Pinelo y Sánchez Campos (2007), el término “Efecto Invernadero” (EI) se refiere al papel que desempeña una capa de gases que retiene el calor del Sol en la atmósfera de la Tierra, haciendo que la temperatura interior sea más alta que la exterior. Este fenómeno se produce debido a que la energía generada por el Sol llega a la superficie en forma de frecuencia alta (onda corta), rebotando al exterior en forma de frecuencia baja (onda larga), es decir, sólo una parte de la energía solar emitida desde la Tierra atraviesa la capa de GEI y la otra parte se queda dentro de la ella haciendo que ésta tenga una temperatura media promedio adecuada para el desarrollo del medioambiente.

La atmósfera es un fluido constituido por diferentes tipos de gases y cada uno de ellos se comporta de manera diferente, de manera tal, que la energía absorbida la efectúan selectivamente para diferentes longitudes de onda y en algunos casos son transparentes para ciertos rangos del espectro (Benavides Ballesteros & León Aritizabal, 2007). En otras palabras, el Efecto Invernadero (EI) resulta de que el aire es transparente para la radiación de onda corta y opaco a la onda larga. O sea que la atmósfera es un filtro radiativo, que deja pasar los rayos solares; algunos son absorbidos por la superficie terrestre y los demás componentes de la Tierra, que se calientan en consecuencia, y entonces emite la radiación terrestre, absorbida por la atmósfera y las nubes, las capas atmosféricas y las nubes van sucesivamente absorbiendo, calentándose y remitiendo radiación térmica procedente de abajo (Ver ilustración 5). El resultado es que la atmósfera superficial es cálida y se va enfriando conforme uno asciende a través de ella. La atmósfera es una mezcla de gases y aerosoles suspendidos en ella, este efecto se debe a gases atmosféricos complejos

y minoritarios llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) o termoactivos, (Martínez & Fernández, 2004) expuestos en capítulos anteriores.

**Ilustración 5 Efecto invernadero**



Elaboración propia con información de (Martínez & Fernández, 2004)

Es preciso señalar que el EI siempre ha existido; ya que es consecuencia de la composición natural de la atmósfera y por él se tiene en la Tierra una temperatura relativamente alta, que ha proporcionado el surgimiento y la evolución de la vida. Sin embargo, esta situación normal y natural ha sido alterada anormal y artificialmente por el progreso humano de los últimos siglos, debido en parte a la industrialización; por tanto, el correspondiente efecto de cambio en el clima se le conoce como calentamiento global (Martínez & Fernández, 2004), aclarado en la sección 2.4, de este capítulo.

### 2.2.1 Gases de efecto invernadero

La Ley General de Cambio Climático (LGCC), (2012), señala que los Gases de Efecto Invernadero, GEI, son “aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación infrarroja”. En cambio, los GEI, para Benavides Ballesteros & León Aritizabal, (2007), son aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes, propiedad que produce el EI.

La atmósfera emite radiación en todas las direcciones, incluida la que desciende hacia la superficie de la Tierra, de este modo, los GEI atrapan el calor en un sistema superficie-tropósfera; proceso natural conocido como EI el cual se acrecienta por las emisiones de estos gases derivados de las actividades humanas (CECONT, Equipo Técnico de Gases de Efecto Invernadero, 2007). Hernández (2001) menciona que la temperatura del planeta va ascendiendo gradualmente, y que esto es causado por la presencia creciente en el aire de una serie de GEI que atrapan el calor impidiendo su salida al espacio exterior, estos gases transmiten el calor atrapado al resto de la atmósfera provocando un incremento general de temperatura.

Los GEI son esenciales para la vida en la Tierra, pues hacen que parte del calor emitido por el sol quede atrapado, manteniendo una temperatura media global de 15° C en lugar de -18°C pues absorben, como ya se ha dicho, el calor generado por el sol (fotones infrarrojos), reteniéndolo dentro de la atmósfera, generando lo que se conoce como calentamiento global; el problema reside cuando la presencia exagerada de estos gases ocasionan el aumento de la temperatura del aire y de la superficie terrestre más allá de los niveles normales (Colque Pinelo & Sánchez Campos, 2007).

Existen GEI de tipo directos e indirectos; los de tipo directo son aquellos gases que contribuyen al EI tal y como se emiten a la atmósfera, los indirectos son precursores

del O<sub>3</sub> Troposférico, además de contaminantes del aire ambiente de carácter local y en la atmósfera se transforman en GEI (Benavides Ballesteros & León Aritizabal, 2007). En las tablas 1 y 2, se hace referencia a alguno de estos gases.

**Tabla 1 Gases de Efecto Invernadero directos**

| <b>GEI</b>                                 | <b>Características</b>  |
|--|---|
| <b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b> | Parte de numerosos procesos biológicos dentro del ciclo natural Carbono, producido también por uso de combustibles fósiles y por el cambio de uso de suelo.   |
| <b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>             | Tiene un roll en la determinación de la capacidad de oxidación de la troposfera, sus principales fuentes son la descomposición de materia orgánica en sistemas biológicos y en relación con la producción y distribución de gas natural, petróleo y explotación de carbón mineral.                                    |
| <b>Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O)</b>      | Emisiones generadas por procesos microbiológicos de la nitrificación y desnitrificación del suelo, y en menor grado por el consumo de combustibles fósiles y biomasa.   |
| <b>Compuestos Halogenados</b>              | Compuestos que no existen naturalmente en el ambiente, son utilizados como gases refrigerantes, solventes, como propulsor en los recipientes de aerosoles, ejemplo: CFCs, HCFCs y HBFCs. Estos compuestos son poco reactivos en la troposfera, pero en la estratosfera pierden átomos y destruyen el O <sub>3</sub> . |
| <b>Vapor de agua</b>                       | Las nubes bajas y espesas reflejan la luz solar hacia el espacio enfriando el planeta   |
| <b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>               | En la estratosfera protege la Tierra de niveles perjudiciales de radiación UV, en la troposfera es el componente principal del smog fotoquímico antropogénico.  |

Elaboración propia con datos de Benavides Ballesteros & León Aritizabal (2007)

En la atmósfera de la Tierra existe gran cantidad y variedad de GEI directos e indirectos. Los principales GEI son el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), el Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), el Metano (CH<sub>4</sub>) y el Ozono (O<sub>3</sub>). Hay además en la atmósfera una serie de GEI creados íntegramente por el ser humano, como los Halocarbonos y otras sustancias con contenido de Cloro (Cl) y Bromo (Br), y aunque todos tienen importancia ya sea para el clima, la contaminación o la química atmosférica, no todos tienen relevancia para los procesos relacionados con el calentamiento global y el cambio climático (Benavides Ballesteros & León Aritizabal, 2007). Para el calentamiento global y el cambio climático, tienen mayor importancia,

los GEI directos que: tienen largo tiempo de residencia en la atmósfera (gases de larga vida) lo que les facilita distribuirse como “gases bien mezclados”, los que tienen un elevado potencial de calentamiento global, los que tienen importantes fuentes directas e indirectas en las actividades humanas, los que presentan composición química favorable, como cantidad de Cl o Br contenido en cada molécula para aquellos GEI que también son sustancias agotadoras del Ozono (O<sub>3</sub>); esto está también determinado por el volumen de sus emisiones a la atmósfera (CECONT, Equipo Técnico de Gases de Efecto Invernadero, 2007).

**Tabla 2 Gases de Efecto Invernadero indirectos**

| <b>GEI</b>   | <b>Características</b>  |
|--|---|
| <b>Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)</b>                        | Se componen principalmente por Óxido Nítrico (NO) y el Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ), emitidos por la combustión de combustible en industrias de energía y fuentes móviles, representa un punto clave para la formación de O <sub>3</sub> . |
| <b>Monóxido de Carbono (CO)</b>                                    | Tiene la importancia climatológica ya que su cantidad afecta indirectamente la formación de otros GEI.  |
| <b>Compuestos Orgánicos Volátiles diferentes al metano (COVDM)</b> | Incluyen gases como el butano, propano y etano, los cuales participan junto a los NO <sub>x</sub> en la formación de O <sub>3</sub> y otros oxidantes fotoquímicos. La mayoría de las emisiones provienen de los combustibles de los automotores.     |

Elaboración propia con datos de Benavides Ballesteros & León Aritizabal (2007)

Algunos de estos gases son creados por la acción humana, otros tienen un origen natural; pero en conjunto contribuyen a la formación del EI, los GEI de generación antropogénica se producen principalmente en los países más industrializados y aceleran el calentamiento global, cuyos efectos sobre el clima de la Tierra afectan diferentes zonas del planeta, dejando mayores secuelas en los países menos industrializados (Colque Pinelo & Sánchez Campos, 2007).

La contribución de cada GEI al calentamiento global es diferente, y depende de su capacidad de retención de calor y tiempo de permanencia en la atmósfera. Para poder compararlos entre sí a cada GEI se le asigna un Potencial de Calentamiento Global (PCG); siendo el CO<sub>2</sub> el referente para los demás, por lo que su valor de

PCG tiene el valor de 1. Así, para un horizonte temporal de 100 años, el PGC de los seis GEI regulados por el Protocolo de Kioto (Galante Marcos, 2011) se especifican en la tabla 3.

**Tabla 3 Potencial de Calentamiento Global de los GEI regulados por el Protocolo de Kioto**

| <b>GEI</b>                                     | <b>PCG</b>       |
|--|------------------|
| <b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>     | 1                |
| <b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>                 | 21               |
| <b>Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O)</b>          | 310              |
| <b>Hidrofluorocarbonos (HCF)</b>               | 140 a<br>11,700  |
| <b>Perfluorocarbonos (PFC)</b>                 | 6,500 a<br>9,200 |
| <b>Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>)</b> | 23,900           |

Elaboración propia con datos de Galante Marcos, (2011).

Hernández (2001) asegura que cuanto mayor cantidad haya de GEI en la atmósfera, mayor es la energía que son capaces de atrapar, y más se calienta el planeta, estos gases han estado aumentando desde hace más de un siglo y medio, es decir desde el comienzo de la revolución industrial y a causa de ella, han incrementado de forma acelerada.

### 2.3 Variabilidad de la temperatura

El clima de la Tierra ha cambiado constantemente a lo largo de toda su historia, sin que éstos últimos años representen en sí una anomalía. Aun así, se ha indicado que la aparición y evolución del hombre, enfocándose específicamente a su actividad industrial de los últimos 200 años estimulada por la quema de combustibles fósiles y producción agrícola ha influenciado la fase del ciclo climático (Bayona, et al., 2010). Así que, dependiendo de la intensidad y duración de una anomalía en la lluvia o temperatura, así como del grado de vulnerabilidad de una sociedad o de un ecosistema, los impactos del clima pueden variar de imperceptibles a catastróficos (Martínez & Fernández, 2004).

La variabilidad del clima en el tiempo, como ya se dijo, es una característica derivada del carácter dinámico del sistema climático, estas variaciones, pueden expresarse como diferencias en las estadísticas de los elementos climáticos calculados para diferentes periodos, obedecen a multitud de factores, que se dividen en dos grandes grupos según Sigró Rodríguez, (2004) un primer grupo lo constituyen los denominados factores de forzamiento externo y los factores de forzamiento interno, Ver tabla 4.

**Tabla 4 -Tipos de factores de forzamiento**

| <b>Factores de forzamiento externo</b>   |   |
|--|---|
| <b>Astronómico</b>   | Cambios en la intensidad de la radiación solar, los parámetros orbitales de la Tierra   |
| <b>Terrestre</b>   | Variaciones en la composición atmosférica, derivadas de las erupciones volcánicas y la actividad antrópica, las variaciones en la superficie terrestre derivados de modificaciones de los casquetes polares y cambios en el uso del suelo |
| <b>Factores de forzamiento interno</b>   |   |
| Interrelaciones que se producen entre los diferentes subsistemas que configuran el sistema climático, ya que están todos conectados mediante flujos de masa y de energía, de forma que todos ellos pueden considerarse abiertos. |   |

Elaboración propia con datos de Sigró Rodríguez, (2004).

Carvajal y Ordoñez (2008) citados por Quintero-Angel, Carvajal-Escobar, & Aldunce (2012) definen la variabilidad climática como las variaciones en las condiciones climáticas medias, y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas y los fenómenos extremos, entre otras), en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular. La variabilidad climática, es manifestada, por ejemplo, por fenómenos naturales como el evento cálido de El Niño y su contraparte fría, La Niña

Peixoto y Oort (1992), citados por Sigró Rodríguez (2004), caracterizan la variabilidad climática como resultado de complejas interacciones de forzamiento y variaciones libres debidas a inestabilidades internas y retroalimentaciones que se producen en el sistema climático, determinado por un alta no-linealidad. Esta interactividad y la naturaleza no lineal de las inestabilidades y retroalimentaciones del sistema climático dificultan extraordinariamente la obtención de interpretaciones sencillas de las causas y efectos.

Sigró Rodríguez (2004) en su trabajo menciona a Wallace (1996), el cual indica que la compleja evolución temporal de las variables climáticas es resultado de la superposición de diversas señales que pueden descomponerse para su análisis en diversos tipos: fenómenos periódicos, cuya máxima expresión corresponde a la oscilación anual en intensidad y distribución latitudinal de la radiación solar entrante, y fenómenos cuasi periódicos, con ciclos que oscilan entre los dos y tres años, variabilidad aperiódica y aleatoria, como en la evolución del fenómeno El Niño-Oscilación Austral en escala de decenas de años o siglos, tendencias decadales y seculares, presentes en muchas variables climáticas, como la temperatura y la concentración de dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico.

Es decir, cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún tipo de cambio en la intensidad de la radiación solar recibida e incluso cambios en las características del planeta (concentración de GEI, cambios en el uso de suelo, etc.) resultado de la

actividad humana las formas de variabilidad del clima son muchas. (Martínez & Fernández, 2004)

La temperatura, indicador por antonomasia del estado del sistema climático, ha experimentado enormes variaciones a lo largo de la existencia del planeta, presentando derivas que han determinado vastos cambios del clima global, siendo los más característicos la alternancia de periodos glaciares e interglaciares (Sigró Rodríguez, 2004).

Una parte de la variabilidad de la temperatura puede explicarse en función de las variaciones de baja frecuencia experimentadas por el campo bórico, identificadas mediante los denominados índices teleconectivos o modos de variabilidad atmosférica de baja frecuencia (Sigró Rodríguez, 2004).

## **2.4 Cambio Climático**

El Cambio Climático, CC, se define como la modificación del clima a grades escalas de tiempo, usualmente décadas, y en relación a periodos históricos comparables, debido a causas naturales, externas o internas a la Tierra, o antrópicas, y con ocurrencias en el pasado geológico. El IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) diferencia de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático) que reconoce que tanto el CC como las modificaciones al clima son debido a actividades humanas (Quintero-Angel, et al., 2012).

La LGCC, (2012), lo define como “La variación del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos comparables.”

A manera de explicar el proceso, la Tierra absorbe radiación solar (radiación de onda corta), principalmente en la superficie, y la redistribuye por circulaciones atmosféricas y oceánicas para intentar compensar los contrastes térmicos. La

energía recibida es reemitida al espacio (radiación de onda larga) para mantener en el largo plazo, un balance de energía recibida y reemitida. Cualquier variación que altere tal balance, ya sea por cambios en la radiación recibida o reemitida, o en su distribución en la Tierra, se reflejará como cambios en el clima. A tales cambios en la disponibilidad de energía radiativa se les conoce como forzamientos radiativos; cuando son positivos tienden a calentar la superficie de la Tierra (Martínez & Fernández, 2004).

Los aumentos en la concentración de los GEI reducen la eficiencia con la cual la Tierra re-emite la energía recibida al espacio; parte de la radiación saliente de onda larga emitida por la Tierra al espacio es re-emitida a la superficie por la presencia de esos gases, así, la temperatura de la superficie se eleva para emitir más energía, y aunque parte de ella quede “atrapada”, suficiente energía saldrá al espacio para alcanzar el balance radiativo que mantiene estable al clima (Martínez & Fernández, 2004).

Martínez & Fernández (2004), aseguran que mediante modelos simples de transferencia de radiación se encuentra que los parámetros clave que determinan la temperatura de superficie de equilibrio en el planeta son la emisividad (grado al cual la atmósfera emite radiación infrarroja) y el albedo de la superficie terrestre (relación entre la radiación solar recibida y la reflejada). La temperatura de superficie tiende a aumentar cuando aumenta la emisividad y la emisividad depende de la concentración de GEI en la atmósfera, y sería cero si no existiera esta; el IPCC citado por (Martínez & Fernández, 2004) indicó que el balance de las evidencias sugiere que hay una influencia humana discernible en el clima global.

Los cambios experimentados por las concentraciones de los GEI y aerosoles en la atmósfera, por la cubierta terrestre y por la radiación solar alteran el balance de energía del sistema climático y son factores causantes del CC. Afectan la absorción, la dispersión y la emisión de radiación en la atmósfera y en la superficie de la Tierra. Los cambios positivos o negativos del balance de energía por efecto de esos factores se expresan en términos de forzamiento radiativo que es la magnitud

utilizada para comparar la influencia de naturaleza térmica sobre el clima mundial (IPCC, 2007).

Con ello el primer efecto del CC es un aumento de temperatura, considerando que el clima puede verse afectado si se altera la superficie del planeta: al cambiar el albedo planetario, varía la proporción de radiación solar que refleja la Tierra y con ellos su calentamiento. La combinación de cambios en las concentraciones de GEI y el albedo determinará la magnitud del cambio climático (Magaña Rueda, 2006).

El CC es uno de los problemas del siglo XXI, con consecuencias económicas, sociales, y ambientales de gran magnitud. Las modificaciones climáticas son procesos naturales que a lo largo de 4,600 millones de años han provocado que la Tierra sufra una serie de fluctuaciones climáticas tales como el incremento de la temperatura y glaciaciones. Estas modificaciones obedecieron a procesos naturales de la Tierra; sin embargo, en el último siglo las variaciones climáticas han incrementado debido a la sobre acumulación de los GEI (Colque Pinelo & Sánchez Campos, 2007).

Los efectos del CC son principalmente el aumento del nivel del mar, debido al derretimiento de los cascos polares, sequías en el sur de Europa, disminución de las reservas hídricas, aumento y propagación de enfermedades infecciosas, aumento de frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, pérdida de la capacidad productiva agrícola, desplazamiento de las especies hacia altitudes o latitudes más frías, buscando los climas a los que están habituados, extinción de especies que no son capaces de adaptarse ni desplazarse (Colque Pinelo & Sánchez Campos, 2007).

El CC interactúa con la VC, y otros factores no climáticos, haciendo que no siempre sea posible distinguir claramente entre sus respectivos impactos, teniendo en cuenta que establecer la frontera entre VC y CC, es especialmente difícil en regiones en las que se presenta una fuerte influencia de la VC en las condiciones corrientes del clima (OMM, 2009), y que el CC es uno de muchos factores que afecta el modo de vida de la gente (Quintero-Angel, et al., 2012).

En conclusión, el término CC, para el (IPCC, 2007) denota un cambio en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persisten durante un periodo prolongado. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. Difiriendo de la definición utilizada en la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) y Ley General de Cambio Climático (2012), que describen el cambio climático como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparables.

## **2.5 Contaminación atmosférica**

La Red Atmosférica de Monitoreo Ambiental (RAMA), considera que la contaminación del aire se puede definir como la presencia en la atmósfera de uno o más elementos, en cantidad suficiente, con ciertas características y una permanencia determinada, que pueda causar efectos indeseables tanto en el ser humano, la vegetación, los animales, las construcciones y los monumentos (RAMA, 2014).

Sin embargo, Wark & Warner (2013), definen la contaminación del aire como la presencia en la atmósfera exterior de uno o más contaminantes o sus combinaciones, en cantidades tales y con tal duración que sean o puedan afectar la vida humana, de animales, de plantas, o de la propiedad, que interfiera al goce de la vida, la propiedad o el ejercicio de actividades.

El término de contaminación atmosférica se aplica por lo general a las alteraciones que tienen efectos perjudiciales sobre la salud de los seres vivos y los elementos materiales (RAMA, 2014). En general el concepto de contaminación se limita sólo a aquellas sustancias que producen un efecto nocivo incontable; si bien la contaminación del aire es un fenómeno global, dado que los contaminantes pueden dispersarse por toda la atmósfera, es en las regiones urbanas e industrializadas

donde dichos contaminantes exhiben valores muy superiores a los niveles de fondo o aire limpio (Puliafito, et al., 2013).

Para Molina y Molina (2005), existen varios procesos por los cuales los compuestos químicos son eliminado de la tropósfera. Dicho así, estos procesos de eliminación se consideran en dos grupos:

- ✚ Eliminación física: donde la eliminación de un compuesto químico de la atmósfera por lluvia se llama “deposición húmeda”, en ella el compuesto químico se disuelve en una gota de lluvia y cae con ella al suelo. El químico deja de ser un contaminante del aire, pero ahora puede afectar otra parte del medio ambiente.
- ✚ Eliminación química: este proceso de eliminación destruye la especie original, convirtiéndola en otra, cuando ocurre una reacción química, algunas de las sustancias químicas transformadas (contaminantes secundarios) son potencialmente más dañinas que sus precursoras (contaminantes primarios).

### **2.5.1 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)**

Trejo Vázquez (2006) explica que el índice IMECA, es un valor de referencia utilizado para dar a conocer a la población, el estado que guarda la contaminación atmosférica en una zona o ciudad, en una determinada fecha u hora del día. El IMECA se elabora con información de una red de monitoreo atmosférico y en su forma completa incluye datos de Bióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ ), Partículas suspendidas ( $\text{PM}_{10}$ ), Ozono ( $\text{O}_3$ ), Bióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), Monóxido de Carbono, Bióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ ). Existen redes de monitoreo de donde se obtienen los valores usados, la interpretación de ellos se hace de la siguiente manera.

El IMECA es una unidad que permite comparar las magnitudes de los diversos contaminantes en una escala homogénea que va de 0 a 500 (Hernández Romero , et al., 2004), como se observa en la tabla 5.

**Tabla 5 Interpretación del IMECA**

| IMECA   | Calidad del aire    | Intervalo de concentración para el O <sub>3</sub> (ppm) | Efectos a la salud   | Medidas   |
|---------|---------------------|---|--|---|
| 0-50    | Buena               | 0.000 - 0.070   | Ninguno  | Ninguna medida preventiva   |
| 51-100  | Regular             | 0.071 – 0.095   | Molestias en ojos, nariz y garganta en personas sensibles  | Se debe evitar caminar en la calle por tiempos largos. No se recomienda realizar ejercicio físico al aire libre   |
| 101-150 | Mala                | 0.096-0.154   | Posibles problemas respiratorios por actividad al aire libre   | Se debe evitar caminar en la calle por tiempos largos y cambios bruscos de temperatura, no ejercicio al aire libre, no fumar, disminuir el contacto con los enfermos de las vías respiratorias. |
| 151-200 | Muy mala            | 0.155-0.204   | Los síntomas anteriores se agudizan, especialmente en personas sensibles como bebés, personas de la tercera edad y personas que padecen enfermedades respiratorias crónicas. | Ingestión de jugo de frutas, atención médica oportuna en caso de alteración, atender recomendaciones del sistema de salud.  |
| 201-300 | Extremadamente mala | >0.204  |  |   |

Elaboración propia con base en datos de RAMA, (2014), Vázquez, (2006) y Hernández Romero , et al., (2004)

Estos valores estandarizan y traducen, en una escala de puntos IMECA una concentración de contaminantes, promediada en un día. De este modo se calcula un IMECA para cada uno de los contaminantes básicos o primarios. Existe una proporcionalidad entre el IMECA de un contaminante y la concentración del mismo, el punto de quiebre se alcanza cuando el valor máximo permitido por la normatividad para ese contaminante se ha alcanzado (Trejo Vázquez, 2006).

El IMECA está basado en la norma oficial mexicana NOM-085-ECOL de 1993, que establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera, definiendo valores representativos de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud dentro de una región determinada (Hernández Romero , et al., 2004), modificada por la SEMARNAT en el 2011.

## **2.6 Reacciones fotoquímicas**

Una característica importante de la química atmosférica es la ocurrencia de reacciones fotoquímicas, que ocurren a consecuencia de la absorción, por las moléculas del aire, de fotones de radiación electromagnética del sol de la región ultravioleta del espectro en cantidades mayores (Manahan, 2005).

Albert Einstein fue el primero en reconocer que la luz, además de considerarse como un fenómeno ondulatorio, posee propiedades de partícula en el sentido que puede ser absorbida (o emitida) por la materia sólo en cantidades discretas, llamadas fotones. Si la reacción es iniciada por la energía procedente de luz, se denomina reacción fotoquímica, donde se dice que la molécula en cuestión ha sido disociada o descompuesta fotoquímicamente, o bien que ha sufrido una fotólisis (Colin Baird, 2001).

La absorción de luz de las especies químicas provoca este tipo de reacciones, ya que estas no ocurren de otra manera bajo las condiciones del medio en ausencia de luz (Manahan, 2005).

El primer paso en un proceso fotoquímico es la activación de la molécula por absorción de una sola unidad de energía fotoquímica, caracterizada por una determinada frecuencia de la luz, llamada un cuanto de luz (Manahan, 2005). Las moléculas que absorben luz (usualmente en el ultravioleta, visible o en ciertos casos en la región infrarroja), inmediatamente sufren cambios en la organización de sus electrones; se dice que éstas sufren temporalmente un estado excitado electrónico.

Sin embargo, las moléculas generalmente no permanecen en el estado excitado y, por tanto, no retienen el exceso de energía proporcionado por la luz por mucho tiempo. En una pequeña fracción de segundo, las moléculas deben utilizar la energía para reaccionar fotoquímicamente o retornar a su estado fundamental, ya sea por la emisión de un fotón o convirtiendo el exceso de energía en calor que rápidamente se disipa entre las varias moléculas vecinas a causa de las colisiones (Colin Baird, 2001).

Para que ocurra una reacción fotoquímica, la luz debe ser absorbida por las especies reaccionantes. Si la luz absorbida está en la región visible del espectro solar, la especie absorbente es coloreada. El  $\text{NO}_2$  coloreado es un ejemplo de estas especies atmosféricas (Manahan, 2005).

Las reacciones fotoquímicas, incluso en ausencia de un catalizador químico, ocurren a temperaturas mucho más bajas a las reacciones que ocurren en la oscuridad. Las reacciones fotoquímicas, que son inducidas por la intensa radiación solar, desempeñan un papel importante determinando la naturaleza y el destino final de una especie química en la atmósfera (Manahan, 2005).

Los oxidantes fotoquímicos son contaminantes secundarios, ya que no son descargados directamente a la atmósfera más bien se forman a través de una serie de reacciones químicas catalizadas por la radiación solar. De estos el  $\text{O}_3$  es el compuesto más abundante en las atmósferas urbanas (Quadri de la Torre & Sánchez Castaño, 1992).

Las reacciones que ocurren después de la absorción de un fotón de luz que produce una especie excitada electrónicamente son determinadas en gran medida por la forma en que la excitada pierde su exceso de energía (Manahan, 2005).

## **2.7 Ozono**

El Ozono ( $\text{O}_3$ ), descubierto por el químico suizo C.F. Schönbein en 1840, mientras observaba una descarga eléctrica notó su característico olor penetrante y lo llamó

Ozono que significa “olor” en griego (Molina & Molina, 2005). El  $O_3$  es un gas que se forma mediante una serie de complejas reacciones en la atmósfera; la concentración de Ozono existente en una determinada localidad depende de varios factores, entre los que destacan la cantidad de  $NO_2$ , cantidad y tipo de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), intensidad de la radiación solar y otras condiciones climáticas. El  $O_3$  producido naturalmente en la estratósfera (capa más externa de la atmósfera), cumple con la función de proteger a la Tierra y sus seres vivos de las radiaciones ultravioletas provenientes del sol, por lo que su beneficio para la protección de la salud de las personas y el medio ambiente es incuestionable. Por otro lado, el  $O_3$  que produce efectos en la salud es el que se encuentra al nivel de la tropósfera (Matus C. & CH., 2002), ver la ilustración 4 Capas de la atmósfera del presente trabajo.

El  $O_3$  se crea naturalmente en la troposfera y también como consecuencia de reacciones fotoquímicas en las que intervienen gases resultantes de actividades humanas (“smog”). En la estratosfera se produce por efecto de la interacción entre la radiación solar UV y el  $O_2$ . El  $O_3$  estratosférico desempeña un papel fundamental en el balance radiativo de la estratosfera. El forzamiento radiativo del  $O_3$  varía de manera considerable por región y responde mucho más rápidamente a los cambios en las emisiones que aquellos GEI con un tiempo de vida largo (Martínez & Fernández Bremauntz, 2004). En el presente capítulo se expone la formación y destrucción en la atmósfera del  $O_3$ , así como sus efectos como  $O_3$  bueno y  $O_3$  malo.

### **2.7.1 Ozono estratosférico.**

El  $O_3$  está presente naturalmente en la atmósfera, entre los 20 y 60 km de la superficie a la atmósfera, siendo tal su concentración que sus niveles en la atmósfera son 50 veces más altos que en las ciudades más contaminadas (Sillman, 1999). La región de concentración máxima de  $O_3$  se encuentra dentro del intervalo de 20-30 km de altura en la estratosfera, cabe mencionar que esta medida puede variar de un autor a otro, alcanzando concentraciones de hasta 10 ppm (Manahan,

2005), a diferencia de las partes más cercanas a la superficie terrestre que cuentan con apenas 0.04 ppm (Whitten, et al., 2008).

Este gas se encuentra en toda la atmósfera, como ya se ha mencionado, la capa de  $O_3$  es fina, está extensamente esparcida y es muy vulnerable (Serna, 1995). La mayor parte de las concentraciones se localiza entre la estratosfera baja y media, la cual, de manera informal se conoce como la capa de Ozono (Colin Baird, 2001). Su posición en la estratósfera es beneficiosa para la vida en la Tierra ya que bloquea la radiación UV (Sillman, 1999). El  $O_3$  absorbe la luz UV muy fuertemente en la región de 220-330 nm. Si esta luz no fuera absorbida por él, ocurriría un daño severo a las formas de vida en la Tierra (Manahan, 2005).

En la estratósfera se produce por efecto de la interacción entre la radiación solar UV y el Oxígeno molecular  $O_2$ . El  $O_3$  estratosférico desempeña un papel fundamental en el balance radiativo<sup>3</sup> de la estratósfera (Martínez & Fernández, 2004). La primera condición para la constitución de  $O_3$  en la atmósfera es la presencia de Oxígeno atómico, producido en este caso por la radiación solar de longitud de onda adecuada (Bravo, et al., 2000).

La absorción de radiación electromagnética por el  $O_3$  convierte a la energía de la radiación en calor y es responsable del máximo de temperatura que se encuentre en el límite entre la estratósfera y la mesosfera a una altitud de aproximadamente 50 km (Manahan, 2005).

La radiación solar con longitudes de onda entre 0.280 mm y 0.430mm es la fuente de energía que disocia en la atmósfera a las moléculas de  $NO_2$  en oxígeno en estado atómico (O) y en una molécula de NO. El átomo libre de oxígeno da origen  $O_3$  a través de una reacción de choque de tres cuerpos con una molécula de oxígeno y una molécula cualquiera en el aire. El  $O_3$  formado en este proceso se destruye

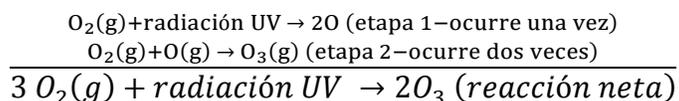
---

<sup>3</sup> Cambio en el balance entre la radiación solar que entra y la radiación infrarroja que sale de la Tierra (Martínez & Fernández, 2004).

reaccionando con las moléculas de NO alcanzándose un equilibrio en el cual las concentraciones de O<sub>3</sub> son bajas (Bravo, et al., 2000).

La razón de que el máximo de temperatura ocurra a una altitud mayor que la concentración máxima de O<sub>3</sub> surge del hecho de que éste es un absorbente eficaz de luz UV, y que la mayor parte de esta radiación es absorbida en la estratosfera superior, donde genera calor y sólo una pequeña fracción alcanza las altitudes más bajas, que permanecen relativamente frescas (Manahan, 2005).

Whitten, Raymond, Peck, & Stanley (2008) explica que el O<sub>3</sub> se forma en la atmósfera superior cuando algunas moléculas de O<sub>2</sub> absorben radiación UV solar de alta energía y se disocian en átomos de oxígeno; es cuando éstos se combinan con otras moléculas de O<sub>2</sub> para formar O<sub>3</sub>.



Cada vez que esta secuencia se lleva a cabo, el O<sub>3</sub> absorbe un fotón de luz UV, sin embargo, en el proceso se regenera tanto O<sub>3</sub> como el que se consume, es decir, cada molécula de O<sub>3</sub> puede absorber una gran cantidad de luz UV.

### 2.7.2 Ozono troposférico

El O<sub>3</sub>, en la estratosfera, es un contaminante secundario formado por reacciones fotoquímicas, es un fuerte oxidante que afecta el sistema respiratorio y daña el tejido pulmonar (Molina & Molina, 2005). El O<sub>3</sub> es un gas indeseable en la troposfera y la especie más característica del neblumo o smog fotoquímico (Manahan, 2005).

La radiación UV energética requerida para dividir las moléculas de O<sub>2</sub> y producir átomos de O para la formación del O<sub>3</sub>, no penetra a la troposfera, por lo que el O<sub>3</sub> troposférico es generado por reacciones en cadena que involucran varias especies (Manahan, 2005).

El  $O_3$  troposférico se forma en la atmósfera mediante reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar y contaminantes precursores, como los  $NO_x$  y diversos COV, consecuentemente se destruye en reacciones con el  $NO_2$  y se deposita en el suelo. En varios estudios se ha demostrado que hay una correlación entre las concentraciones de  $O_3$  y las de varios otros oxidantes fotoquímicos tóxicos procedentes de fuentes semejantes, como los Nitratos de Peroxiacilo, al Ácido Nítrico y el Peróxido de Hidrógeno. Las mediciones para controlar los niveles de  $O_3$  troposférico se concentran en las emisiones de gases precursores, pero es probable que también controlen los niveles y efectos de varios de esos contaminantes (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Por lo general, la disponibilidad de  $NO_x$  o COV limita la formación de  $O_3$ , mientras que otras clases de compuestos químicos existen en abundancia. Donde los COV son abundantes, el  $O_3$  en general puede disminuir con mayor eficacia mediante reducciones en los  $NO_x$ , mientras que con la reducción de COV no sucede lo mismo. Esta situación se conoce como “limitación por  $NO_x$ ” o “sensible a  $NO_x$ ”, es decir, donde los  $NO_x$  son abundantes, la formación de Ozono es “sensible a COV” y se sugieren reducciones en las emisiones de COV (Molina & Molina, 2005).

Se ha encontrado que la mayoría de las emisiones frescas en regiones urbanas son sensibles a COV, mientras que en áreas rurales son sensibles a  $NO_x$ . Esto ha originado un problema para el control del  $O_3$  en las ciudades; las reducciones de COV son normalmente mejores para disminuir las concentraciones pico de  $O_3$  en la ciudad, mientras que las reducciones de  $NO_x$  son necesarias para aminorar las concentraciones más lejanas en favor al viento. Sin embargo, existen casos en los que esta dependencia puede variar, por ejemplo, en contraste con lo anterior, la formación de  $O_3$  en la ZMCM es sensible a los  $NO_x$  (Molina & Molina, 2005).

Eventos de contaminación y altas concentraciones de  $O_3$  están asociados específicamente con la luz solar y altas temperaturas. Altas concentraciones de  $O_3$  son inusuales en temperaturas cerca a los  $20^\circ C$  y son usualmente asociadas con temperaturas cercanas a los  $30^\circ C$ . Altas concentraciones de  $O_3$  es también asociado con vientos ligeros y condiciones que eliminen la mezcla vertical en la

atmósfera (inversiones térmicas), pero las condiciones más importantes son la radiación solar y las altas temperaturas (Sillman, 1999).

Los periodos con altas concentraciones de  $O_3$  son observados con lentos movimientos, sistemas ambientales de presión alta que resultan de tener un sol brillante, temperatura alta y aire estancado, estos sistemas típicamente están en un estrato troposférico estable con mezclas conductivas por medio de la inversión de temperatura que ayudan a contener los contaminantes precursores ( $NO_x$  y VOCs) en la troposfera. Para su estudio es necesario incluir condiciones de meteorología que evalúen las características espacio temporal de los vientos y sus direcciones, la temperatura, la presión atmosférica, el tipo de nubes que se encuentren y si los días están soleados entre otras condiciones (Reyes Cervantes, 2008)

Un camino para involucrar los efectos meteorológicos sobre concentraciones de  $O_3$  es correlacionar la calidad del aire con uno o más aspectos de la meteorología y usar la asociación resultante para estimar el  $O_3$ , Seinfeld (1991) citado por (Reyes Cervantes , 2008) observa que periodos con altas concentraciones de  $O_3$  son observados con movimientos lentos, presiones ambientales altas ocasionados de sol ardiente con altas temperaturas y aires estancados.

### **2.7.3 Sustancias Agotadoras de Ozono**

Las Sustancias Agotadoras de  $O_3$  (SAO), existen naturalmente en la atmósfera o pueden generarse como resultado de las actividades humanas. Contienen en su estructura átomos de Cl, Flúor y Br que al liberarse son los responsables de la destrucción de la molécula de  $O_3$ . Las SAO antropogénicas más conocidas son los CFC, HCFC, halones, bromuro de metilo (MBR), tetracloruro de carbono (TET) y metil cloroformo (MCF). Las SAO se utilizan principalmente en los sistemas de refrigeración, aire acondicionado, espuma rígida de poliuretano, solventes, plaguicidas, aerosoles y extintores, entre otros productos según la WMO y UNEP, (2003) citado por SEMARNAT (2012).

El aumento del Cl estratosférico es debido al uso y liberación de clorofluorocarbonos, que contienen Cl, F y C, denominados CFC, los cuales incluyen CFC11 ( $\text{CFC}_3$ ) y CFC12 ( $\text{CF}_2\text{CL}_2$ ) estos compuestos son de una familia que no existe naturalmente en el ambiente, no son tóxicos, inflamables y reactivos, tienen propiedades de condensación útiles, aplicados como refrigerantes, solventes en aplicaciones industriales, la limpieza en seco, entre otras. En la actualidad los CFC están siendo reemplazados en los recipientes de aerosoles por otros gases, como el Butano, a menudo combinado con un inhibidor de llamas (Colin Baird, 2001) y (Benavides Ballesteros & León Aritizabal, 2007).

La descomposición del  $\text{O}_3$  también ocurre en las superficies sólidas, como los óxidos metálicos y las sales producidas por los gases de escape de los cohetes. El aire exterior que se bombea en los sistemas de ventilación de los aviones de navegación a elevada altitud se hace pasar sobre partes calientes del motor para descomponer el  $\text{O}_3$  (Manahan, 2005). Desde una perspectiva local y regional, los hidrocarburos y Óxidos de Nitrógeno son causantes de la degradación de la calidad del aire al formar  $\text{O}_3$  y material particulado secundario (Molina & Molina, 2005).

La descomposición del  $\text{O}_3$  a una velocidad de reacción significativa requiere la reacción con especies catalizadores. Algo de  $\text{O}_3$  se pierde por reacciones que involucran átomos de oxígeno intermediarios. Una sola secuencia de reacciones no puede responder a la destrucción del  $\text{O}_3$  requerida para mantener el nivel de  $\text{O}_3$  en la estratosfera, de forma que su destrucción es catalizada por varios constituyentes traza, tanto naturales como contaminantes, incluyendo NO,  $\text{NO}_2$ , H,  $\text{HO}\cdot$ ,  $\text{HOO}\cdot$ , ClO, Cl, Br, y BrO. Aparte de los efectos de especies contaminantes de Cl y Br, el NO y el  $\text{NO}_2$  de fuentes tanto naturales como contaminantes, son los intermediarios más importantes (Manahan, 2005). Los hidrocarburos más activos fotoquímicamente y oxidativamente podrían descomponerse en una escala de tiempo de minutos, mientras que los menos reactivos podrían perdurar muchas horas, contribuyendo a la formación de  $\text{O}_3$  (Molina & Molina, 2005).

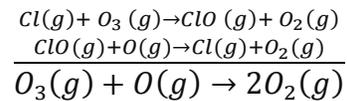
El aumento de los niveles de Cl y Br estratosféricos es debido ante todo a la liberación a la atmósfera de compuestos orgánicos antropogénicos que contienen a

estos dos compuestos. En concreto, los culpables son aquellos que no tienen un sumidero troposférico, es decir, que no disponen de un proceso natural, como la disolución en agua de lluvia o la oxidación por gases atmosféricos. Después de viajar a lo largo de la atmósfera, estos compuestos se empiezan a difundir en la estratósfera donde, finalmente, se descomponen fotoquímicamente por la luz UV-C solar y como consecuencia se liberan sus átomos de halógeno (Colin Baird, 2001).

Los CFC permanecen en la atmósfera por varias décadas. Estos compuestos son químicamente inertes e insolubles en agua, así que no pueden ser eliminados por los mecanismos de limpieza disponibles en la tropósfera, mencionados en el capítulo 2.5 de este trabajo. Dichos compuestos son capaces de persistir en la atmósfera el tiempo suficiente para difundirse hacia la estratósfera, en donde finalmente son descompuestos por radiación solar de alta energía y de corta longitud de onda, para producir radicales que pueden destruir el  $O_3$  mediante un proceso catalítico (Molina & Molina, 2005). Es decir, los CFC no absorben los componentes de luz solar de longitud de onda mayor a 290 nm, y generalmente requieren luz de 220 nm o menos para fotolizarse. Es por eso por lo que, para descomponerse, los CFC deben ascender a la estratósfera media, ya que la luz UV-C no penetra latitudes menores; debido a que el movimiento vertical en la estratósfera es lento, la vida atmosférica de dichas moléculas es elevada. Los compuestos como los CFC no tienen sumideros troposféricos debido a que no sufren ninguno de los procesos normales de eliminación: no son solubles en agua y, por tanto, no son lavados del aire; no son atacados por el radical hidroxilo u otros gases atmosféricos, con lo que no pueden descomponerse; y no se disocian fotoquímicamente ni por la luz visible, ni por UV-A (Colin Baird, 2001).

Como ya se mencionó, los CFC se concentran en la atmósfera, una vez ahí la luz UV los descompone y se forman átomos de Cl, que reaccionan con el  $O_3$  y forman ClO y  $O_2$ . Las moléculas de ClO reaccionan con los átomos de O de la estratosfera y se vuelven a formar átomos de Cl. El resultado global es la descomposición del  $O_3$  en  $O_2$ . Los átomos de Cl se consumen en el primer paso, pero se regeneran en

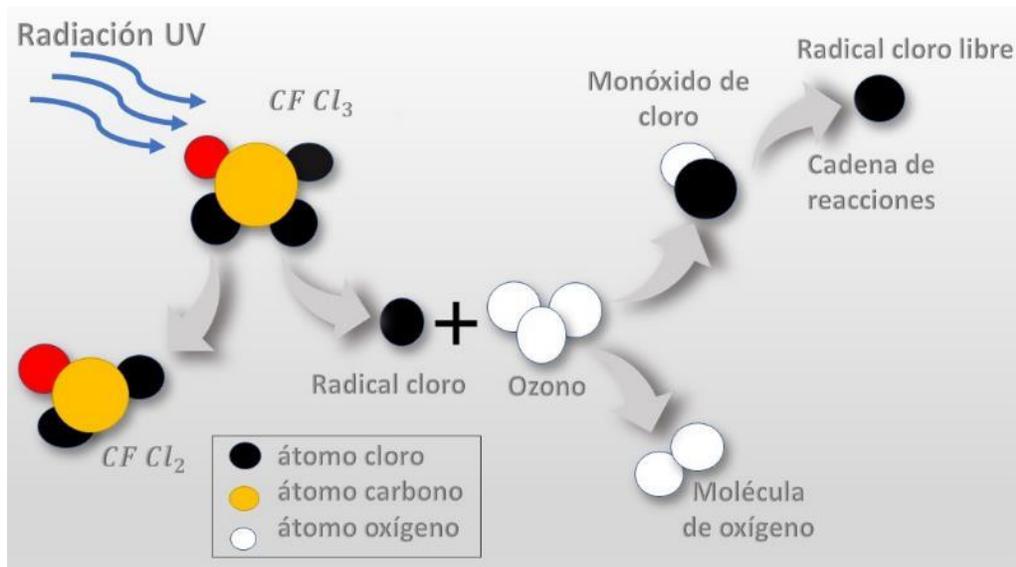
el segundo, así los átomos de Cl no se extinguen y actúan como un catalizador (Ebbing & Gammon , 2010), como se muestra en la siguiente ecuación:



(Ebbing & Gammon , 2010)

Es decir, los CFC no poseen ningún sumidero troposférico de tal manera que todas las moléculas ascienden a la estratósfera, mediante este transporte, las moléculas de CFC migran a las partes medias y altas de la estratósfera dónde hay suficiente UV-C de la luz solar aún no filtrada para descomponer fotoquímicamente dichas moléculas, liberando de este modo átomos de Cl (Colin Baird, 2001). Ver ilustración 6.

**Ilustración 6 Degradación de O<sub>3</sub>**



Elaboración propia con datos de Querelle & Cia (2015)

A los efectos de determinar el riesgo de las emisiones de dichas sustancias se ha establecido una escala denominada Potencial del Agotamiento del Ozono (O<sub>3</sub>) (PAO), la cual mide cuánto O<sub>3</sub> estratosférico puede ser destruido por una sustancia comparada con el CFC-11, cuyo PAO es 1.0 (Vega, 2010). A continuación, se hace

resumen de los diferentes PAO para las sustancias consideradas por el Protocolo de Montreal en la Tabla 6.

**Tabla 6 Sustancias agotadoras de O<sub>3</sub> consideradas por el protocolo de Montreal**

| <b>Sustancia agotadora de O<sub>3</sub></b> | <b>Descripción</b>  | <b>PAO</b>      |
|---|---|-----------------|
| <b>Clorofluorocarbonos (CFC)</b>            | Se usa como gas refrigerante, como propelente en latas de aerosoles, como agente de soplado, como limpiador de placas, etc.                                       | 0.6-1.0         |
| <b>Hidroclorofluorocarbonos (HCFC)</b>      | Diseñados para sustituir el uso de los CFC, ya que son menos destructivos.  | No especificado |
| <b>Tetracloruro de carbono</b>              | Sustancias químicas que contienen cloro, usadas como solventes para la limpieza de metales.   | 1.1             |
| <b>Metilcloroformo</b>                      |   | 0.1             |
| <b>Bromoclorometano (clorobrometano)</b>    | Capacidad de solvente similar al de metilcloroformo, es tóxico y su potencial de agotamiento de O <sub>3</sub> es mayor a 0.1.                                    | 0.12            |
| <b>Bromofluorocarbonos (BFC) o Halones</b>  | Contienen bromo, usado en algunos extinguidores de fuego, puede llegar a ser hasta diez veces más dañina para la Capa de O <sub>3</sub> que la mayoría de los CFC | 3.0-10.0        |
| <b>Hidrobromofluorocarbonos (HBFC)</b>      | Familia de sustancias químicas hidrogenadas y asociadas a los halones, contienen átomos de carbono enlazados a Flúor, Bromo e Hidrógeno                           | 0.02-1.0        |
| <b>Bromuro de metilo</b>                    | Usado en la fumigación de Tierras de cultivo, actividades cuarentenarias y pre-embarque.  | 0.6             |

Elaboración propia con información de Vega (2010)

## 2.8 Smog fotoquímico

Un ejemplo de la degradación de la calidad del aire por efectos de la contaminación que ocurre en las grandes ciudades es el smog. Los reactivos que producen el tipo más común de smog son, principalmente, las emisiones de automóviles ya que el funcionamiento de los motores de los vehículos produce más contaminación del aire que cualquier otra actividad humana, aunque también en las áreas rurales algunos de los ingredientes pueden provenir de las emisiones procedentes de los bosques (Colin Baird, 2001).

La producción relativa de niveles altos de  $O_3$  a nivel del suelo es el resultado de reacciones inducidas por la luz entre los contaminantes. Este fenómeno se denomina smog fotoquímico, y a veces es descrito como “una capa de  $O_3$  en un lugar erróneo”, en contraste con el  $O_3$  estratosférico (Colin Baird, 2001).

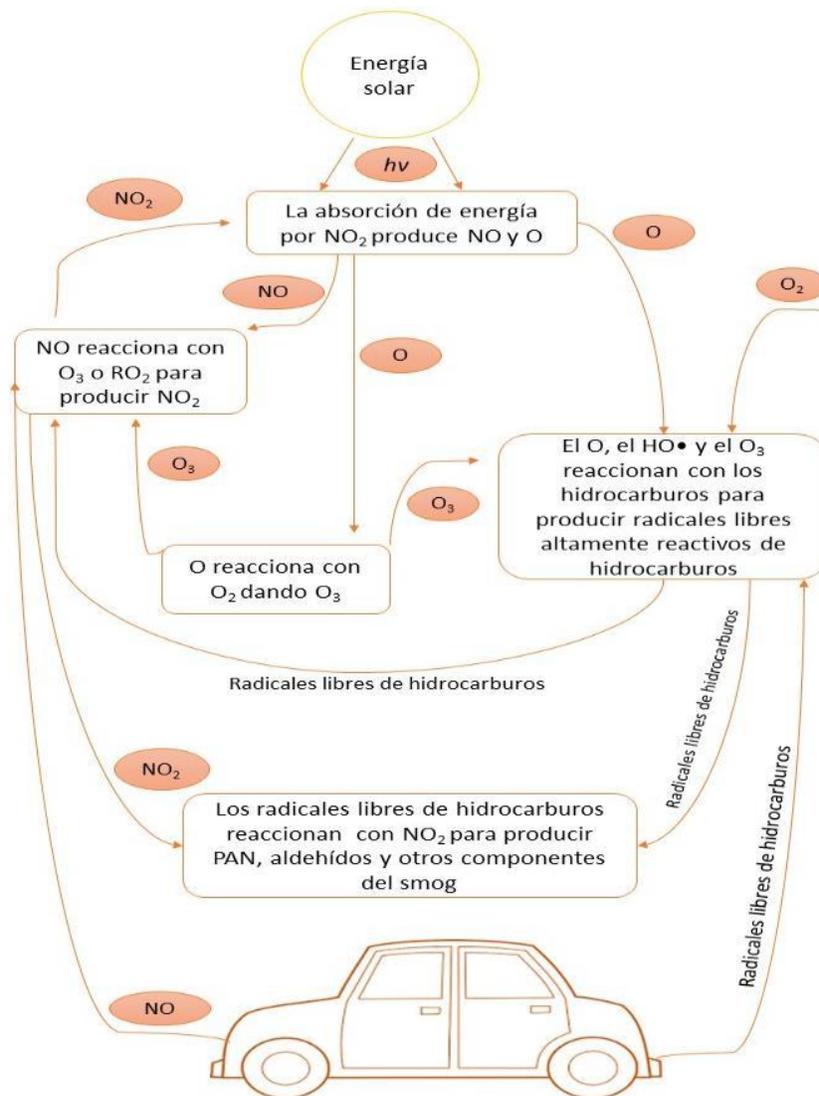
Se denomina smog fotoquímico a la mezcla de reaccionantes y de productos de la reacción existente cuando hidrocarburos y óxidos de nitrógeno están presentes simultáneamente en una atmósfera urbana en presencia de luz solar. En una atmósfera urbana, los hidrocarburos aparecen generalmente al mismo tiempo que los óxidos de nitrógeno (ya que la mayor parte de ambos provienen del mismo tipo de fuente, es decir, de los automóviles). El smog fotoquímico se produce en un sistema complejo, en el que tanto la meteorología como las emisiones continuas de contaminantes y las reacciones químicas desempeñan un papel importante (Puliafito, et al., 2013).

La formación de compuestos oxidantes en el aire, particularmente  $O_3$ , es indicativa de la formación de smog. Cuando éstos exceden los 0.15 ppm durante más de una hora puede suponerse que el smog presenta elevados niveles. Los tres ingredientes necesarios para generar smog fotoquímico son luz ultravioleta, hidrocarburos y  $NO_x$  (Manahan, 2005).

Los motores de combustión interna usados en los automóviles y camiones producen hidrocarburos reactivos y  $NO_x$ , dos de los tres ingredientes necesarios para la

formación del smog, dentro de estas atmósferas con hidrocarburos reactivos y  $\text{NO}_x$  acompañadas de una intensa luz solar y masas estancadas de aire, tienden a formarse oxidantes, oxidante fotoquímico total (sustancia en la atmósfera capaz de oxidar el ión ioduro de yodo elemental) siendo el oxidante más importante en la atmósfera, entre otros, el  $\text{O}_3$  (Manahan, 2005). El proceso de formación del smog involucra centenares de reacciones diferentes, que a su vez implican docenas de compuestos químicos actuando simultáneamente (Colin Baird, 2001). Como puede observarse en la ilustración 7.

**Ilustración 7 Formación de smog fotoquímico**



(Manahan, 2005).

La manifestación más obvia del smog es la formación de una neblina de un color amarillento-gris-pardusca, que es debe a la presencia en el aire de pequeñas gotas de agua que contienen productos de reacciones químicas, las cuales tienen lugar entre los contaminantes del aire. El smog tiene un olor desagradable debido a algunos de sus componentes gaseosos. Al color amarillo en la atmósfera de una ciudad con smog es causado por el dióxido de nitrógeno presente, ya que este gas absorbe parte de la luz visible cerca del límite del violeta y, consecuentemente, la luz solar transmitida a través de la niebla es amarilla (Colin Baird, 2001).

Uno de los componentes del smog fotoquímico que puede provocar incertidumbre en los escenarios de calidad del aire a futuro, es el aerosol atmosférico. Dependiendo de su composición, puede generar un forzamiento radiativo positivo o negativo y atenuar o incrementar el flujo atnítico en superficie, reduciendo o aumentando el potencial de formación de O<sub>3</sub> urbano. El Aerosol Orgánico Secundario (AOS), secuestra compuestos orgánicos reactivos que de otra forma se oxidarían fragmentándose sucesivamente, reduciendo el potencial de formación de O<sub>3</sub> (Ruiz Suárez, et al., 2008).

Otro ingrediente vital en un episodio de smog fotoquímico es la luz solar, la cual sirve para incrementar la concentración de radicales libres que participan en los procesos químicos en la formación de smog. Los productos finales del smog son Ozono, Ácido nítrico y compuestos orgánicos parcialmente oxidados (Colin Baird, 2001), resumido en la siguiente ecuación.



Para que una ciudad esté sometida a un episodio de smog fotoquímico deben darse diversas condiciones: en primer lugar, debe haber un tráfico importante que emita al aire suficiente NO; hidrocarburos y otros COV. en segundo lugar, el tiempo debe ser cálido y lucir mucho sol, con el fin de que las reacciones cruciales, algunas de las cuales son fotoquímicas, ocurran a una elevada velocidad. Po último, debe haber, relativamente, poco movimiento de masas de aire de manera que los reactivos no se diluyan. La producción fotoquímica de O<sub>3</sub> ocurre durante las

estaciones secas en áreas rurales tropicales, donde la quema de biomasa para el clareado de los bosques o el brozado de la maleza es una práctica muy extendida (Colin Baird, 2001).

El impacto final de la manifestación local o regional del cambio climático, en la reactividad fotoquímica, dependerá de un conjunto de factores como son: el impacto del aumento de la temperatura en las emisiones, el impacto en la formación de aerosoles secundarios y por ello el campo de radiación fotoquímicamente activa y su efecto en las constantes fotólisis de compuestos presentes en el smog fotoquímico (Ruiz Suárez, et al., 2008).

## **2.9 Efectos en la salud y el ambiente**

La disminución del O<sub>3</sub> estratosférico y el aumento del O<sub>3</sub> troposférico son fenómenos antropogénicos y ambos perjudican la salud, porque el O<sub>3</sub> estratosférico bloquea la radiación solar ultravioleta (UV) y el O<sub>3</sub> troposférico irrita las mucosas y la piel. Sin embargo los efectos térmicos de ambas alteraciones del O<sub>3</sub> atmosférico son pequeños y contrarios entre sí; por un lado, al haber menos O<sub>3</sub> en la estratósfera, más radiación terrestre se fuga del planeta y eso enfría el clima; por otro lado, al haber más O<sub>3</sub> en la troposfera, más radiación terrestre se atrapa en la atmósfera y eso calienta el clima. De modo que el adelgazamiento de la capa de O<sub>3</sub> se contrapone al efecto invernadero y la contaminación urbana por O<sub>3</sub> refuerza el EI (Martínez & Fernández, 2004).

El incremento de O<sub>3</sub> troposférico contribuye al calentamiento global al tratarse de un GEI, pero además es un potente oxidante que puede provocar efectos en la sobre la salud humana, los materiales, la vegetación, la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas (Barmejo, et al., 2013). El neblumo o smog oxidante o fotoquímico es un contaminante atmosférico regional, es caracterizado por visibilidad inferior a 5km, irritación moderada o severa de los ojos, agrietamiento de hule o caucho y deterioro de los materiales, en otros términos, también es tóxico para los animales y las plantas (Manahan, 2005).

Es posible que en algunas personas sensibles se registren efectos en la salud con concentraciones por debajo de los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tomando como base varios estudios de series cronológicas, se estima que el número de muertes que se le pueden atribuir aumenta un 1-2% en los días en los que la concentración media de  $\text{O}_3$  durante ocho horas llega a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por encima de lo que se registra cuando los niveles están en un nivel de referencia de  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Organización Mundial de la Salud, 2006).

De acuerdo con el tiempo que transcurre entre la exposición y la aparición de los efectos, los daños a la salud asociados con el  $\text{O}_3$  pueden clasificarse como de corto plazo (de una a tres horas), prolongados (de seis a ocho horas) y de largo plazo (meses o años). Los efectos agudos se han observado en concentraciones de  $\text{O}_3$  de 0.12 ppm, cuando los individuos realizan ejercicio moderado o intenso o en concentraciones más bajas (de 0.08 ppm) después de exposiciones prolongadas, tras un ejercicio moderado o bajo (Secretaría de Salud, 2014).

Entre los efectos agudos se menciona la tos y dolor de pecho, irritación de los ojos, dolor de cabeza pérdidas en la función pulmonar y ataque de asma. (Molina & Molina, 2005) La exposición crónica a niveles elevados de  $\text{O}_3$  es responsable de perdidas en el funcionamiento del sistema inmune, envejecimiento acelerado y aumento de la susceptibilidad ante otras infecciones. También puede causar daños a las cosechas y a la vegetación (Molina & Molina, 2005). Ver tabla 7.

**Tabla 7 Efectos en humanos a exposiciones de O<sub>3</sub>**

| <b>Respuesta</b>                                     | <b>Sujetos</b>                               | <b>Condiciones de exposición</b>  |
|--|--|---|
| <b>Decremento del 5-10% en función respiratoria</b>  | Hombres Jóvenes sanos                        | 0.18 ppm con ejercicio pesado intermitente durante 2 horas (O <sub>3</sub> en aire purificado)  |
| <b>Incremento en tos</b>                             | Niños sanos                                  | 0.10 ppm con ejercicio moderado durante 6 horas (O <sub>3</sub> en aire purificado)   |
|  | Hombres jóvenes sanos                        | 0.12 ppm con ejercicio pesado intermitente durante 2 horas (O <sub>3</sub> en aire purificado)  |
| <b>Funcionamiento atlético reducido</b>              | Hombres jóvenes sanos                        | 0.08 ppm con ejercicio moderado durante 6 horas (O <sub>3</sub> en aire purificado)   |
|  | Hombres y mujeres jóvenes sanos              | 0.12-0.13 con ejercicio pesado intermitente durante 16-28 minutos (O <sub>3</sub> en aire ambiente)                                     |
|  | Hombres jóvenes sanos                        | 0.18 ppm con flujo respiratorio de 54lt/minuto durante 30 minutos (O <sub>3</sub> en aire purificado)                                   |
|  | Hombres y mujeres jóvenes sanos              | 0.12-0.13 ppm con ejercicio y con un flujo de intercambio de 30-120lt/minutos durante 16-28 minutos (O <sub>3</sub> en aire purificado) |
| <b>Incremento en reactividad nasal</b>               | Hombres jóvenes sanos                        | 0.08 ppm con ejercicio moderado durante 6 horas (O <sub>3</sub> en aire purificado)   |
|  | Hombres adultos jóvenes con rinitis alérgica | 0.18 ppm con ejercicio pesado durante 2 horas (O <sub>3</sub> en aire purificado)   |
| <b>Incremento en permeabilidad nasal</b>             | Hombres jóvenes sanos                        | 0.40 ppm con ejercicio pesado intermitente durante 2 horas (O <sub>3</sub> en aire purificado)  |
| <b>Incremento en inflamación nasal</b>               | Hombres sanos                                | 0.08 ppm con ejercicio moderado durante 6 horas (O <sub>3</sub> en aire purificado)   |
| <b>Paso de partículas traqueobronquial acelerado</b> | Hombres sanos                                | 0.20 ppm con ejercicio ligera intermitente durante 2 horas (O <sub>3</sub> en aire purificado)  |

Elaboración propia con datos de Quadri de la Torre & Sánchez Castaño (1992)

Los efectos adversos van desde cambios transitorios de la función pulmonar, aumento en la incidencia de enfermedades y síntomas respiratorios, mayor susceptibilidad para la aparición de infecciones respiratorias, lo que indirectamente se refleja en el aumento de ingresos hospitalarios y de visitas a salas de emergencia. Estudios recientes también han encontrado asociaciones entre la exposición al O<sub>3</sub> y el aumento de la mortalidad diaria que se presenta

particularmente entre personas con enfermedades respiratorias o cardiovasculares previas según la NOM-020.-SSA1-2014 (Secretaría de Salud, 2014).

Los cambios de la función pulmonar se caracterizan por la disminución de la Capacidad Vital Forzada (CVF) y el Volumen Espiratorio Forzado del primer segundo (VEF1). Los cambios de la CVF se deben a una disminución de la capacidad inspiratoria, al parecer tras una inhibición neurológica. En relación con la disminución del VEF1, es que en promedio el VEF1 disminuye cuando aumentan las concentraciones de O<sub>3</sub>, sin pasar por alto la gran variación individual (Secretaría de Salud, 2014).

En virtud de que el O<sub>3</sub> es un compuesto altamente oxidante, es capaz de afectar materiales orgánicos e inorgánicos. Su toxicidad biológica es muy compleja, pues son muchos los sistemas que pueden resultar afectados por la interacción entre éste y los componentes celulares. Los mecanismos de toxicidad propuestos tienen que ver con la modificación de los sistemas de oxidación celular, en la que participan diferentes enzimas, algunas de las cuales aún no están bien identificadas. (Secretaría de Salud, 2014)

Como resultado del daño causado por esta contaminación, los cultivos como las habas no pueden crecer adecuadamente. Un elevado nivel de O<sub>3</sub>, también afecta a ciertos materiales: endurece el caucho, reduciendo el tiempo de vida útil de los productos de consumo, como los neumáticos de las ruedas de los coches, y blanquea materiales como los tejidos (Colin Baird, 2001).

Los efectos del O<sub>3</sub> son potenciados por la presencia de otras variables ambientales, y existe evidencia de que son acumulativos (Quadri de la Torre & Sánchez Castaño, 1992). Ya que algunas investigaciones indican que los efectos del O<sub>3</sub> están relacionados más de cerca con la exposición acumulativa que con las concentraciones máximas de una hora, (Organización Mundial de la Salud, 2006) debería ser considerado esto para la aplicación de la normatividad mexicana vigentes.

## 2.10 Correlación de Pearson

Pedroza & Dicoyski, (2007) mencionan que el análisis de correlación se usa para medir el grado de relación entre dos variables dependientes una de otra. La correlación es un indicador estadístico definido por el coeficiente de correlación “R” y es medido en una escala que varía entre -1 y +1. Este análisis de correlación es usado cuando se dispone de variables continuas o discretas de muchos valores donde se pretende saber si están asociadas o no. La correlación de Pearson se designa como  $r_{xy}$ , según Garriga Trillo, et al., (2015) en donde:

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

Siendo:

$S_x$  = desviación típica de la variable X

$S_y$  = desviación típica de la variable Y

$S_{XY}$  = covarianza entre X e Y

Es decir que el coeficiente de Pearson es el cociente entre la covarianza entre X e Y el producto de la desviación típica de X y la desviación típica de Y.

EL valor de +1, indica una correlación perfecta y directa, en cambio el valor de -1 significa que es una correlación perfecta e inversa. El valor de  $R=0$ , señala una ausencia de correlación entre las variables lo cual funciona como indicador de que las variables son dependientes entre sí (Pedroza & Dicoyski, 2007). La relación lineal directa es la que asume que a valores mayores en una de las variables corresponde también valores similares en la otra variable y viceversa, es decir valores menores en ambas variables. La relación lineal inversa, es la que define que los valores mayores de una variable corresponden a valores menores en la otra variable y viceversa (Garriga Trillo, et al., 2015).

# 3 Marco contextual



y su entorno adyacente o *hinterland*, se ubican en el altiplano mexicano y presenta una heterogeneidad de condiciones que le diferencian del resto del territorio estatal, ya que es un espacio abundantemente construido con asentamientos urbanos en las cabeceras municipales adyacentes a la ciudad de Toluca y asentamientos rurales en las áreas más lejanas de la ciudad (Pérez, et al., 2010), entre las coordenadas de los 19°02' y 19°32' latitud norte y 99°19' y 99°56' longitud oeste. Las porciones montañosas en las que se encuentra residen entre los 2600 y 4680 msnm, factor geográfico que ha influido en el crecimiento y desarrollo de los bosques de coníferas y ha condicionado las características ambientales, ecológicas, demográficas y socioculturales de las comunidades adyacentes a sus estribaciones (Pérez, et al., 2010). El territorio de esta zona está formado por un relieve accidentado con un sistema de cadenas montañosas, siendo las geoformas más comunes las laderas abruptas, las lomas y las mesetas, además de zonas planas; ésta región geográfica forma parte de la región hidrológica No. 12, Lerma-Chapala-Santiago, dentro de la cuenca Alta del Río Lerma-Toluca.

Adicionalmente, en los ambientes de estos municipios y su *hinterland* se presentan diversos climas, condicionados por la heterogeneidad topográfica y otros elementos geográficos. Según el sistema modificado por García (1986) de la clasificación climática de Köppen citado por Pérez y otros (2010) y la Secretaría del Medio Ambiente (2012) la ZMVT tiene tres tipos de clima:

- ✚ C (w2)(w)b(i')g: clima templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano, poca oscilación térmica, verano fresco y lluvioso, la temperatura más alta se presenta antes del solsticio de verano. Abarca la mayor parte de los municipios, principalmente las partes bajas.
- ✚ C (w2)(w)b(i'): Clima semifrío subhúmedo con régimen de lluvias en verano, cuatro meses o más con temperaturas superiores a 10°C (verano largo), poca oscilación térmica (entre 5° y 7 °C), la temperatura más alta se presenta después del solsticio de verano. Este clima se presenta en zonas con altitud considerable como el Nevado de Toluca.

- ✚ ETCH: clima frío con temperatura media anual entre  $-2^{\circ}\text{C}$  y  $-5^{\circ}\text{C}$ , característico de grandes altitudes, con régimen de lluvias en verano. Este clima es característico de zonas altas, como el volcán Nevado de Toluca.

### **3.1 Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la ZMVT**

La RAMA-ZMVT cuenta con la integración de la infraestructura requerida para la medición, registro, procesamiento y difusión de los niveles de los principales contaminantes atmosféricos, así como los factores meteorológicos que influyan sobre los niveles de contaminación del aire (Secretaría del Medio Ambiente, 2012). Dichas actividades de monitoreo atmosférico en la ciudad de Toluca iniciaron en el año de 1975, con una red manual para Partículas Suspendidas Totales (PST), posteriormente, en 1987 por medio de la Facultad de Química de la UAEM, se incorporaron las mediciones de Óxidos de Nitrógeno y Bióxido de Azufre por vía húmeda en 3 de las 5 estaciones que se tenían en ese año (RAMA, 2014).

En 1992, el Gobierno del Estado de México adquiere los componentes para la instalación de la RAMA-ZMVT, misma que inició operaciones en 1993 siendo administrada por la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado, a principios del año 2010, fue cuando la RAMA-ZMVT fue renovada en su totalidad, reinstalando una estación de monitoreo (Toluca-Centro) e instalando una nueva estación (Ceboruco) (RAMA, 2014).

Hoy, la RAMA-ZMVT tiene como principal objetivo la vigilancia del comportamiento de los contaminantes atmosféricos, la evaluación de las tendencias de la calidad del aire y el impacto de las estrategias de control aplicadas, así como informar a la población sobre los niveles de contaminación del aire (Secretaría del Medio Ambiente, 2012). En RAMA (2014) se menciona también que la red de monitoreo atmosférico está vinculada con los siguientes objetivos:

- ✚ Evaluar la calidad del aire en una zona establecida, mediante la generación de indicadores de la calidad del aire.

- ✚ Crear las medidas necesarias 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 y brindar información en caso de situaciones de alerta, alarma y emergencia.
- ✚ Obtener una base de datos para planear la distribución del suelo y del transporte.
- ✚ Conocer el impacto que ejercen ciertos contaminantes sobre la población.
- ✚ Proporcionar datos para el desarrollo y la validación de modelos.
- ✚ Desarrollar estrategias de control para prevenir problemas por contaminación, o bien, eliminarlos.

### **3.1.1 Sitios de muestreo de la RAMA-ZMVT**

Para cumplir con uno o más de estos objetivos de la RAMA-ZMVT y para que ésta proporcionara datos confiables y representativos, los criterios de selección del sitio debieron tomar en consideración la distribución territorial de las áreas emisoras y receptoras de contaminantes atmosféricos así como la topografía del sitio, la influencia de diversos factores climáticos y meteorológicos (presión, temperatura, precipitación pluvial, velocidad y dirección del viento), así como una adecuada caracterización de las actividades económicas (AMBIOTEC S.A. de C.V., 1992).

Del mismo modo, para el número promedio de estaciones de monitoreo que deben considerarse en los programas de vigilancia de la calidad del aire en zonas urbanas e industriales de acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud, dependiendo del tamaño de la población, oscila entre las 2 a las 10 estaciones, y ya que la zona de influencia de las estaciones de la RAMA-ZMVT, considerada en esta investigación, cuenta con una población de 1, 516, 996 habitantes, el número mínimo de estaciones es 5, en cambio, la RAMA-ZMVT cuenta con 7 estaciones distribuidas dentro de 3 regiones, cumpliendo así, con los requisitos mínimos para el monitoreo atmosférico, ver tabla 8 donde se mencionan las estaciones, su abreviatura y su ubicación.

**Tabla 8 Estaciones de la RAMA-ZMVT**

| <b>Región</b>      | <b>Estación</b>             | <b>Abreviatura</b> |
|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| <i>Zona Centro</i> | Toluca Centro               | CE                 |
|                    | Oxtotitlán                  | OX                 |
| <i>Zona Norte</i>  | Aeropuerto                  | AP                 |
|                    | San Cristóbal Huichochitlán | SC                 |
| <i>Zona Sur</i>    | Metepec                     | MT                 |
|                    | Ceboruco                    | CB                 |
|                    | San Mateo Atenco            | SM                 |

Elaboración propia con datos de RAMA (2014)

Estas estaciones se encuentran ubicadas dentro las áreas urbano-industriales (AMBIOTEC S.A. de C.V., 1992) de 7 municipios que por su dinámica e interacción socioeconómica contribuyen de manera significativa a la contaminación atmosférica (SEMARNAT, 2012), siendo estos Lerma, Metepec, San Mateo Atenco, Toluca, Ocoyoacac, Xonacatlán y Zinacantepec, los cuales abarcan una extensión territorial de 1,208.2 km<sup>2</sup>, ver tabla 9 Municipios de la RAMA-ZMVT.

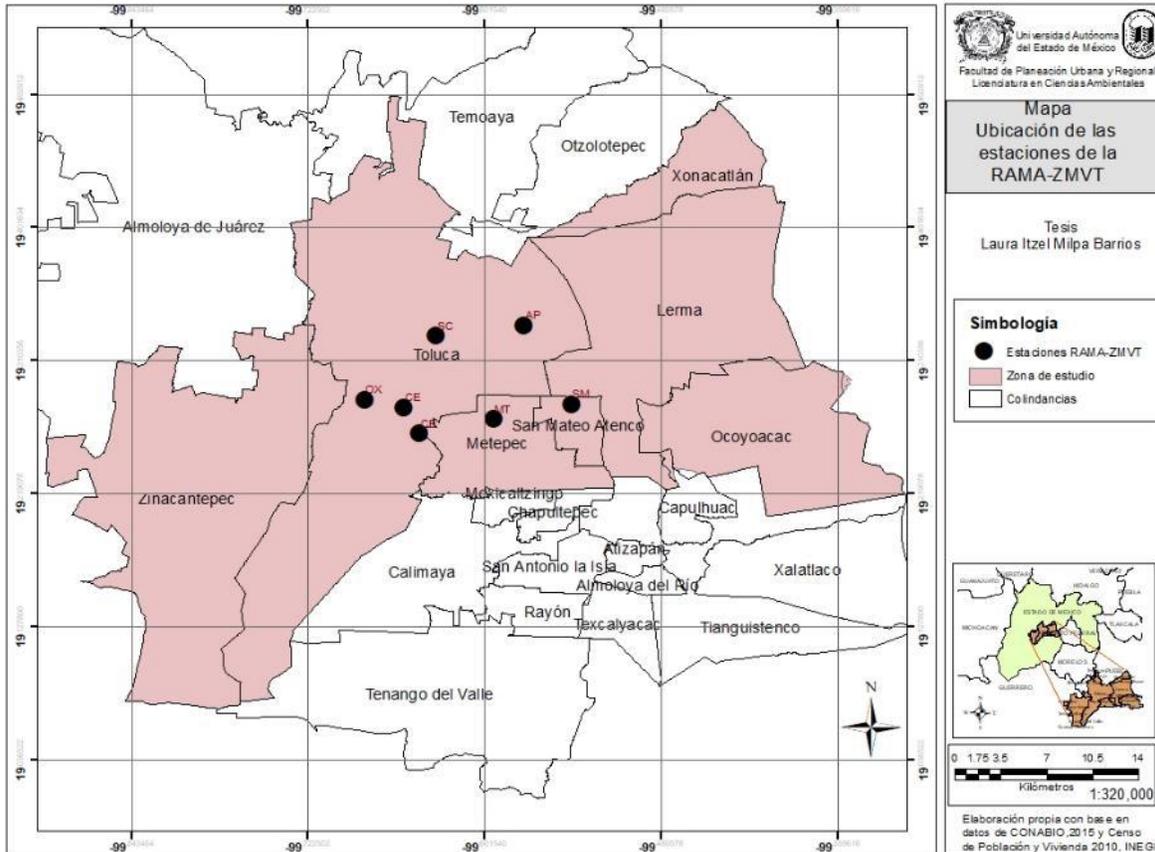
**Tabla 9 municipios de la RAMA-ZMVT**

| <b>No</b>                                | <b>Municipios</b> | <b>Cabecera Municipal</b> | <b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b> |
|--|-------------------|---------------------------|------------------------------------|
| 1  | Lerma             | Lerma de Villada          | 228.6                              |
| 2  | Metepec           | Metepec                   | 70.5                               |
| 3  | Ocoyoacac         | Ocoyoacac                 | 134.8                              |
| 4  | San Mateo Atenco  | San. Mateo Atenco         | 12.6                               |
| 5  | Toluca            | Toluca de Lerdo           | 420.1                              |
| 6  | Xonacatlán        | Xonacatlán                | 32.9                               |
| 7  | Zinacantepec      | San Miguel Zinacantepec   | 308.7                              |
| <b>Total de los municipios RAMA-ZMVT</b> |                   |                           | 1208.2                             |

Elaboración propia con datos de CONABIO, (2017)

En el siguiente mapa, ilustración 9, se muestra la ubicación de las 7 estaciones de la RAMA-ZMVT respecto a los 7 municipios considerados en el análisis de ésta.

**Ilustración 9 Mapa de ubicación de las 7 estaciones de la RAMA-ZMVT**

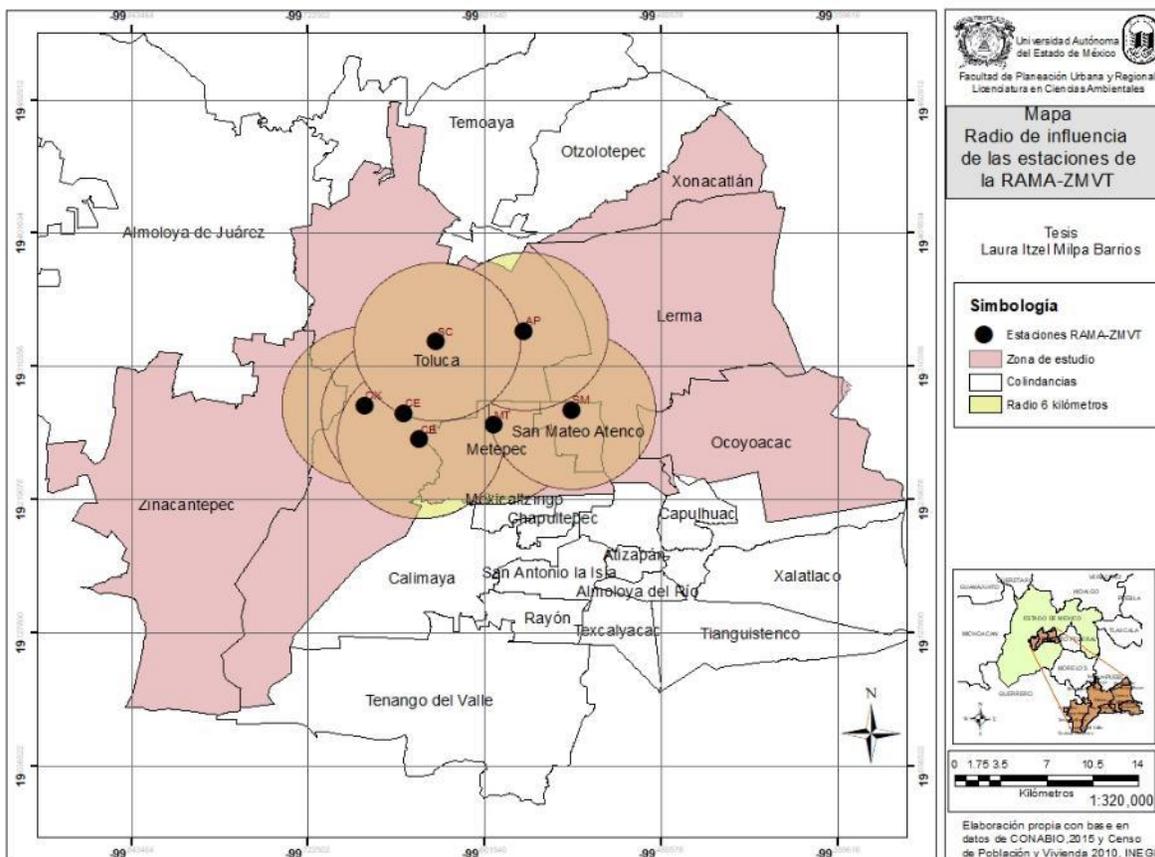


Elaboración propia con datos de CONABIO (2017) e INEGI (2010)

### 3.1.1.1 Influencia geográfica de las estaciones

De acuerdo con la RAMA citada por Domínguez Arce (2015), las estaciones de monitoreo tienen una representatividad espacial que va más allá de su ubicación puntual, en el caso de las estaciones de la RAMA-ZMVT el radio de representatividad es de hasta 6 kilómetros, es decir, que las mediciones de cada una de las estaciones representan el estado de las localidades situadas en este rango de área. En la ilustración 10 se observa el radio de influencia que cada una de las siete estaciones tienen sobre el área geográfica en estudio, representando que estas 7 estaciones, no se ubican dentro de los 7 municipios, y que su área de influencia no logra abarcar de forma significativa parte de ellos.

**Ilustración 10 Radio de influencia de las estaciones de la RAMA-ZMVT**



Elaboración propia con datos de CONABIO (2017) e INEGI (2010)

#### 3.1.1.1.1 Dinámica de vientos

Como se ha demostrado ya, el radio de influencia de las estaciones de la RAMA-ZMVT es ineficiente para la cobertura de los 7 municipios como parte fundamental del área de estudio, por el contrario, es justo dar mención que la atmósfera es un sistema complejo, con entradas y salidas, debido a diversas características meteorológicas y topográficas que influyen en él, dando lugar a la distribución de los contaminantes principalmente por el movimiento de los vientos dentro de la cuenca atmosférica a la que pertenece. Y ya que esta zona está rodeada por grandes sierras y aparatos volcánicos individuales, debido a que se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, que forma parte del Sistema Montañoso de la Sierra Nevada y del sistema montañoso de las Cruces. El volcán Nevado de Toluca ubicado al suroeste funciona de manera determinante en la dinámica del viento del valle, a partir de los sistemas de alta y baja presión generados en la región (Secretaría del Medio Ambiente, 2012).

Según (Domínguez Arce, 2015) y el GEM (2007) citado por (García Chávez & Gómez Hinojos, 2014) la circulación de vientos se ve favorecida durante el año debido a que no está completamente encerrada por barreras naturales, el Valle de Toluca se encuentra en la zona de influencia de los vientos alisios, cuya intensidad se expresa débil y en algunas ocasiones estable en la época fría (finales de noviembre a finales de febrero) predominando los vientos provenientes del sur y con dirección norte, con una curvatura hacia la derecha (sureste) en función al relieve formado por el volcán Nevado de Toluca el cual no permite que los vientos circulen libres desde el sur.

En los meses de marzo a mayo, es decir la época seca-cálida, los vientos se intensifican y modifican su curso por la aceleración de los alisios, influyendo en este caso el sistema de relieve de la Sierra de las Cruces orientada de norte a sur (Domínguez Arce, 2015) y el GEM (2007) citado por (García Chávez & Gómez Hinojos, 2014).

Cerrando el ciclo anual, la máxima expresión de los alisios se presenta durante la época de lluvia, presentando una dinámica que se dirige de este y sureste a noreste y norte, favoreciendo la transportación de contaminantes generados en lugares como las zonas industriales de Lerma (Domínguez Arce, 2015) y el GEM (2007) citado por (García Chávez & Gómez Hinojos, 2014).

El comportamiento del viento con el paso de los años es reflejado en las rosas de los vientos, las cuales hacen notorio que en las zonas consideradas por la RAMA-ZMVT existe una predominancia de los vientos venideros del sur y sureste (Anexo 2 sobre las rosas de los vientos de los años 2011-2016 por estación), donde se evidencia que los contaminantes pueden viajar más allá del área de influencia de las estaciones.

### **3.1.2 Medición de los contaminantes criterios en la RAMA-ZMVT**

Como se ha mencionado, la RAMA-ZMVT es un programa de vigilancia atmosférica y por ello cuenta con metodologías oficiales establecidas como estándares para la medición y análisis de los contaminantes criterio<sup>4</sup> a nivel internacional, siendo estos: el Bióxido De Azufre (SO<sub>2</sub>), Bióxido De Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Ozono (O<sub>3</sub>), Hidrocarburos No Metano y material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), en México, la metodología para la medición del O<sub>3</sub> se encuentra en la NOM-020-SSA1-1993 modificada en el 2014. En la tabla 10 se muestran los parámetros que se miden por la RAMA-ZMVT, las siglas con las que se manejan y sus unidades de medición.

---

<sup>4</sup> Se entiende por contaminantes criterio según la NOM-156-SEMARNAT-2012 como aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población

**Tabla 10 Parámetros medidos por la RAMA y unidad de medida (BDH)**

| Símbolo           | Descripción  | Unidad medida        | Dato no valido |
|-------------------|--|----------------------|----------------|
| PM <sub>10</sub>  | Partículas suspendidas fracción respirable PM <sub>10</sub>  | (µg/m <sup>3</sup> ) | -9999          |
| PM <sub>2.5</sub> | Partículas suspendidas fracción respirable PM <sub>2.5</sub> | (µg/m <sup>3</sup> ) | -9999          |
| O <sub>3</sub>    | Ozono  | (ppm)                | -9.999         |
| NO <sub>2</sub>   | Bióxido De Nitrógeno   | (ppm)                | -9.999         |
| CO                | Monóxido De Carbono  | (ppm)                | -99.99         |
| SO <sub>2</sub>   | Bióxido De Azufre  | (ppm)                | -9.999         |
| TMP               | Temperatura ambiente   | (°C)                 | -99.9          |
| HR                | Humedad relativa   | (%)                  | -999           |
| DV                | Dirección del viento   | (°A)                 | -999           |
| VV                | Velocidad del viento   | (m/s)                | -99.9          |
| PC                | Precipitación pluvial  | (mm)                 | -99.9          |
| PA                | Presión atmosférica  | (mmHg)               | -999           |
| RS                | Radiación solar total  | (W/m <sup>2</sup> )  | -9999          |

Elaboración propia con datos de la RAMA (2014)

Estos contaminantes vigilados por la RAMA-ZMVT son descritos a continuación y se enlistan las estaciones en las que son monitoreados conforme a RAMA (2014) en la tabla 11:

- ✚ Partículas suspendidas Totales (PST), menores a 10 Micras (PM<sub>10</sub>) y menores a 2.5 Micras (PM<sub>2.5</sub>): El tamaño es el parámetro más importante de las partículas en términos de su comportamiento y, por lo tanto, de su distribución en la atmósfera; mientras más pequeñas sean las partículas pueden penetrar directamente al interior de los pulmones con efectos tóxicos.
- ✚ Ozono: Es un gas que ocurre tanto en la atmósfera superior de la Tierra como a nivel del suelo. El O<sub>3</sub> puede ser bueno o malo, dependiendo de dónde se encuentra en la atmósfera:
- ✚ Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>): Gas precursor del Ozono troposférico y responsable de la lluvia ácida; causa problemas de visibilidad y origina que en el horizonte los objetos se aprecien de color amarillo pálido o café rojizo.

- ✚ Monóxido de Carbono (CO): Gas incoloro e inodoro típicamente urbano, que se forma cuando un combustible que contiene carbono no se quema completamente.
- ✚ Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>): Gas que reacciona catalíticamente o de forma fotoquímica en fase gaseosa con otros gases contaminantes para producir Trióxido de Azufre, Ácido Sulfúrico, sulfitos y sulfatos.

**Tabla 11 Parámetros monitoreados en las estaciones de la RAMA-ZMVT**

| Parámetro monitoreado           | OX | CE | MT | SL <sup>5</sup> | CB <sup>6</sup> | SM | AP | SC    |
|---------------------------------|----|----|----|-----------------|-----------------|----|----|-------|
| <b>Contaminantes criterio</b>   |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| PM10                            |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| PM2.5 <sup>7</sup>              |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| O <sub>3</sub>                  |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| NO <sub>2</sub>                 |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| CO                              |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| SO <sub>2</sub>                 |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| <b>Variables meteorológicas</b> |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| TMP                             |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| HR                              |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| DV                              |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| VV                              |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| PC <sup>8</sup>                 |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| PA                              |    |    |    |                 |                 |    |    |       |
| RS                              |    |    |    |                 |                 |    | 9  | (e)10 |

Elaboración propia con datos de la RAMA (2014)

5 Dejó de operar a finales del año 2010

6 Inicia a operar en el año 2011

7 El parámetro (PM2.5) se mide a partir del 2011

8 El parámetro (PC) se mide en todas las estaciones a partir del 2011

9 El sensor se cambia de la estación AP a la estación SC a finales de febrero (25) y principios de marzo (10) 2014

10 El sensor se cambia de la estación AP a la estación SC a finales de febrero (25) y principios de marzo (10) 2014

# 4 Marco normativo

## **4.1 Marco normativo internacionales sobre el Ozono**

Las preocupaciones sobre la destrucción de la Capa de O<sub>3</sub> de la estratósfera debido a la acción de los CFC y otras sustancias de origen antropogénico surgieron a principios de los años setenta (Vega, 2010), algunos científicos como Mario Molina, advirtieron que era un problema grave que habría de ser tratado; a continuación se hace mención de algunos de los más relevantes tratados, convenios y programas firmados por México para el cuidado y control del O<sub>3</sub>.

### **4.1.1 Convenio de Viena**

Las acciones globales y negociaciones intergubernamentales en cuestión del cuidado de los gases desgastadores y precursores del Ozono iniciaron en 1981, las cuales concluyeron con el Convenio de Viena para la Protección de la capa de O<sub>3</sub> el 22 de marzo de 1985 (Secretaría del Ozono, 2001). Este convenio tuvo como principal objetivo establecer mecanismos de cooperación en investigación y la observación sistemática de la capa de O<sub>3</sub>, así como establecer controles y la posterior eliminación de las SAO, sobre todo los CFC, convirtiéndose en el precursor del Protocolo de Montreal (Centro Mario Molina, 2012).

El convenio de Viena se enmarca en la particularización de la obligación del Principio 21 de la Declaración de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, el cual establece que “de conformidad con la Carta de las Naciones Unidas y con los principios del derecho internacional, los Estados tienen el derecho soberano de explotar sus propios recursos en aplicación de su propia política ambiental y la obligación de asegurar que las actividades que se lleven a cabo dentro de su jurisdicción o bajo su control no perjudiquen al medio de otros estados o zonas situadas fuera de toda jurisdicción nacional; el convenio consta de 21 Artículos y dos anexos en donde por primera vez se hizo frente a un problema ambiental mundial por medio del principio precautorio (Vega, 2010).

#### **4.1.2 Protocolo de Montreal**

El 16 de septiembre de 1987 se adoptó el Protocolo de Montreal sobre las Sustancias que Agotan la Capa de O<sub>3</sub>, el cual entró en vigor el 1 de enero de 1989 (Secretaría del Ozono, 1999), este protocolo tuvo como objeto establecer los mecanismos que se debían implementar para limitar la producción y el consumo de las sustancias que agotan la capa de O<sub>3</sub>, considerando medidas de control para cinco CFC y tres Halones, enlistando y estableciendo categorías según el grado de incidencia en el problema y mecanismos para el reporte de datos de consumo de estas sustancias, prohibiendo también su comercio (Vega, 2010).

Para estos fines, México fue uno de los principales promotores del Protocolo y fue el primer país en ratificar a dicho instrumento el 31 de marzo de 1988. Asimismo, fue el primer país en presentar un calendario de reducción a fin de llegar al 10% de reducción para el año 2000, lo cual representa 10 años menos que el resto de los países en desarrollo; metas que ha cumplido completamente (Centro Mario Molina, 2012).

#### **4.1.3 Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático**

La Convención Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMCC), se adoptó en 1992 en Nueva York, fue firmada durante la Cumbre de la Tierra en Rio de Janeiro y entró en vigor en 1994 (Naciones Unidas, 1992). Su objetivo, mencionado en su Art. 2º es estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera, a un nivel que impida efectos peligrosos en el sistema climático, reconociendo que el sistema climático es un recurso compartido cuya estabilidad puede verse afectada por actividades industriales y de otro tipo que emiten CO<sub>2</sub> y otros gases que retienen el calor (Benavides Ballesteros & León Aritzabal, 2007) y (CECONT, Equipo Técnico de Gases de Efecto Invernadero, 2007), enlistando así objetivos específicos como:

- ✚ Permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al CC.
- ✚ Asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada.
- ✚ Permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

#### 4.1.4 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto sobre el Cambio Climático (Naciones Unidas, 1998) es un acuerdo internacional que tiene como objetivo reducir las emisiones de GEI un 5.2% en comparación con los niveles del año 1990, durante un periodo de compromiso comprendido entre los años 2008 y 2012 (Galante Marcos, 2011). En él se reconoce que el sistema climático es un recurso compartido cuya estabilidad puede verse afectada por actividades industriales y de otro tipo que emiten CO<sub>2</sub> y otros gases que retienen el calor (Benavides Ballesteros & León Aritizabal, 2007).

Los GEI regulados por el Protocolo de Kioto son: Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), Hidrofluorocarbonos (HCF), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>) (Galante Marcos, 2011).

El Protocolo de Kioto surgió en 1997 como un instrumento de la Convención para los países desarrollados y las economías en transición, en él no se establecieron metas cuantificables de reducción de emisiones, pero si compromisos como la elaboración de inventarios nacionales de emisiones, comunicaciones nacionales, estudios de mitigación y adaptación al CC. México firmó el protocolo éste mismo año y lo ratificó como país No. Anexo I. Hasta el 2014, 192 países ratificaron aceptando el protocolo (SEMARNAT, 2014).

#### 4.1.5 NAAQS, Estados Unidos

Estados Unidos cuenta con una Ley de Aire Limpio en donde requiere que la Agencia de Protección al Ambiente por sus siglas en inglés EPA, establezca Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS, también por sus siglas en inglés, National Ambient Air Quality Standards), para los contaminantes considerados dañinos para la salud pública y el medio ambiente. Esta ley identifica dos tipos de normas nacionales de calidad del aire, la primeras son las normas primarias brindan protección de salud pública, incluida la protección de la salud de poblaciones “sensibles” como la población con problema de asma, los niños y ancianos, y los segundos, los estándares secundarios que brindan protección de bienestar público, incluida la protección contra la disminución de la visibilidad y el daño a los animales, cultivos, vegetación y edificios, dichas normas han establecido estándares nacionales de calidad para seis contaminantes considerados criterio como CO, Pb, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM (2.5 y 10) y SO<sub>2</sub> (EPA, 2017)

A continuación, se hace mención sólo a los estándares establecidos para el O<sub>3</sub>

**Tabla 12 NAAQS para el O<sub>3</sub>**

| <b>Contaminante</b>  | <b>Tiempo de exposición</b> | <b>Concentración</b> | <b>Indicaciones</b>  |
|----------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| <b>O<sub>3</sub></b> | 8 horas                     | 0.070 ppm            | Concentración anual máxima de 8 horas, la cuarta más alta, promediada en 3 años. |

Elaboración propia con datos de EPA (2017).

## 4.2 Normatividad Nacional

La normatividad mexicana cuenta con instrumentos jurídicos que permiten prevenir y controlar la contaminación atmosférica y el cambio climático. En México la normatividad ambiental encuentra su base en la Constitución Política, de esta se derivan las diversas leyes, reglamentos y normas que rigen el país. Las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs), son el instrumento jurídico que obliga al cumplimiento de las especificaciones determinadas por la autoridad federal. En materia de calidad del aire, la normatividad está a cargo particularmente por la Secretaría de Salud, y por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Ambas secretarías han desarrollado NOMs enfocadas a la protección de la salud de la población y a la medición de los contaminantes (INECC, 2016).

### 4.2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de febrero de 1917, reformada el DOF 29 de enero de 2016, hace mención sobre el cuidado del medio ambiente y la facultad de ciertos organismos públicos para hacer respetar lo dispuesto respecto a legislación ambiental (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1917).

✚ “Art. 4 ° *Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado Garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.*” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1917).

✚ “Art. 27° que establece el régimen de los recursos naturales. La propiedad de las Tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, el cual ha tenido y tiene derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la

propiedad privada.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1917).

- ✚ “Art. 73° de la sección III, fracción XXIX de las facultades del Congreso para establecer contribuciones, inciso G. Para expedir leyes que establezcan la ocurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de las entidades federativas, de los Municipios y, ..., en el ámbito de sus respectivas competencias en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1917).

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

La LGEEPA es una ley de aplicación nacional, fue publicada el 28 de enero de 1988 en el DOF. Consta de cinco títulos en los que se disponen bases para el desarrollo sustentable, enfocados en garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar, preservando, restaurando y mejorando el medio ambiente (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012)

En su Título Primero, Capítulo I; se mencionan las disposiciones generales de aplicación de esta ley.

- ✚ “Art 1°. la presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refiere a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección del ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:
  - I. Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar.

- II. Definir la preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente.
- VI. La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012)

En su Título Cuarto, protección al ambiente, Capítulo I, disposiciones generales señala las obligaciones de los diferentes niveles de gobierno de integrar un registro, con la información pertinente, de emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo. Tales señalamientos se mencionan a continuación:

✚ “Art 109 BIS. La Secretaría, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, deberán integrar un registro de emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, materiales y residuos de su competencia, así como de aquellas sustancias que determine la autoridad correspondiente. La información del registro se integrará con los datos y documentos contenidos en las autorizaciones, cédulas, informes, reportes, licencias, permisos y concesiones que en materia ambiental se tramiten ante la Secretaría, o autoridad competente del Gobierno del Distrito Federal, de los Estados, y en su caso, de los Municipios.

Las personas físicas y morales responsables de fuentes contaminantes están obligadas a proporcionar la información, datos y documentos necesarios para la integración del registro. La información del registro se integrará con datos desagregados por sustancia y por fuente, anexando nombre y dirección de los establecimientos sujetos a registro.

La información registrada será pública y tendrá efectos declarativos. La Secretaría permitirá el acceso a dicha información en los términos de esta Ley y demás disposiciones jurídicas aplicables y la difundirá de manera proactiva.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012).

El capítulo dos del Título IV, Prevención y Control de la contaminación de la Atmósfera, señala que la calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país, debiendo así reducir y controlar las emisiones de contaminantes a la atmósfera, dichas disposiciones se mencionaran continuación.

✚ “Art. 110.- Para la protección a la atmósfera se considerarán los siguientes criterios:

- I. La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país; y
- II. Las emisiones de contaminantes de la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012)

✚ “Art 112.- En materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, de conformidad con la distribución de atribuciones establecida en los artículos 7o., 8o. y 9o. de esta Ley, así como con la legislación local en la materia: Párrafo reformado DOF 13-12-1996

- I.- Controlarán la contaminación del aire en los bienes y zonas de jurisdicción local, así como en fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, comerciales y de servicios, siempre que no estén comprendidos en el artículo 111 BIS de esta Ley; Fracción reformada DOF 13-12-1996.
- II.- Aplicarán los criterios generales para la protección a la atmósfera en los planes de desarrollo urbano de su competencia, definiendo las zonas en que sea permitida la instalación de industrias contaminantes; Fracción reformada DOF 13-12-1996.
- III.- Requerirán a los responsables de la operación de fuentes fijas de jurisdicción local, el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes, de conformidad con lo dispuesto en el reglamento de la presente Ley y en las normas oficiales mexicanas

respectivas.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012).

La LGEEPA ha sido incorporada a este capítulo debido a que es la máxima ley de derecho ambiental en México que regula lo relativo al 4° párrafo del artículo 4to de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, siendo esta la base para todas las normas y reglamentos que se mencionan.

#### **4.2.3 Ley General de Cambio Climático (LGCC)**

La LGCC publicada en el DOF el día 6 de junio del 2012, reformada por última vez el primero de enero de junio de 2016 consta de nueve títulos en dónde se busca regular y ordenar las políticas públicas de adaptación y mitigación al cambio climático implementadas en el país (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión , 2016)

El Título Primero, denominado disposiciones federales, señala los objetivos de garantizar el derecho a un medio ambiente, seguido por definiciones de entendimiento en la ley;

🚦 “Art. 2°. Esta ley tiene por objeto:

- I. Garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero;
- II. Regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático considerando en su caso, lo previsto por el Art 2°. de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y demás disposiciones derivadas de la misma;

- III. Regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático;
- VII. Promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión , 2016).

En el título segundo, distribución de competencias, tal como su nombre lo indica, se establecen las atribuciones que cada nivel de gobierno debe ejercer, en conformidad con la distribución de competencias.

- ✚ “Art. 5°. La federación, las entidades federativas, el Distrito Federal y los municipios ejercerán sus atribuciones para la mitigación y adaptación al cambio climático, de conformidad con la distribución de competencias prevista en esta ley y en los demás ordenamientos legales aplicables.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión , 2016).

#### **4.2.4 NOM-156-SEMARNAT-2012**

Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire, tiene como objetivo especificar las condiciones mínimas que deben ser observadas para el establecimiento y operación de sistemas de: monitoreo de la calidad del aire y de muestreo de contaminantes atmosféricos, su campo de aplicación va para aquellas zonas o centro de población que sean, asentamientos humanos con más de 500 mil habitantes, zonas metropolitanas, asentamientos humanos con emisiones superiores a 20 mil toneladas anuales de contaminantes criterio primarios a la atmósfera, conurbaciones y actividades industriales (SEMARNAT, 2012).

En el apartado seis de la NOM se dan a conocer las especificaciones para el diseño de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

- ✚ “6. Diseño de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire

- 6.1 En el diseño de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire se realizarán las siguientes actividades:
  - 6.1.1. Establecer los objetivos del monitoreo de la calidad del aire y del muestreo de contaminantes atmosféricos, y de calidad de los datos;
  - 6.1.2. Definir los contaminantes a muestrear y monitorear en cada estación, en función de los objetivos del sistema. Para definir los contaminantes a muestrear y monitorear, y para ubicar cada estación, se realizan los estudios o trámites necesarios para obtener información de apoyo.
  - 6.1.5. Determinar la escala de representatividad espacial de cada estación de muestreo y monitoreo;
  - 6.1.6. Determinar el número de estaciones necesarias para cumplir con el o los objetivos planteados de muestreo y monitoreo de la calidad del aire;
  - 6.1.7. Determinar la ubicación y el tipo de estación o estaciones de muestreo y monitoreo con base en los objetivos planteados.” (SEMARNAT, 2012).

#### **4.2.5 NOM-020-SSA1-2014**

La NOM-020-SSA1-2014. Salud ambiental. “Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de Ozono (O<sub>3</sub>) de la calidad del aire ambiente. Criterio para evaluar la calidad del aire”, como medida de protección a la salud de la población. Señala las especificaciones en cuanto a las concentraciones de Ozono, como contaminante atmosférico (Secretaría de Salud, 2014).

En el apartado cinco de la presente norma se mencionan dos valores para efectos de protección a la salud de la población más susceptible enlistados a continuación a la letra:

## 5. Especificaciones

- 5.1 Se establecen 2 valores límite para las concentraciones ambientales del O<sub>3</sub> para efecto de la protección a la salud de la población más susceptible.
  - 5.1.1. La concentración de O<sub>3</sub>, debe ser menor o igual a 0.095 ppm, promedio horario, calculado como se especifica en el punto 5.2 de la misma norma, el cual nunca deberá ser rebasado.
  - 5.1.2. La concentración del promedio móvil de ocho horas de O<sub>3</sub>, debe ser menor o igual a 0.070 ppm, tomado como el máximo en un periodo de 1 año calendario, calculado como se especifica en el punto 5.2 de esta Norma.” (Secretaría de Salud, 2014).
- “5.2 Manejo de datos. En este punto se describe el manejo de los datos para determinar el cumplimiento de la norma mexicana para el ozono en el aire ambiente, en cada uno de los sitios de monitoreo, empleando los métodos descritos en la Norma NOM-036-ECOL-1993.
  - 5.2.1. Cálculo del promedio de una hora para el límite de 0.110 ppm. Para cada sitio de monitoreo el valor de la concentración horaria de ozono se reportará en partes por millón. El valor del promedio horario se considerará como válido cuando se calcule con al menos 75% de la hora (45 minutos).
  - 5.2.2 Cálculo del promedio de ocho horas para el límite de 0.070 ppm. Para cada sitio de monitoreo el valor de la concentración horaria de ozono se reportará en partes por millón hasta la tercera cifra decimal. Para obtener el valor de ocho horas se promediarán los valores horarios de las ocho horas previas continuas, registrando el resultado en la última hora promediada. Este cálculo se aplicará a cada una de las horas del día”. (Secretaría de Salud, 2014).

En conclusión, del presente capítulo, existe normatividad de régimen nacional tanto como internacional que contienen discrepancias en los límites permisibles resumidos en la tabla 13.

**Tabla 13 Normas de calidad del aire de la OMS, EUA y México**

| Contaminante   | Tiempo de exposición | OMS       | EPA   | México |
|----------------|----------------------|-----------|-------|--------|
|                |                      | LMP (ppm) |       |        |
| O <sub>3</sub> | 1 hora               | 0.080     | 0.120 | 0.095  |
|                | 8 horas              | 0.060     | 0.070 | 0.070  |

Elaboración propia con datos de Molina y Molina (2005), Reyes Cervantes H. J., (2008) y Secretaría de Salud (2014).

Cabe resaltar que los límites mexicanos en comparación con los de la OMS son menos juiciosos, aunque en comparación con los de la EPA son, por poco, más estrictos.

# 5 Resultados

Para la obtención de los resultados de la presente investigación fue preciso analizar el comportamiento de los datos del O<sub>3</sub> y la temperatura, por lo que fueron analizados en primera instancia por separado de la siguiente manera; para la temperatura se sacaron los valores máximos y mínimos registrados por horas y meses, al igual que los promedios (suma de los valores entre el total de los valores) por días y meses de los seis años en estudio, la línea de referencia para mostrar la variabilidad de temperatura se sacó del promedio total de los seis años de todos los valores válidos, dando un total de 13.88 °C.

Para el caso del O<sub>3</sub>, se analizaron por cada uno de los seis años, de las siete estaciones por promedios horarios y mensuales, al igual que los registros máximos por los mismos intervalos de tiempo identificando los valores en los que se rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-020-SSA1-2014, siendo estos 0.070 ppm para el promedio móvil y de 0.095 ppm para el horario.

Por último, los datos se abordaron por todos los años por meses y por estaciones, esto para contrastar el comportamiento conjunto entre la temperatura y el O<sub>3</sub> durante el periodo de tiempo estudiado, así como el número de días en el que la norma de las concentraciones de Ozono del 2014 fue rebasada.

Para finalizar se tomaron los promedios de todos los datos de O<sub>3</sub> y temperatura por meses y por horas para usar la ecuación de la correlación de Pearson.

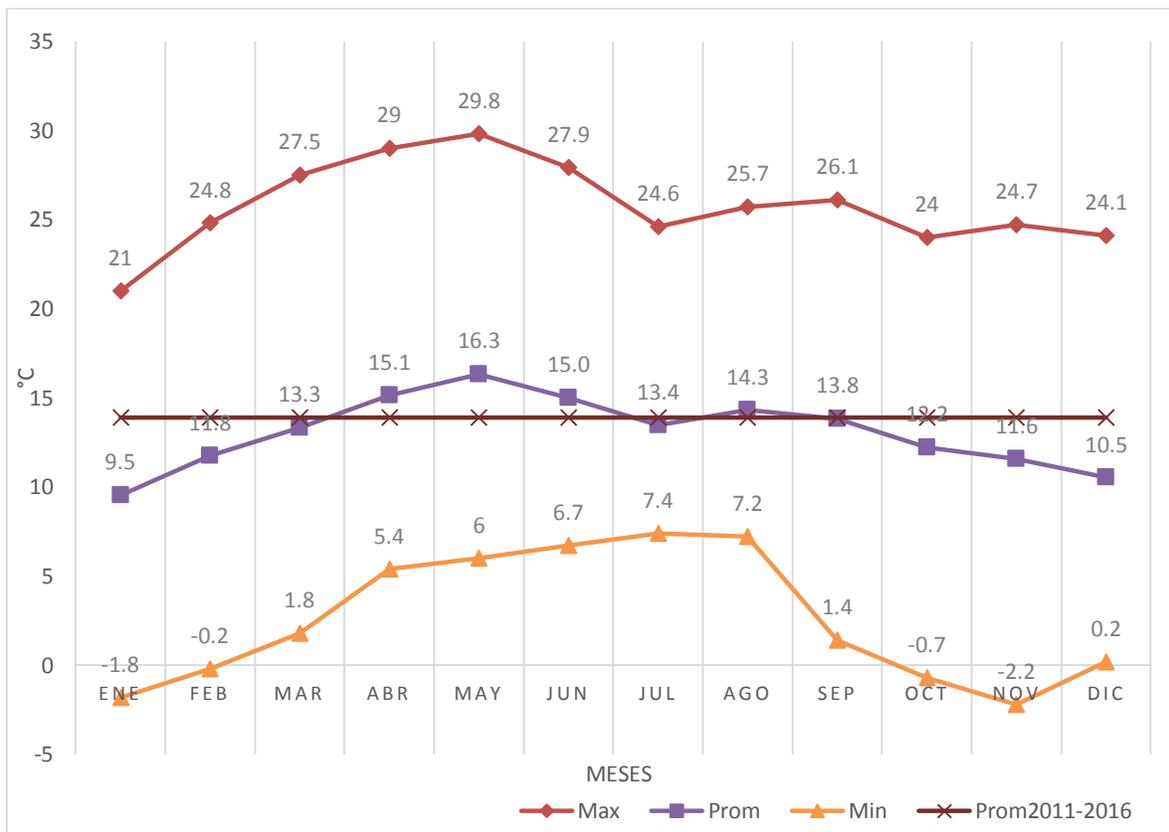
## 5.1 Análisis por año de las variables

### 5.1.1 Análisis año 2011

#### 5.1.1.1 Temperatura por mes año 2011

Los meses con mayores registros de temperatura son los meses correspondientes a la primavera, es decir, abril y mayo, y del verano el mes de junio para las tres mediciones; el dato máximo del año 2011 se presentó en mayo con 29.8 °C, por el contrario, el dato mínimo se encontró en noviembre con -2.2 °C, siendo este junto con los meses de octubre, diciembre, enero y febrero los meses más fríos correspondientes a las estaciones de otoño e invierno respectivamente.

Gráfica 1 Temperatura por mes año 2011

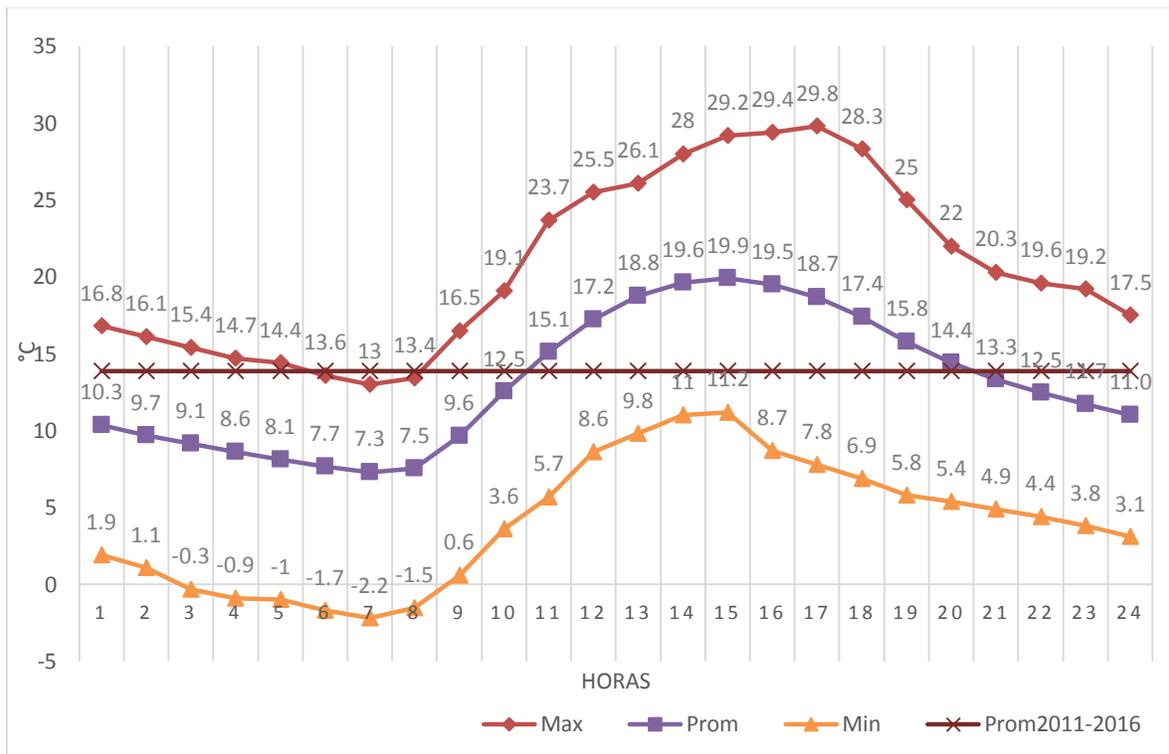


A su vez, en los promedios se puede observar que los datos fluctúan cerca de la línea del promedio de los 6 años y que estos se mantienen por en medio de los datos mínimos y máximos de la gráfica.

5.1.1.2 Temperatura por hora año 2011

El comportamiento horario de la temperatura, como se mencionó en el capítulo primero, depende en su totalidad de la incidencia de rayos a la superficie terrestre. Por lo que las horas en las que se presentaron los valores máximos son aquellas en las que existe actividad solar, es decir que para el año 2011 estas horas fueron de entre las 12 a las 19 horas del día, con la máxima de 29.8 a las 17.

Gráfica 2 Promedio de temperatura por hora año 2011

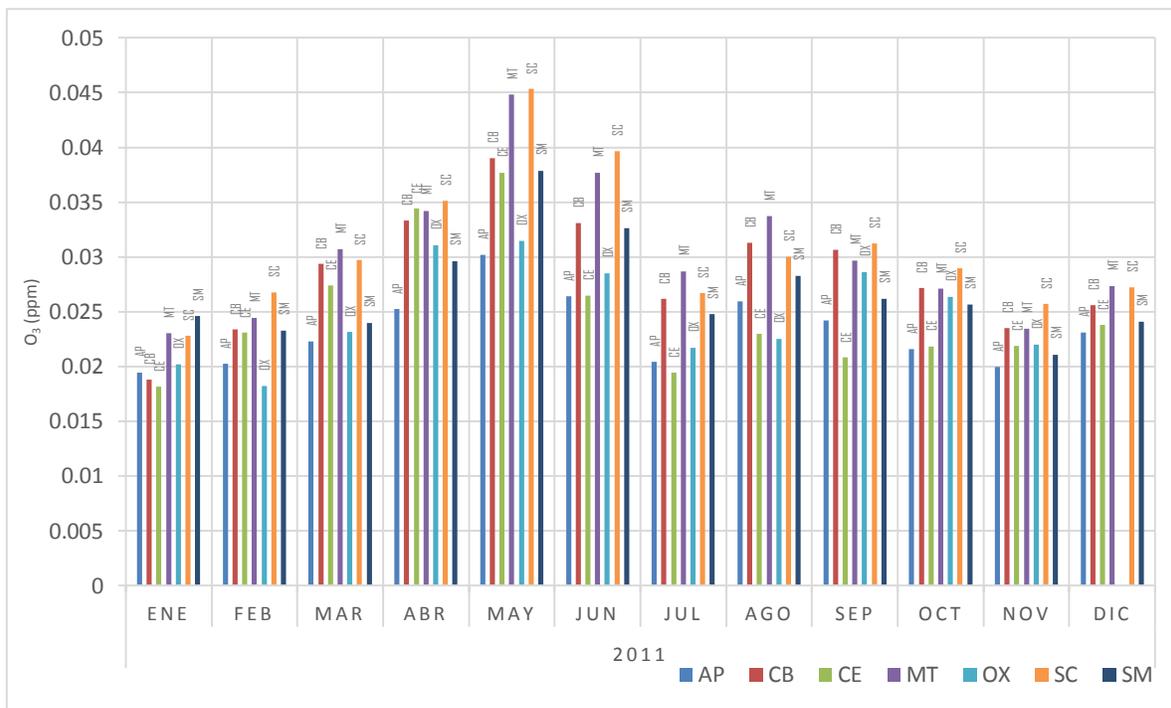


Por el contrario, las horas con la menor actividad solar fueron de entre las 2 a las 9 de la mañana, con un valor mínimo de -2.2 a la hora 7.

**5.1.1.3 Concentraciones de O<sub>3</sub> año 2011**

Los meses que presentan los promedios más altos de las concentraciones de O<sub>3</sub> en el año 2011 son abril con un promedio entre 0.030 ppm en la estación aeropuerto a 0.035 ppm la estación San Cristóbal, en segundo lugar, está el mes de junio con un rango de 0.026 ppm en las estaciones aeropuerto y Ceboruco a 0.039 ppm en San Cristóbal, y en primer lugar se encuentra mayo con un rango de 0.030 ppm en Aeropuerto a 0.045 ppm en San Cristóbal, demostrando que estos valores coinciden con los meses de primavera y verano en los que al igual que el O<sub>3</sub> se presentó mayor temperatura.

**Gráfica 3 Promedio de concentraciones de O<sub>3</sub> año 2011**

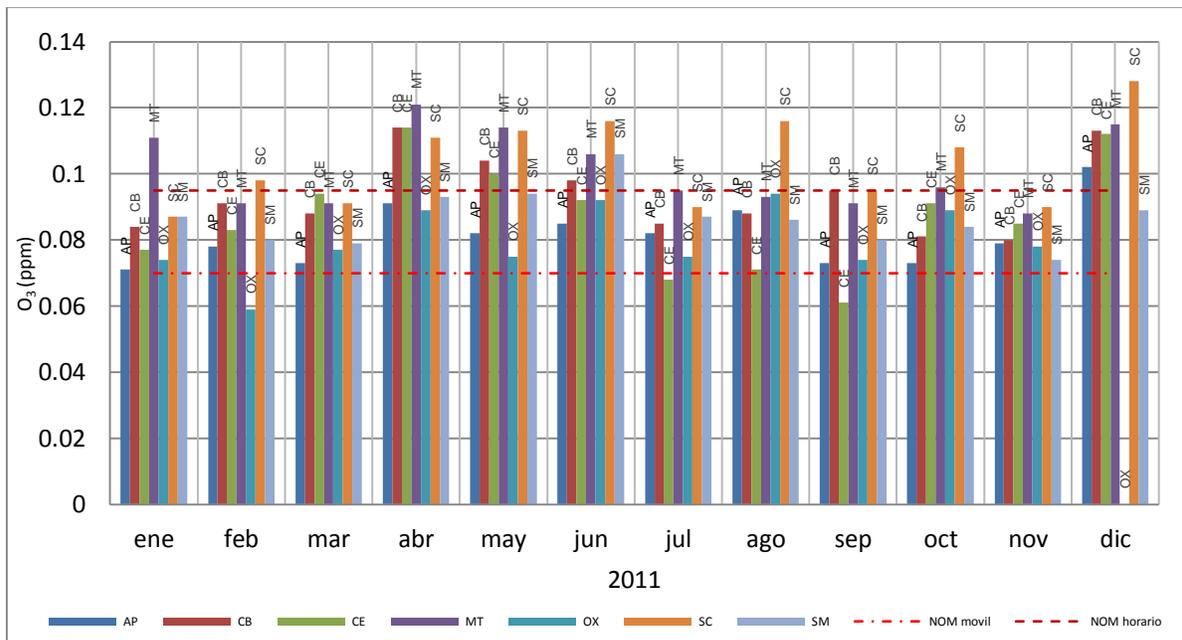


También se puede ver que las estaciones con los promedios más altos a lo largo del año son San Cristóbal. Metepec y Ceboruco, en contraste, la estación con los promedios más bajos es Oxtotitlán.

5.1.1.4 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes del año 2011

En la siguiente gráfica número 5 puede observarse que las concentraciones máximas registradas para el año 2011 por mes superan el Límite Máximo Permissible (LMP), representados por las líneas punteadas rojas, de las concentraciones de O<sub>3</sub> establecido por la NOM-020-SSA1-2014, los valores que rebasan el LMP horario pertenecen a los meses de abril, mayo, junio, coincidiendo, también, con lo mostrado en las gráficas anteriores de O<sub>3</sub> y temperatura.

Gráfica 4 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes del año 2011



Por ejemplo, en abril se obtuvo un máximo en la estación Metepec de 0.121 ppm y 0.114 ppm en las estaciones Ceboruco y Centro, en mayo la estación Metepec registró un máximo de 0.114 ppm, en San Cristóbal un máximo de 0.113 ppm y

0.104 ppm en Ceboruco. En junio se presentaron niveles máximos de 0.116 ppm en San Cristóbal, y 0.106 en Metepec y San Mateo.

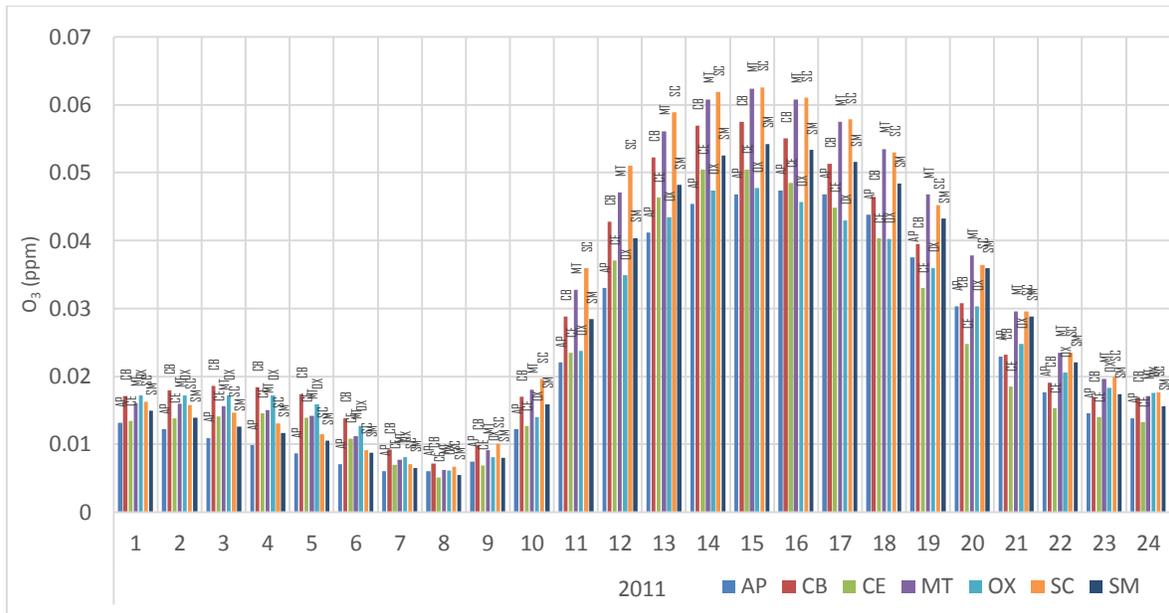
Diciembre, como puede observarse, es un mes que sale del comportamiento de las gráficas anteriores, ya que mostró valores altos principalmente en la estación de SC; este valor corresponde a 0.128 ppm en el día 04 del mes, resaltando que en este día no se presenta ninguna festividad que justifique los altos niveles de O<sub>3</sub>. De igual forma, en el mes de enero se presentó un máximo de 0.111 ppm en la estación Metepec.

#### *5.1.1.5 Concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2011*

Las horas que presentan un aumento de las concentraciones de O<sub>3</sub> en el día son las horas de entre las 12:00 a las 19:00 horas, siendo las horas con concentraciones pico de 14:00 a 16:00 horas, con un rango que va desde las 0.045 ppm en la estación aeropuerto a 0.061 ppm en San Cristóbal para la hora 14, de 0.046 para Aeropuerto a 0.062 ppm para San Cristóbal y Metepec en la hora 15, y 0.045 ppm para Oxtotitlán a 0.61 ppm para Metepec y San Cristóbal en la hora 16.

Las estaciones con más concentraciones de O<sub>3</sub> a lo largo del día son Ceboruco, Metepec y San Cristóbal, por el contrario de la estación Centro que se mantiene por debajo de las demás.

**Gráfica 5 Promedio de las concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2011**

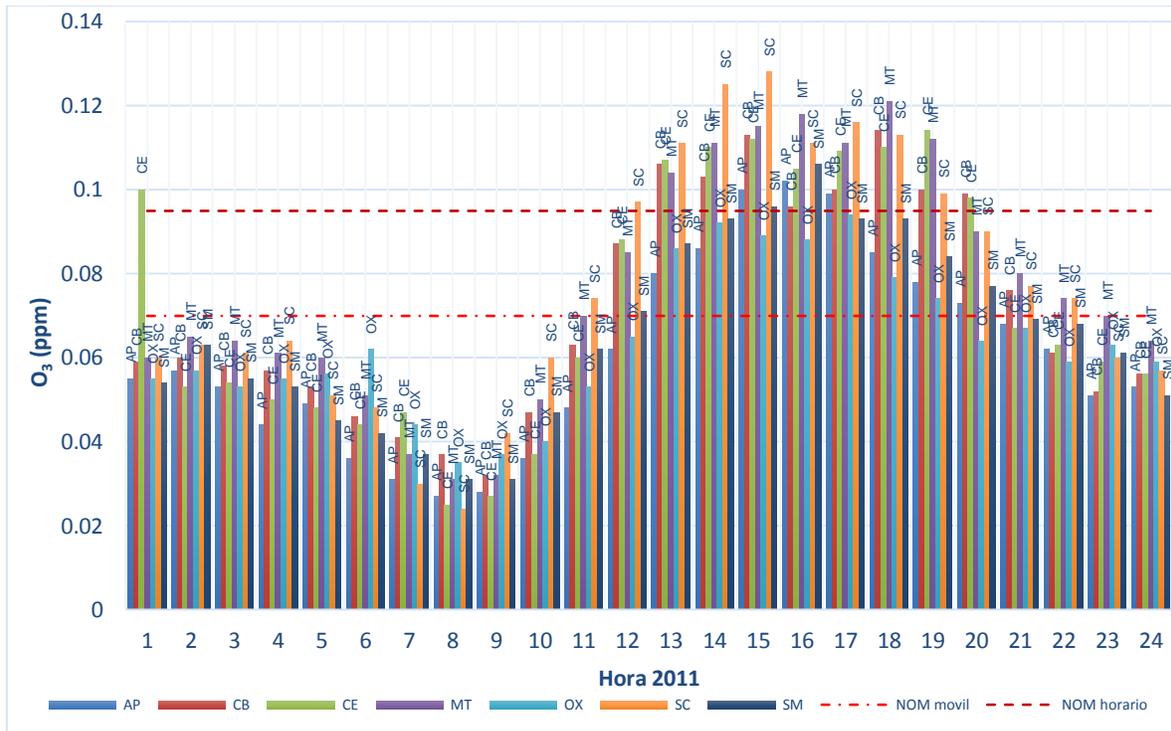


**5.1.1.6 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2011**

Las horas que presentan los niveles máximos en las concentraciones de O<sub>3</sub> en el día son las horas de entre 12:00 a las 20:00 horas, siendo las concentraciones pico de las 14:00 a 16 horas con un rango que va desde las 0.086 ppm en la estación aeropuerto a 0.125 ppm en San Cristóbal para la hora 14, de 0.089 para Oxtotitlán a 0.128 ppm para San Cristóbal en la hora 15 y 0.088 ppm para Oxtotitlán a 0.118 ppm para Metepec.

A su vez, las horas con los máximos más bajos son las horas de entre 7:00 a 10:00, donde se mantienen dentro de los LMP con concentraciones que van de 0.03 en San Cristóbal a 0.047 ppm en Centro para la hora 7, de 0.024 ppm de SC a 0.037 ppm en CB para la hora 8, de 0.027 ppm en CE a 0.042 ppm en SC en la hora 9 y de 0.036 ppm en AP a 0.06 ppm en SC.

**Gráfica 6 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2011**



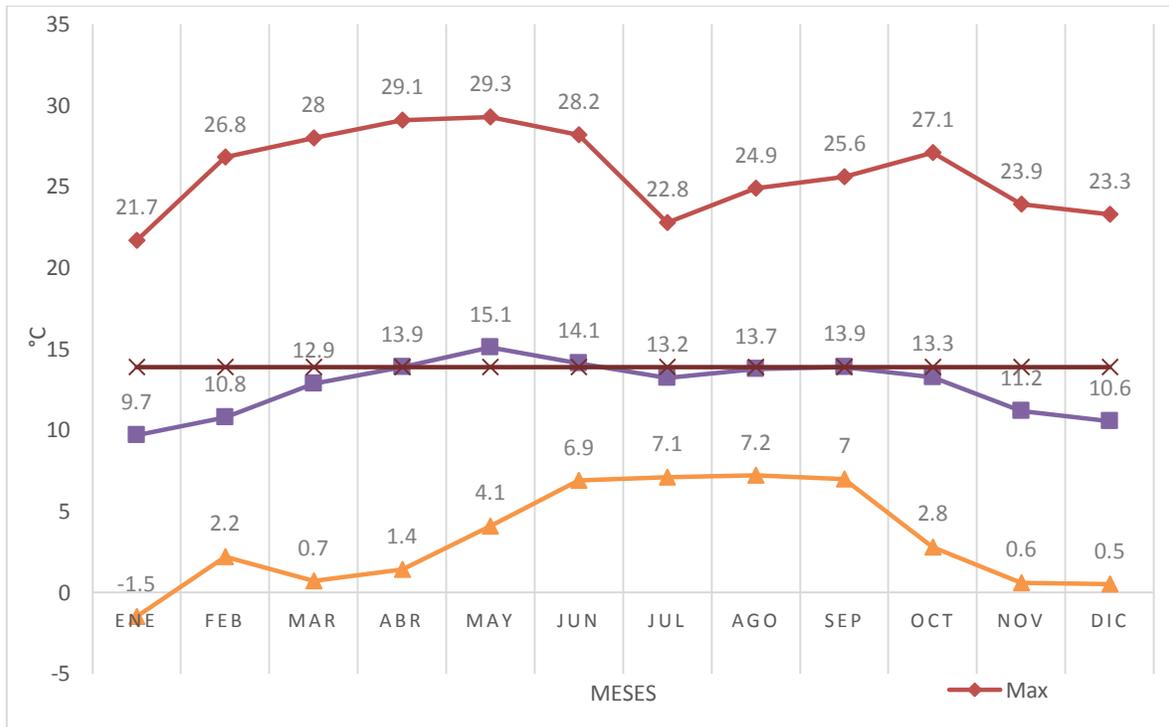
Aeropuerto, Oxtotitlán y Ceboruco son las estaciones con máximos menores al resto de las estaciones, al contrario de éstas, las estaciones con los valores más altos durante el día son las estaciones de San Cristóbal y Metepec.

### 5.1.2 Análisis año 2012

#### 5.1.2.1 Temperatura año 2012

En el 2012 los meses con mayores temperaturas se presentaron desde marzo a junio, cubriendo con la primavera y parte del verano, para este caso el dato máximo se presentó en mayo con 29.3°C, por el contrario, el dato mínimo se encontró en enero con -1.5°C que junto con noviembre y diciembre son los meses, de invierno, más fríos.

**Gráfica 7 Promedio de temperatura por mes año 2012**



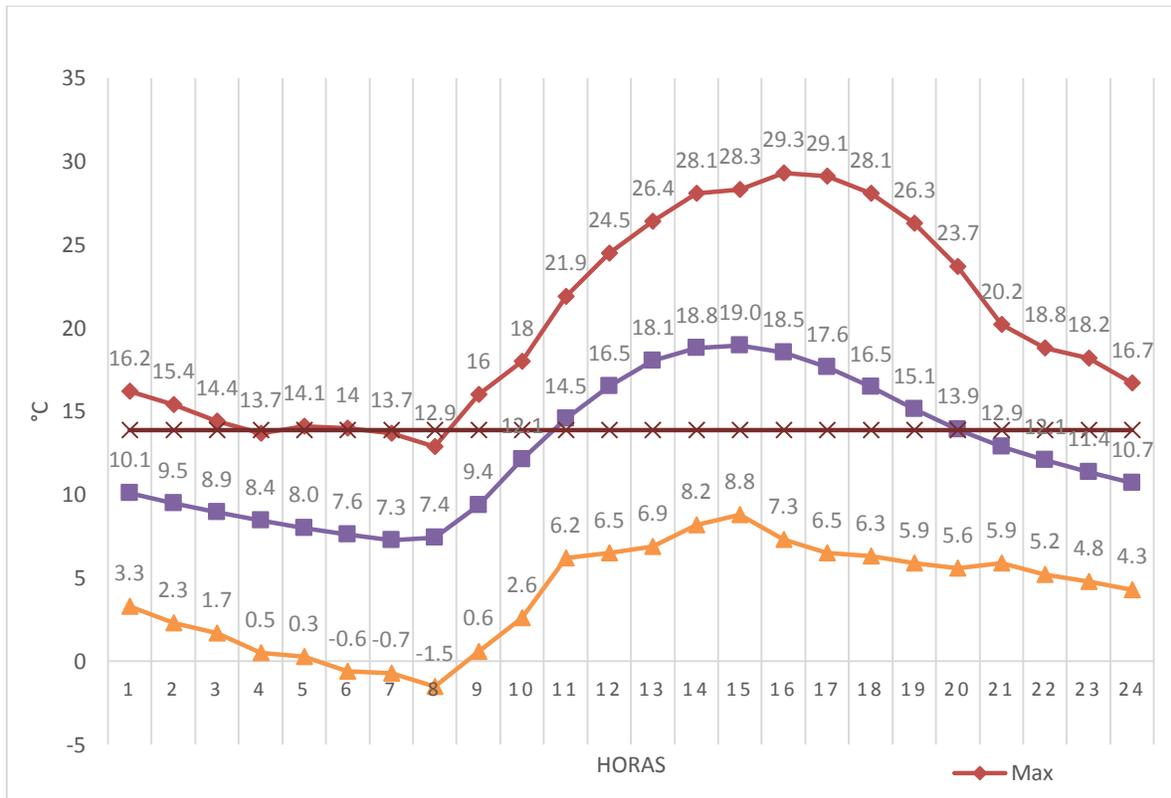
A su vez, en los promedios se puede observar que los datos fluctúan cerca de la línea del promedio de los 6 años y que estos se mantienen por en medio de los datos mínimos y máximos de la gráfica.

#### 5.1.2.2 Temperatura por hora año 2012

Las horas registradas con la mayor presencia de temperatura durante el año 2012 se presentan entre las 12 a 19 horas del día, con la máxima de 29.3 a la hora 16.

Por el contrario, las horas con la menor actividad solar durante el día fueron de entre las 2 a las 9 de la mañana, con un valor mínimo de -1.5 a la hora 8.

**Gráfica 8 Temperatura por hora año 2012**

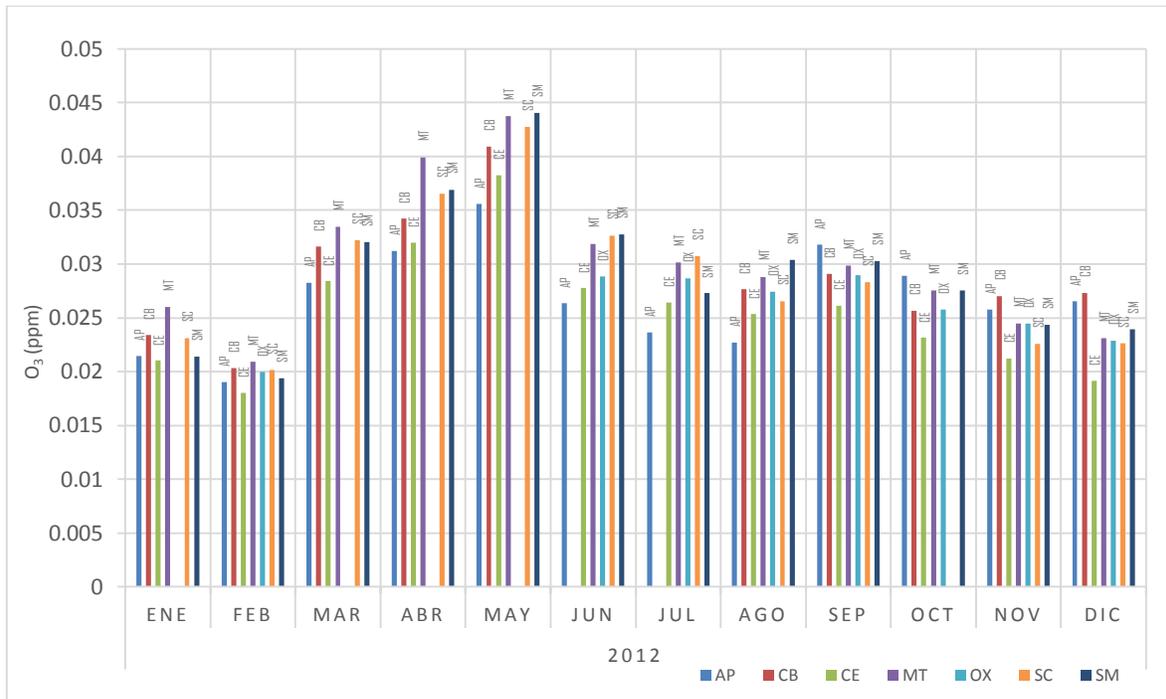


*5.1.2.3 Concentraciones de O<sub>3</sub> año 2012*

Los registros para el año 2012 no cuentan con los datos completos por cierto rango de tiempo de las estaciones Oxtotitlán en los meses de enero, marzo, abril y mayo, la estación Ceboruco en los meses de junio y julio y San Cristóbal en el mes de octubre.

En el año 2012 marzo, abril, mayo y junio son los meses que tienen los promedios más altos, coincidiendo con las gráficas de temperatura del mismo año, con rangos que van desde los 0.028 ppm en aeropuerto y Centro a 0.033 ppm en Metepec para el mes de marzo, en abril de 0.031 ppm en aeropuerto y centro a 0.039 en Metepec, de 0.035 ppm en aeropuerto a 0.044 ppm en San Mateo en el mes de mayo y de .026 ppm en aeropuerto a 0.032 en San Cristóbal y San Mateo para el mes de junio.

**Gráfica 9 Promedio de concentraciones de O<sub>3</sub> año 2012**



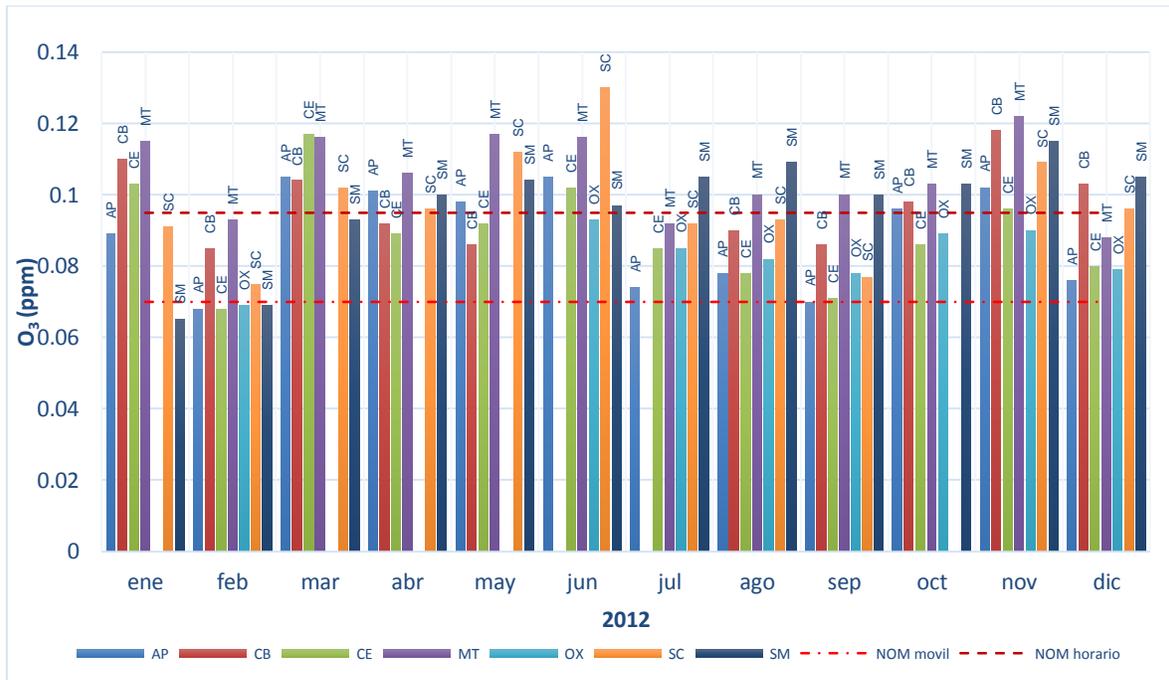
Así mismo en febrero se presentan rangos que van desde los 0.018 ppm en Centro a los 0.020 ppm en Ceboruco, Metepec y San Cristóbal, convirtiéndose en el mes con los promedios más bajos del 2012. El resto de los meses no mencionados, se encuentran entre los 0.020 ppm a los 0.032 ppm.

Las estaciones que se mantienen con promedios altos a lo largo del año son San Mateo, San Cristóbal y Metepec.

*5.1.2.4 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes año 2012*

Como se mencionó en gráficas anteriores, los registros para el año 2012 no cuentan algunos datos por intervalos de tiempo, tal es el caso de las estaciones Oxtotitlán en los meses de enero, marzo, abril y mayo, la estación Ceboruco en los meses de junio y julio y San Cristóbal en el mes de octubre.

**Gráfica 10 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes del año 2012**



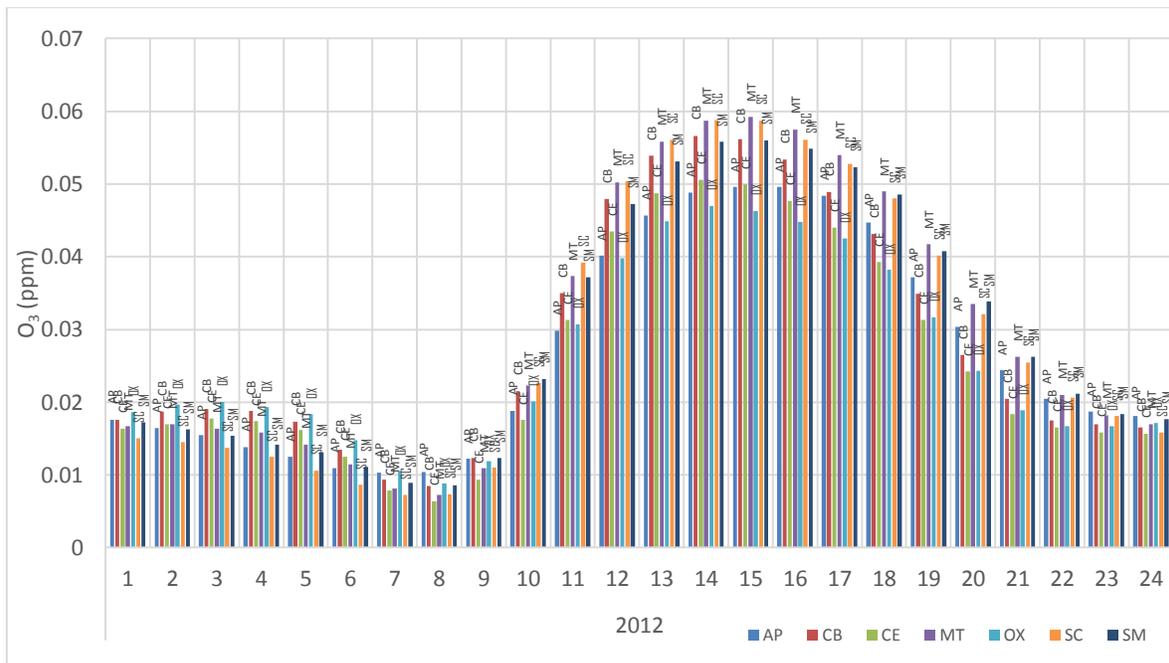
Con los meses y estaciones que si cuentan con registros, puede observarse que los máximos registrados durante los meses del año 2012 están por encima de los 0.080 ppm. Así, los meses con los máximos más altos que rebasan los 0.100 ppm son enero en las estaciones Centro, Ceboruco y Metepec, marzo en las estaciones aeropuerto, Ceboruco, Centro, Metepec y San Cristóbal, abril en estaciones aeropuerto y Metepec, mayo en Metepec, San Cristóbal y San Mateo, junio en centro, aeropuerto, Metepec y San Cristóbal, julio en San Mateo al igual que agosto, octubre en Metepec y San Mateo, noviembre en Ceboruco, Metepec, San Cristóbal y San Mateo, y por último en diciembre en Ceboruco y San Mateo. Cabe señalar que el mes de junio es el que presenta el máximo más alto en la estación San Cristóbal con 0.130 ppm.

*5.1.2.5 Concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2012*

Durante el año 2012 las horas con los promedios más altos durante el día de concentraciones de O<sub>3</sub> son las que están de entre las 11:00 a 20:00, siendo las concentraciones pico, las horas de las 13:00 a las 17:00 horas.

Las 13:00 horas abarcan un rango de entre 0.044 ppm correspondiente a Oxtotitlán a 0.056 ppm, en San Cristóbal, las 14:00 horas de 0.047 ppm en Oxtotitlán a 0.058 ppm en Metepec y San Cristóbal, las 15:00 horas de 0.046 ppm en Oxtotitlán a 0.059 ppm en Metepec, las 16:00 horas de 0.044 ppm en Oxtotitlán a 0.057 ppm en Metepec y para las 17:00 horas con 0.042 ppm en Oxtotitlán a 0.054 ppm en Metepec.

**Gráfica 11 Promedio de las concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2012**



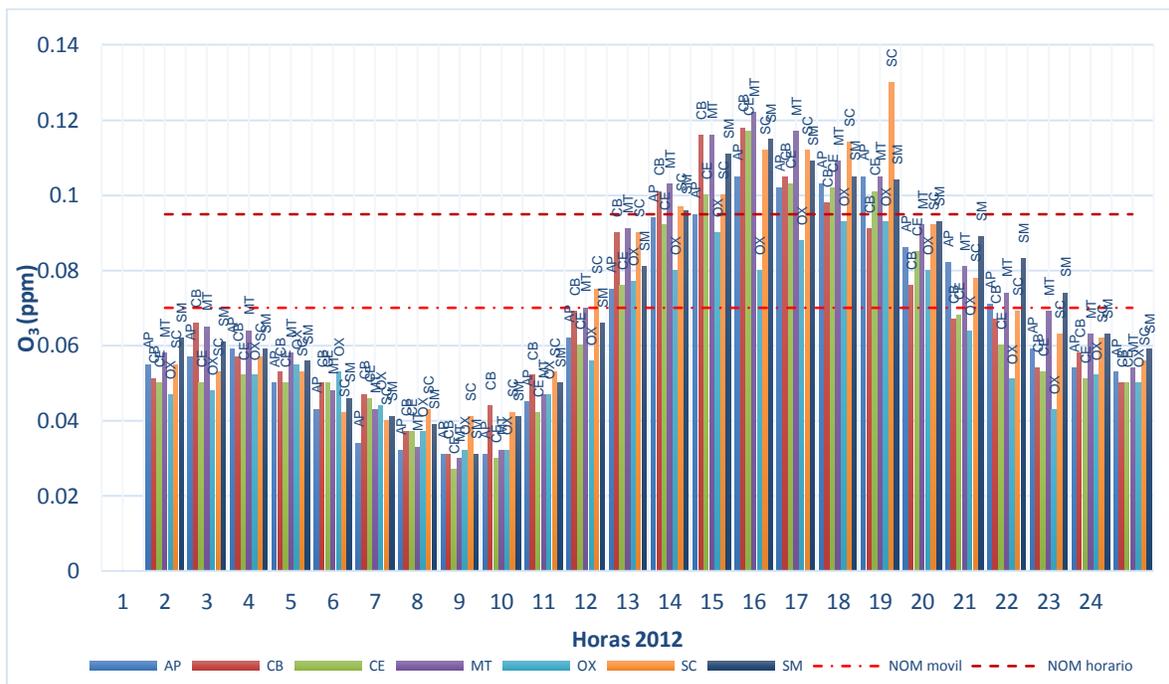
Las estaciones con los mayores promedios durante estas horas pico son San Mateo, San Cristóbal, Metepec y Ceboruco.

Así mismo las horas con los promedios más bajos en el día son las 07:00 y 08:00 con rangos de 0.007 ppm en San Cristóbal a 0.010 para Oxtotitlán y aeropuerto, de 0.006 ppm en la estación centro a 0.010 en aeropuerto respectivamente.

5.1.2.6 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2012

Las horas con los máximos más altos durante las 24 horas del día registrados que van por encima del LMP móvil son desde las 12:00 a las 22:00, siendo aquellas horas que supera el LMP horario las horas de entre las 14:00 a las 19:00, las 14:00 registran concentraciones de 0.090 ppm en Oxtotitlán a 0.116 ppm en Metepec, las 15:00 de 0.080 ppm en Oxtotitlán a 0.118 ppm, en Ceboruco, las 16:00 de 0.088 en Oxtotitlán a 0.117 ppm en Metepec, las 17:00 de 0.93 ppm en Oxtotitlán a 0.114 ppm en San Cristóbal, las 18:00 de 0.091 en Ceboruco a .0105 ppm en Aeropuerto y Metepec, por último las 19:00 de 0.091 ppm en Ceboruco a 0.130 ppm en San Cristóbal siendo éste último una anomalía entre el resto de las estaciones y los rangos registrados.

Gráfica 12 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2012



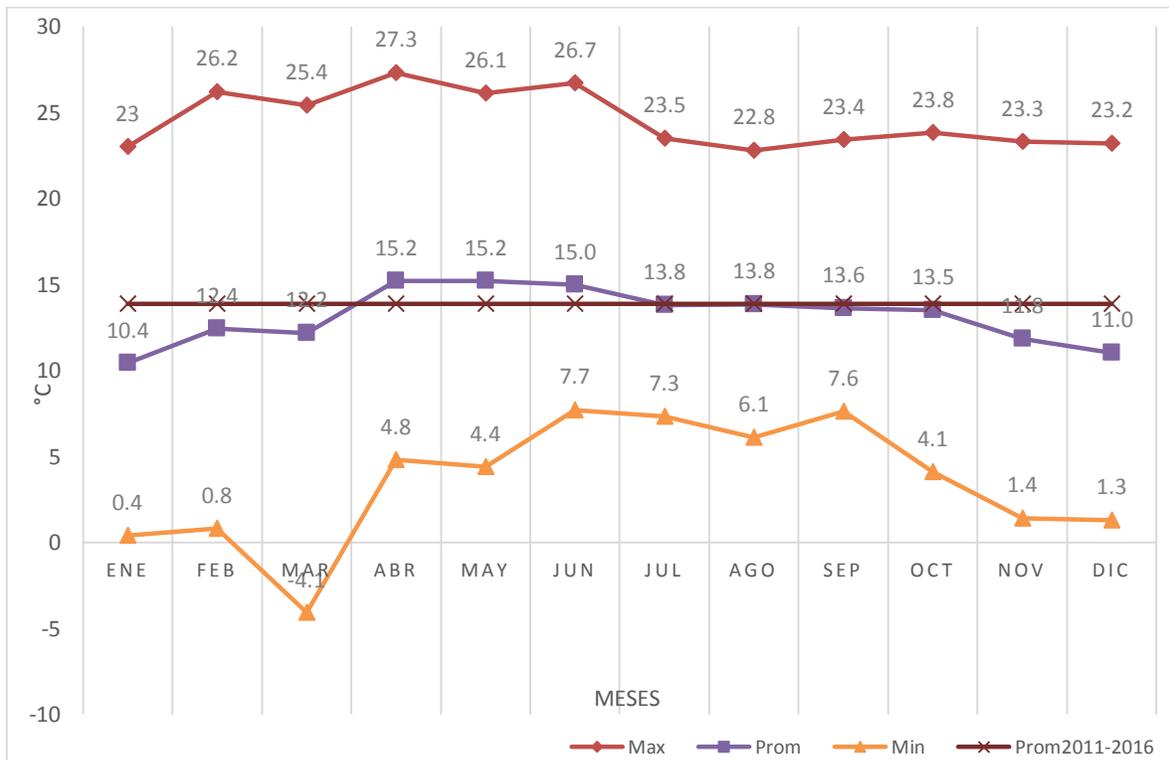
Los máximos más bajos registrados están en las horas 08:00 y 09:00, con 0.027 ppm en estación centro a 0.041 ppm en San Cristóbal para la hora 8:00 y 0.030 ppm en Metepec a 0.044 ppm en Ceboruco para la hora 9:00.

### 5.1.3 Análisis año 2013

#### 5.1.3.1 Temperatura año 2013

Para la elaboración de la presente gráfica número 13 de los promedios de temperatura para el año 2013 no se tuvieron datos de la estación CB en el mes de junio. Pero con base en los datos con los que se contaron, en este año los meses con mayores temperaturas se presentaron de febrero a junio, cubriendo de esta manera parte del invierno, la primavera y principios del verano, siendo en este caso el dato máximo de 27.3°C en abril, por otro lado, el dato mínimo se encontró en marzo con -4.1 que junto con noviembre y diciembre son los meses, de invierno, más fríos.

**Gráfica 13 Promedio de temperatura por mes año 2013**



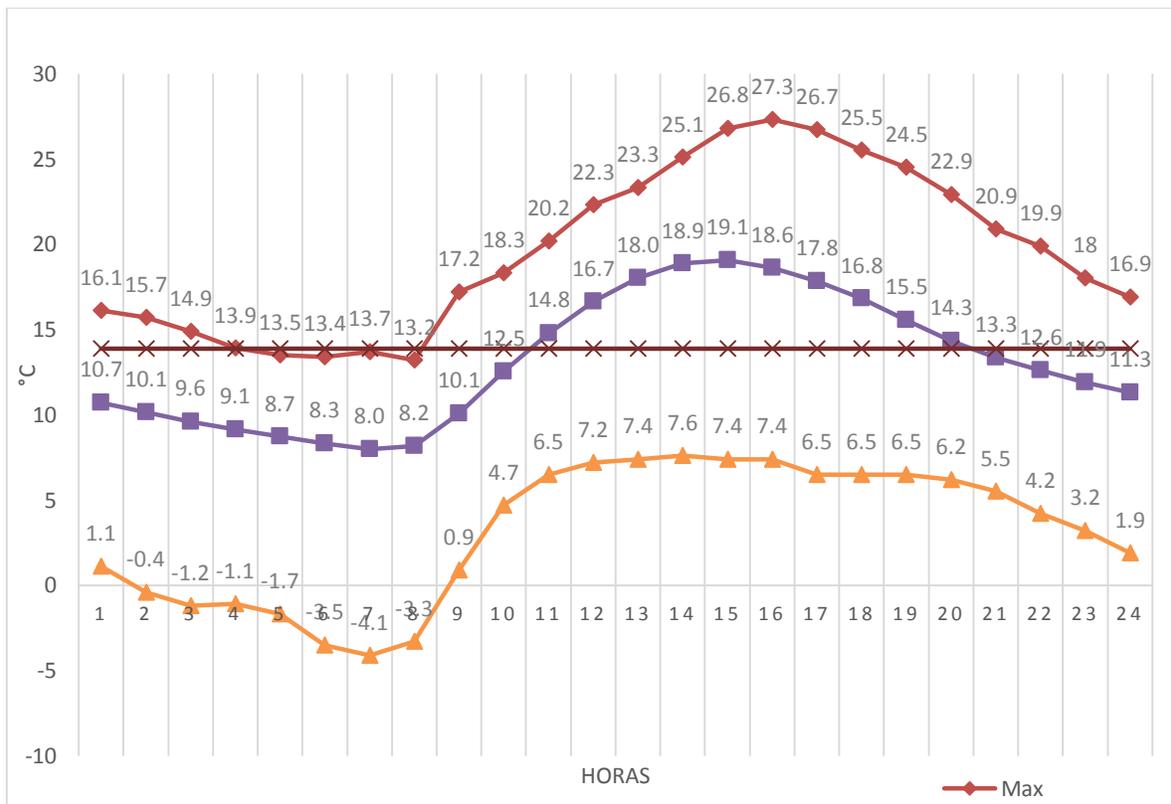
A su vez, en los promedios se puede observar que los datos fluctúan cerca de la línea del promedio de los 6 años y que estos se mantienen por en medio de los datos mínimos y máximos de la gráfica.

5.1.3.2 Temperatura por hora año 2013

Las horas registradas con la mayor temperatura durante el año 2013 se presentan entre las 13 a 20 horas del día, con la máxima de 27.3 a la hora 16.

Por el contrario, las horas con la menor actividad solar durante el día fueron de entre las 2 a las 9 de la mañana, con un valor mínimo de -4.1 a la hora 7.

Gráfica 14 Promedio de temperatura por hora año 2013

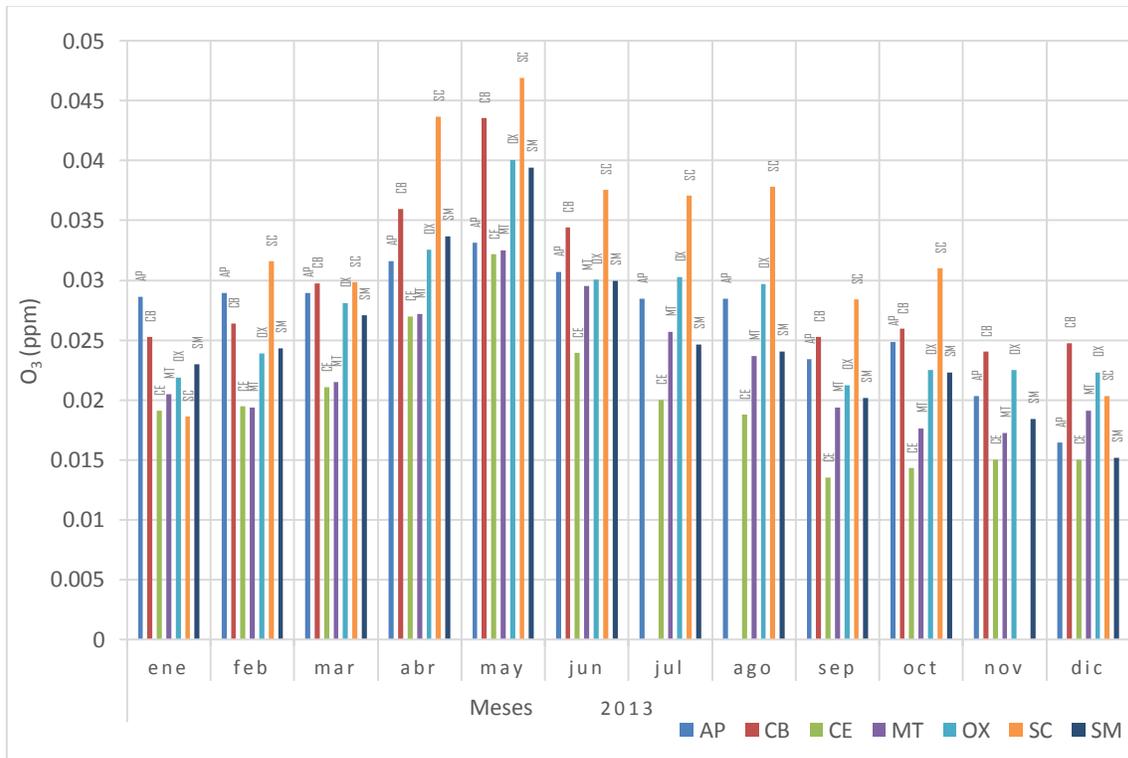


5.1.3.3 Concentraciones de O<sub>3</sub> año 2013

Los registros para el año 2013 cuenta con datos incompletos de algunos meses de las estaciones CB en los meses de julio y agosto, y SC en de noviembre; por lo que no se encuentran en la gráfica.

En el año 2013 abril, mayo y junio son los meses que tienen los promedios más altos, con rangos que están entre los 0.026 ppm en la estación CE a 0.046 ppm en SC en abril, de 0.032 ppm en CE y MT a 0.046 en SC y de 0.023 ppm en CE a 0.037 ppm en SC. Resaltando que la estación SC y CB tienen promedios por encima del resto de las estaciones en ocho de los meses del año.

Gráfica 15 Promedio de concentraciones de O<sub>3</sub> año 2013



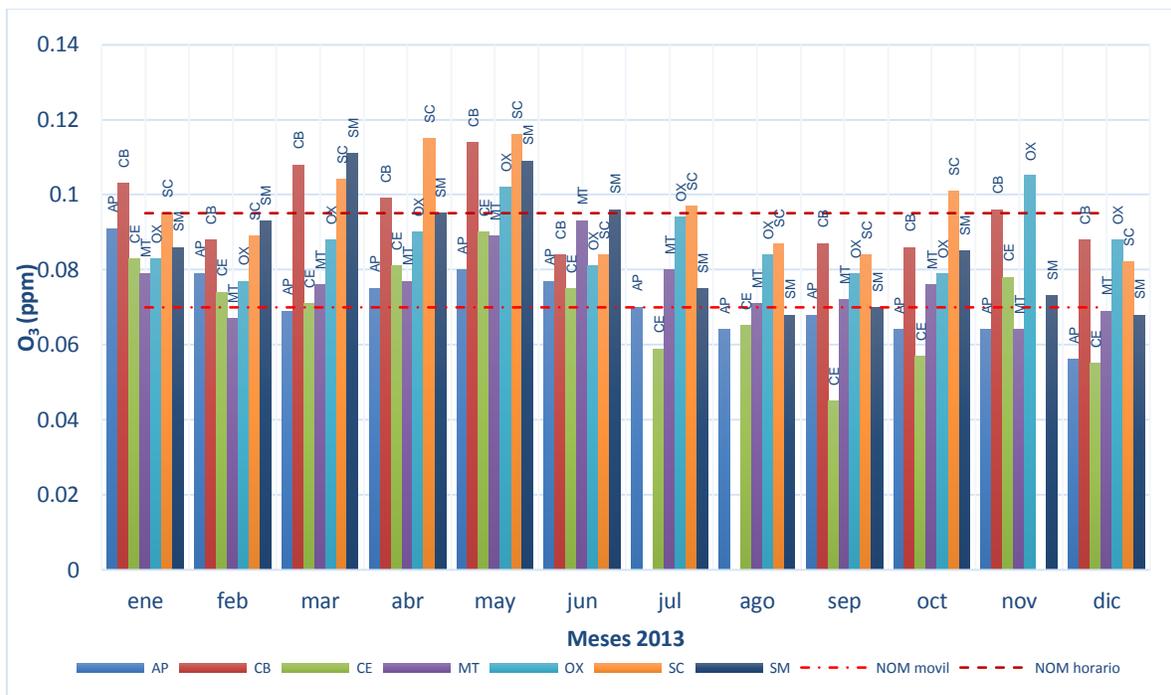
De igual forma de septiembre a febrero del 2013 se tiene promedios bajos de las concentraciones de O<sub>3</sub>, donde se observa una tendencia de diferencias de concentraciones muy marcadas entre cada estación, siendo la estación que se

mantiene más baja en estos meses la estación CE, con 0.013 ppm en septiembre a 0.026 ppm en febrero.

#### 5.1.3.4 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes año 2013

Como se mencionó en gráficas anteriores, los registros para el año 2013 no cuentan con datos para los meses de julio y agosto de la estación CB ni noviembre para SC.

**Gráfica 16 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes del año 2013**



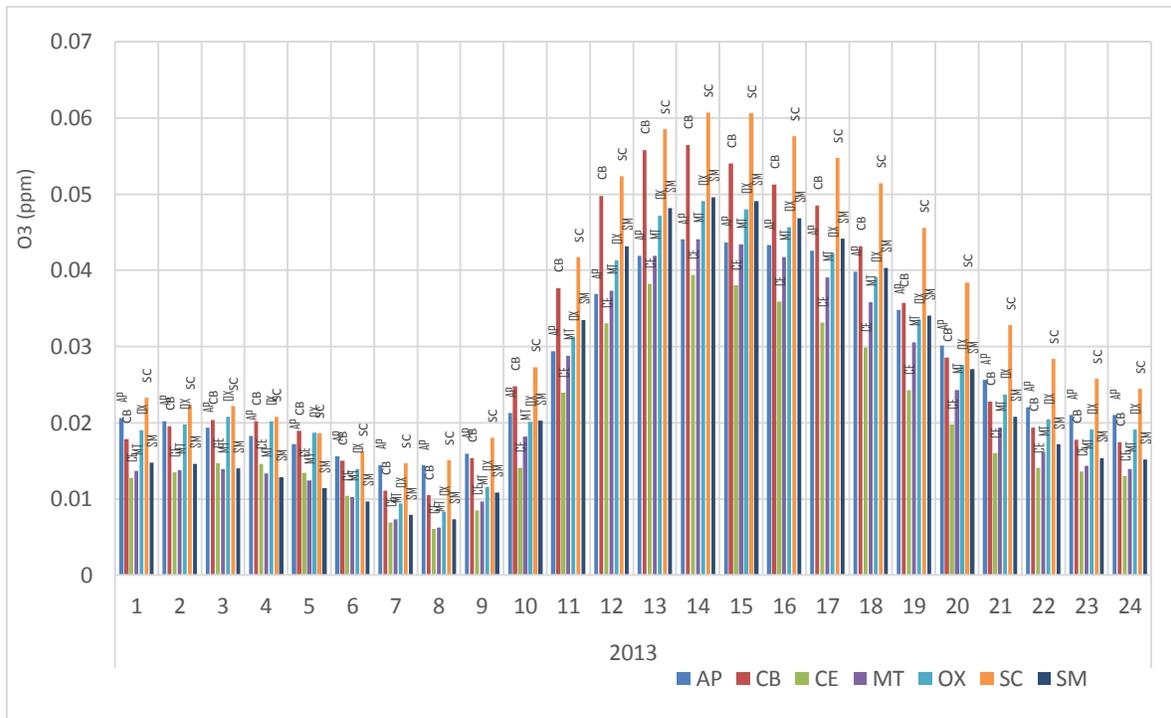
Una gran parte de los máximos registrados durante los meses del año 2013 están por encima de los 0.075 ppm correspondiente al LMP del promedio horario de la NOM, por consiguiente, los meses que superan el promedio móvil o bien las 0.095 ppm son marzo, abril y mayo en las estaciones CB, SC y SM las cuales llegan hasta las 0.016 ppm en SC.

Por el contrario, los meses con los máximos más bajos son agosto y septiembre con 0.045 ppm en CE en septiembre a 0.087 ppm en SC para agosto y en CB para septiembre.

**5.1.3.5 Concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2013**

En el año 2013 los promedios más altos de las concentraciones de O<sub>3</sub> clasificados por hora se presentaron entre las 12:00 a 18:00 horas, teniendo como vértice las horas 14:00 y 15:00 que están entre las 0.038 ppm en CE para la hora 15 a las 0.060 ppm en SC para ambas.

**Gráfica 17 Promedio de las concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2013**



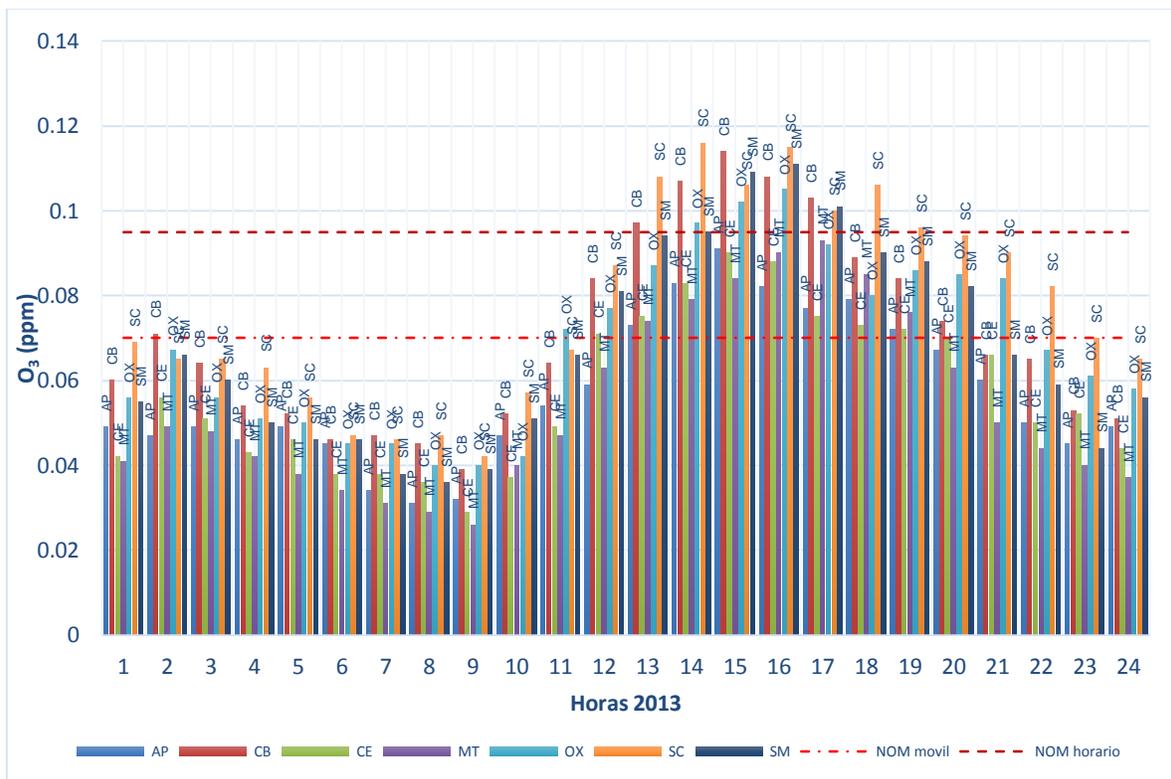
Así mismo las horas con los promedios más bajos en el día son las 07:00 y 08:00 con rangos de 0.0061 ppm en CE a 0.015 ppm en SC para la hora 8.

La estación SC se mantiene por encima del promedio del resto durante las 24 horas del día en el año 2013.

5.1.3.6 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2013

Las horas con los máximos más altos durante las 24 horas del día registrados durante el 2013 y que van por encima del LMP móvil son desde las 12:00 a las 21:00, siendo aquellas horas que supera el LMP horario, o que se acercan al vértice de la gráfica, las horas de entre las 13:00 a las 17:00 llegando hasta las 0.116ppm de SC en la hora 14. La estación SC se mantiene por encima de los máximos de las demás estaciones.

Gráfica 18 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2013



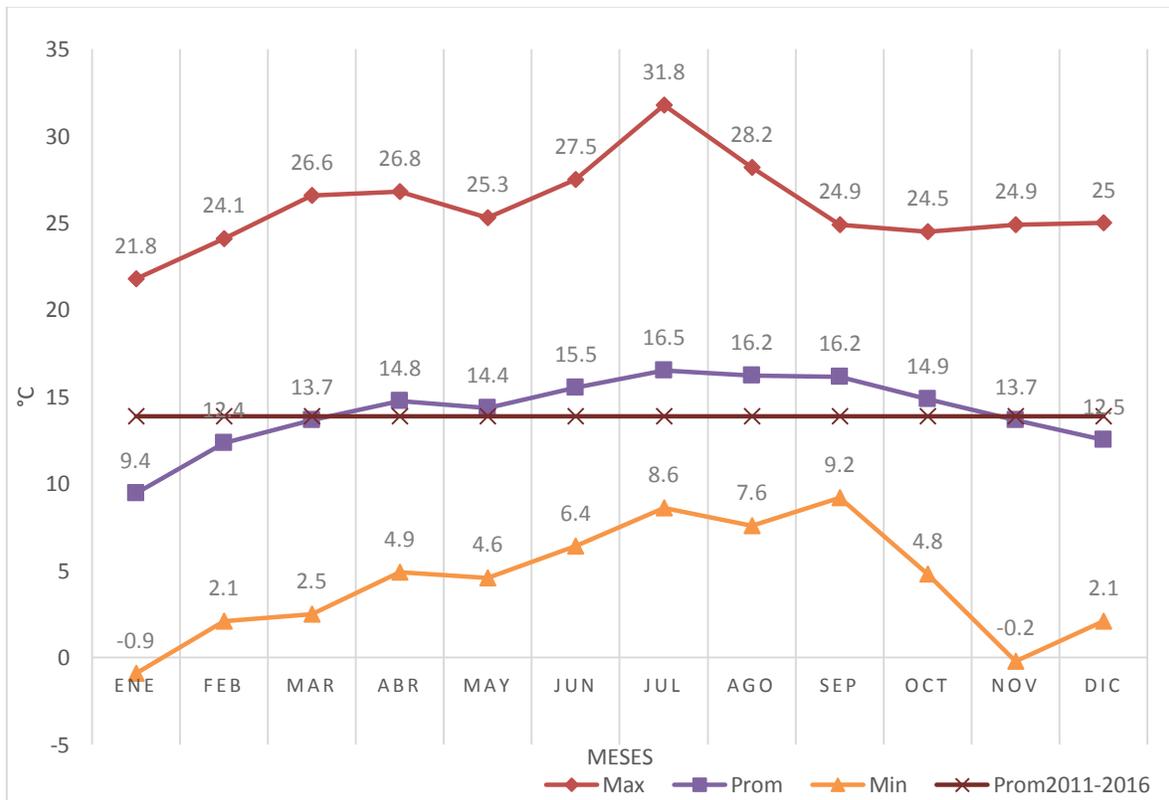
Los máximos más bajos registrados están en las horas 07:00, 08:00 y 09:00, con registros de entre las 0.029 ppm en MT en la hora 8 y en CE en la hora 9 hasta las 0.047 ppm en CB en la hora 7 y en SC en la hora 8.

### 5.1.4 Análisis año 2014

#### 5.1.4.1 Temperatura año 2014

Con base en los datos del año 2014, los meses con mayores temperaturas se presentaron de junio, julio y agosto, cubriendo así el verano, en donde el dato máximo es de 31.8 °C en julio, por otro lado, el dato mínimo se encontró en enero con -0.9 °C que junto con noviembre y diciembre son los meses, correspondientes al invierno, más fríos.

**Gráfica 19 Promedio de temperatura por mes año 2014**



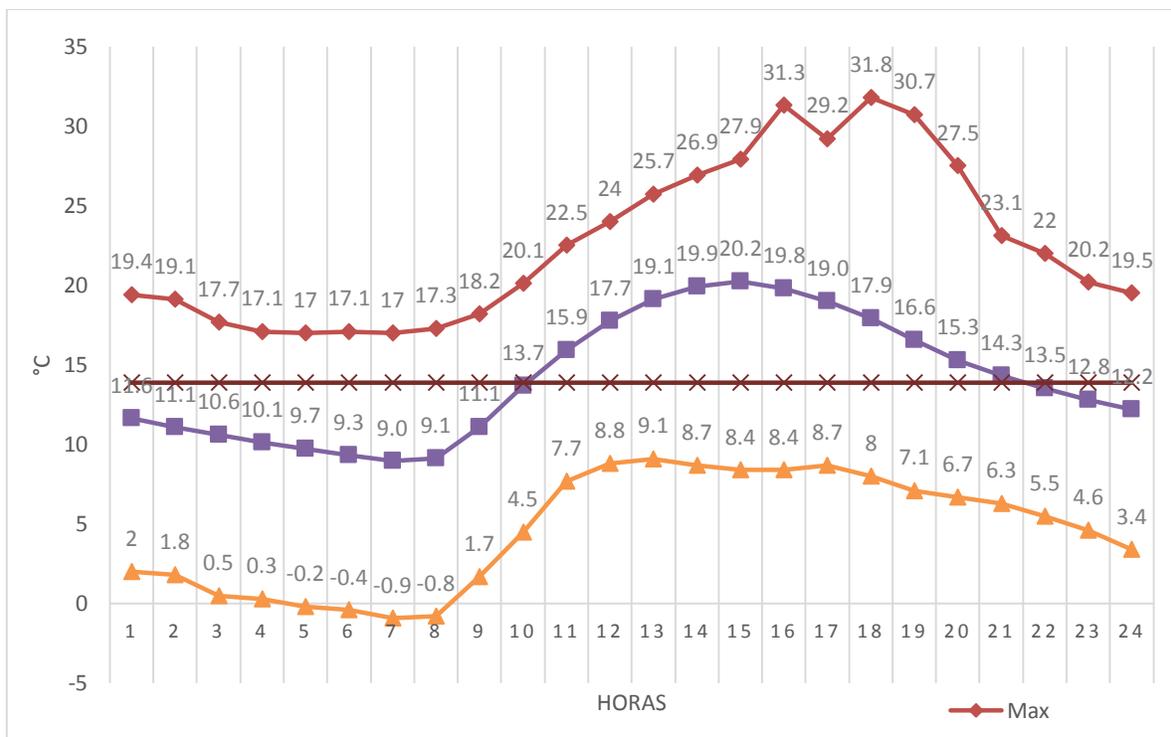
A su vez, en los promedios se puede observar que los datos siguen oscilando cerca de la línea del promedio de los 6 años, con un ligero aumento sobre el promedio de julio a septiembre y que estos se mantienen por en medio de los datos mínimos y máximos de la gráfica.

5.1.4.2 *Temperatura por hora año 2014*

Las horas registradas con la mayor temperatura durante el año 2014 se presentan entre las 13 a 20 horas del día, con la máxima de 31.8 a la hora 18.

Por el contrario, las horas con la menor actividad solar durante el día fueron de entre las 3 a las 8 de la mañana, con un valor mínimo de -0.9 a la hora 7.

**Gráfica 20 Promedio de temperatura por hora año 2014**

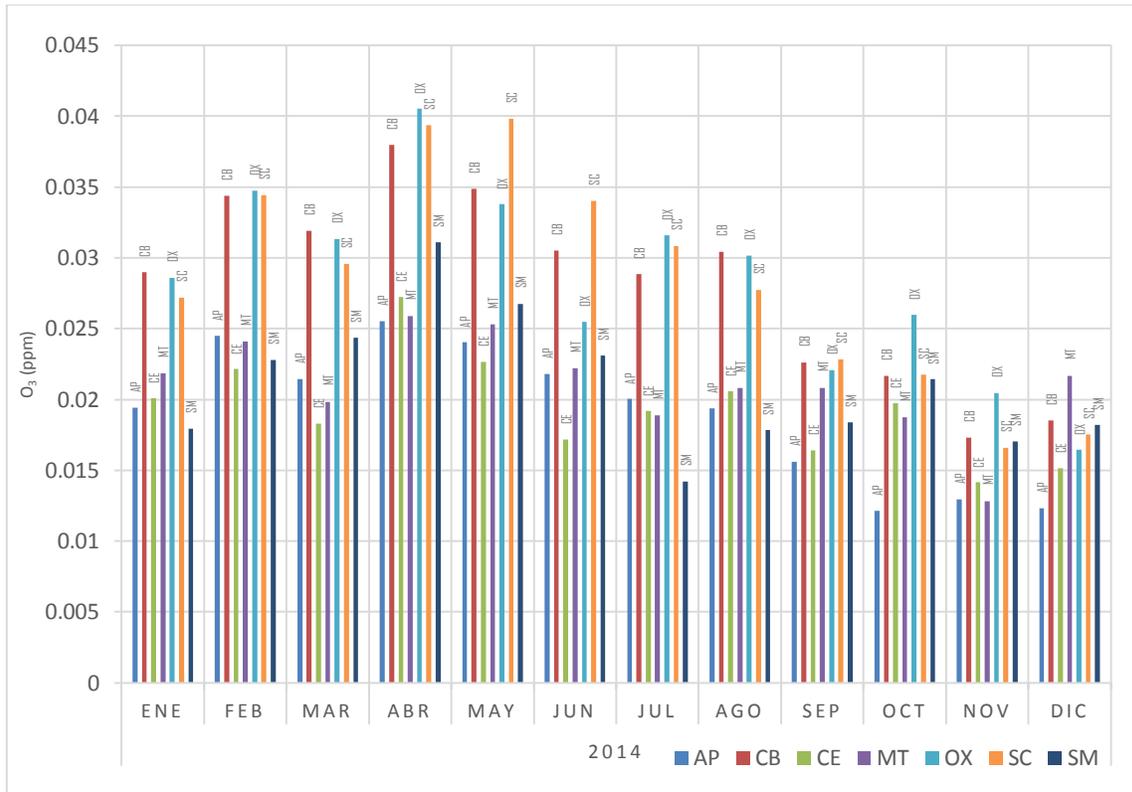


5.1.4.3 *Concentraciones de O<sub>3</sub> año 2014*

En el año 2014 la diferencia entre los promedios de las concentraciones de O<sub>3</sub> no son tan marcadas entre los meses, sin embargo, abril y mayo son los meses que tienen los promedios más altos, con rangos que están entre los 0.025 ppm en las estaciones MT y AP a 0.040 ppm en OX en abril, y de 0.022 ppm en la estación CE a 0.039 ppm en SC para el mes de mayo. Resaltando que la estación OX y SC

tienen promedios por encima del resto de las estaciones en siete de los meses del año.

**Gráfica 21 Promedio de concentraciones de O<sub>3</sub> año 2014**



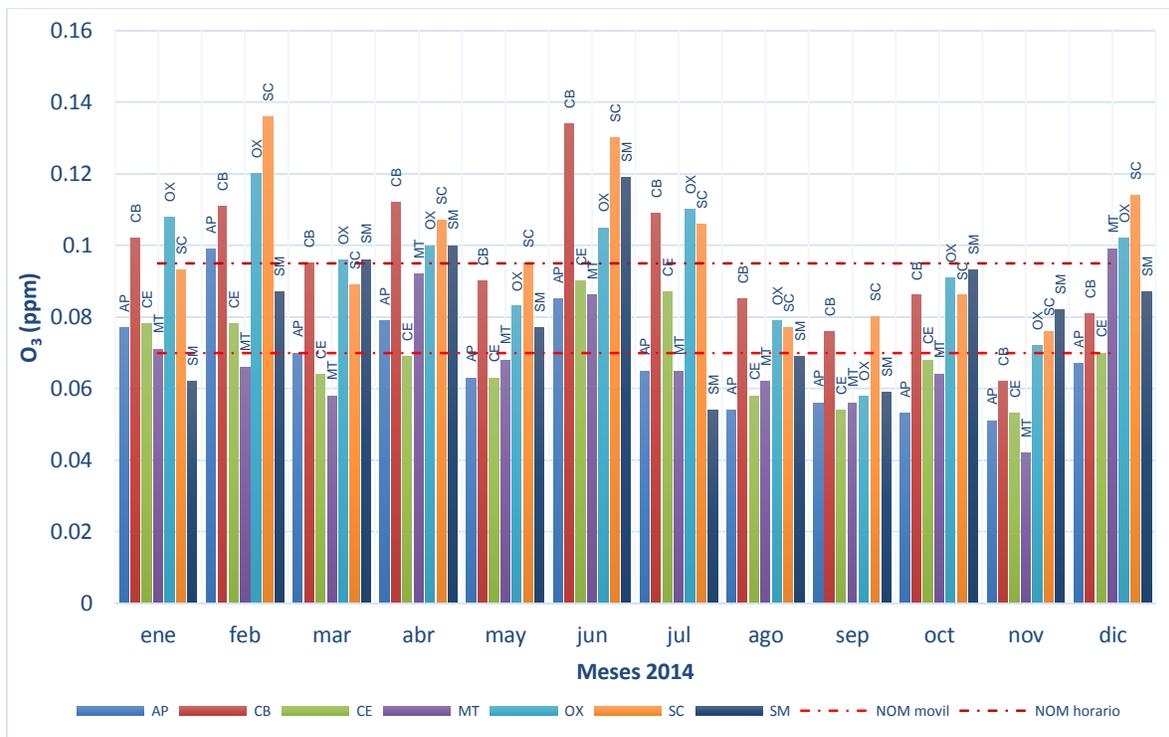
De igual forma, noviembre y diciembre del 2014 tienen los promedios más bajos de las concentraciones de O<sub>3</sub>, las cuales van por debajo de los 0.021 ppm.

#### 5.1.4.4 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes año 2014

Una gran parte de los máximos registrados durante los meses del año 2013 están por encima de los 0.075 ppm correspondiente al LMP del promedio horario de la NOM en por lo menos dos estaciones, en el caso de los meses que superan el promedio móvil o bien las 0.095 ppm es diferente, ya que sólo son los meses de enero, febrero, abril, junio, julio y diciembre son los que cuentan con máximos que

lo superan. Enero marca su máximo en la estación OX con 0.108 ppm, febrero en la estación SC con 0.136ppm, abril en las estaciones OX, SM, SC y CB de 0.100 a 112 ppm, junio en las estaciones CB, SC, SM y OX de 0.105 ppm a 0.134 ppm, julio en CB, OX y SC de 0.106 ppm a 0.110ppm y diciembre de 0.099 a 0.114ppm en MT, OX y SC. Los tres máximos que se presentaron en diciembre corresponden al día cinco del mes de la estación SC, al día 4 de la estación MT y al día 31 en la estación OX.

**Gráfica 22 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes del año 2014**

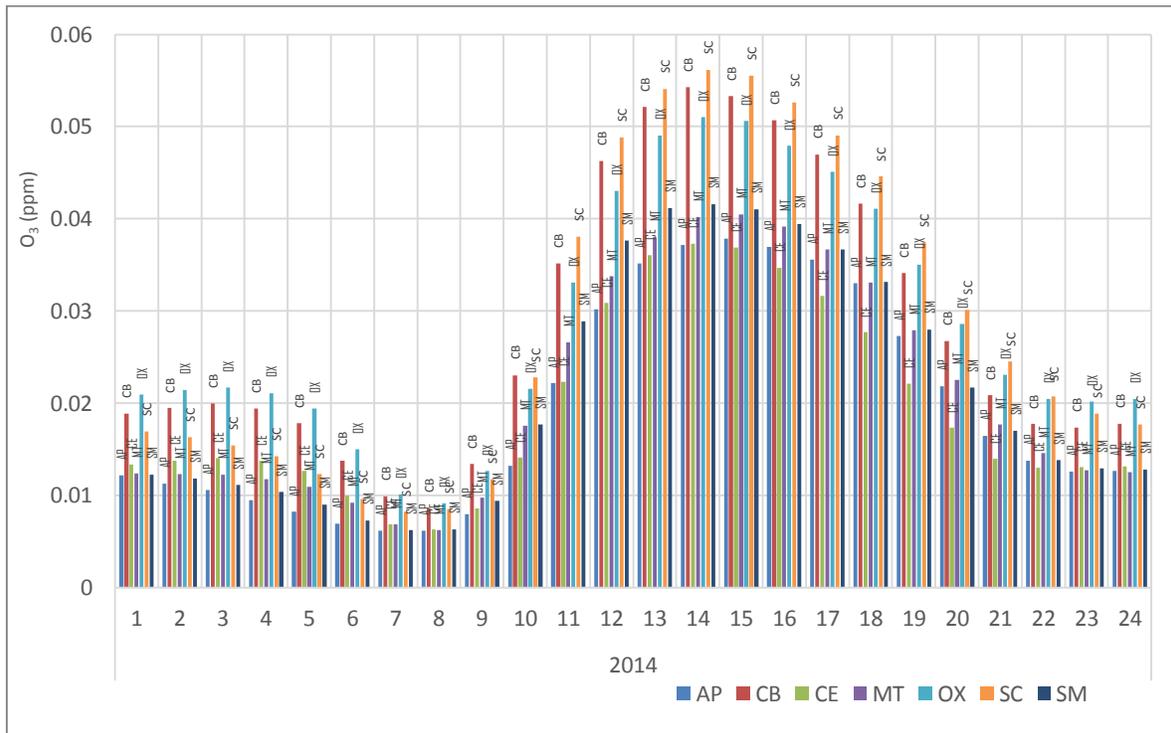


Por el contrario, los meses con los máximos más bajos son agosto, septiembre y noviembre con 0.054 ppm en AP en agosto, en CE en septiembre y 0.042 ppm en MT en noviembre.

5.1.4.5 Concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2014

En el año 2014 los promedios más altos de las concentraciones de O<sub>3</sub> clasificados por hora se presentaron entre las 12:00 a 18:00 horas, teniendo cerca del vértice la hora 14:00 que tiene un rango de 0.037 ppm en las estaciones CE y AP a 0.056 ppm en SC.

Gráfica 23 Promedio de las concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2014



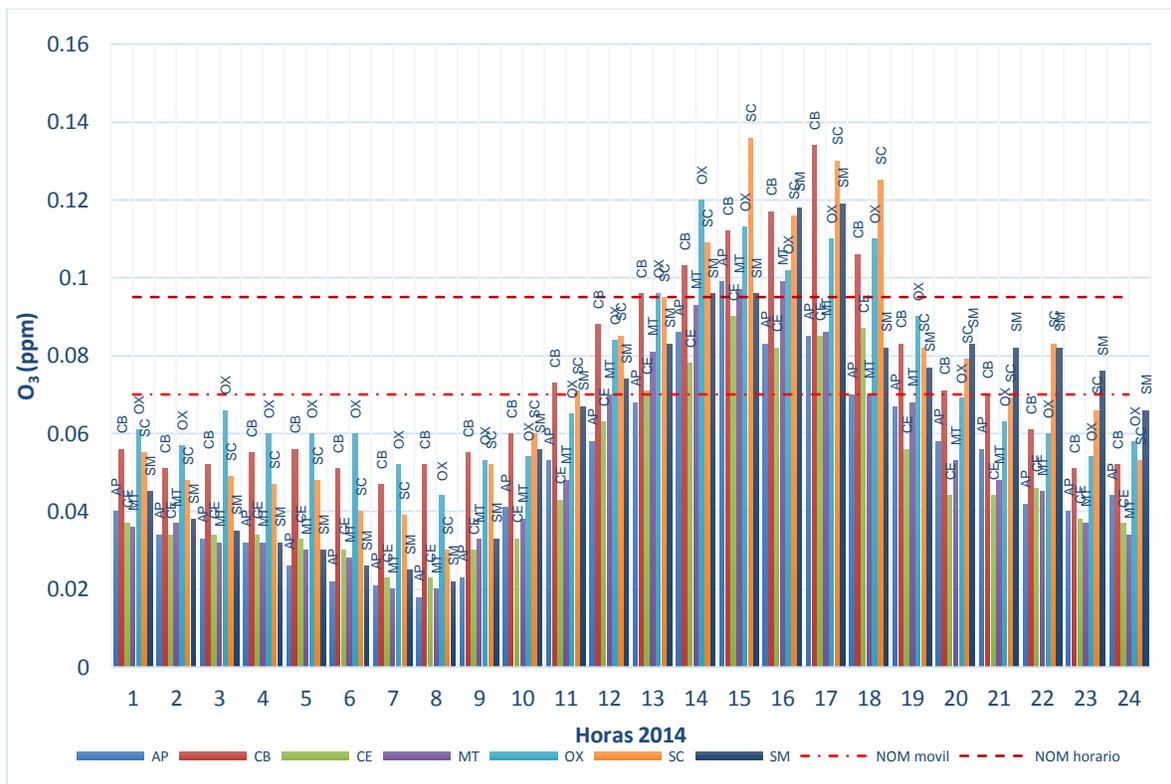
La estación SC se mantiene por encima del promedio del resto de las estaciones durante las 24 horas del día en el año 2014, seguida por CB y OX.

Así mismo las horas con los promedios más bajos en el día son las 07:00 y 08:00 con rangos de 0.0061 ppm en AP a 0.010 ppm en OX para la hora 7.

5.1.4.6 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2014

Las horas con los máximos más altos durante las 24 horas del día registrados durante el 2014 y que van por encima del LMP móvil son desde las 11:00 a las 23:00 horas, siendo aquellas horas que supera el LMP horario, o que se acercan al vértice de la gráfica, las horas de entre las 14:00 a las 18:00 llegando hasta las 0.136 ppm de SC en la hora 15 del 20 del mes de febrero. La estación SC. OX y CE se mantienen por encima de los máximos de las demás estaciones.

Gráfica 24 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2014



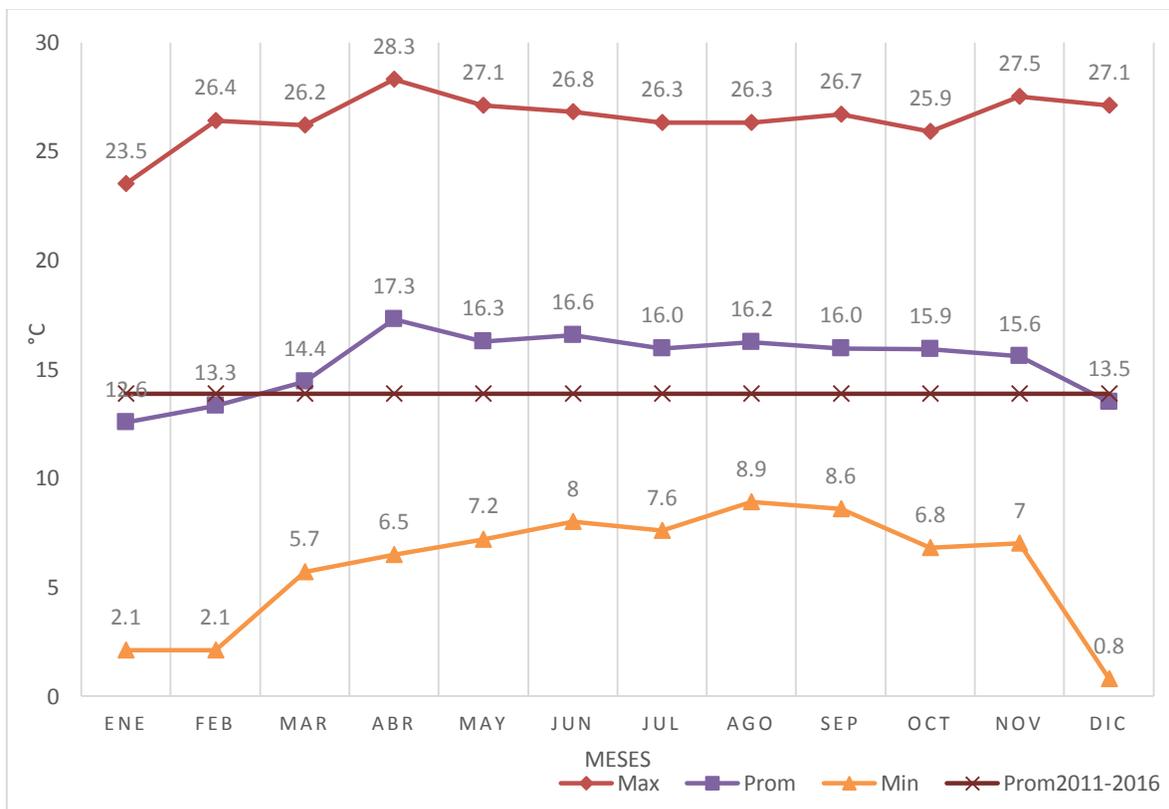
Los máximos más bajos registrados están en las horas 07:00 y 08:00, con registros de entre las 0.018 ppm en AP en la hora 8 y 0.052 ppm en OX y CB para las horas 7 y 8 respectivamente.

### 5.1.5 Análisis año 2015

#### 5.1.5.1 Temperatura año 2015

Los registros del 2015 para temperatura no cuentan con los datos de la estación AP de octubre a diciembre debido a que se decidió cerrar para su reubicación, de igual manera tampoco se tienen los datos de la estación CB de junio a septiembre sin alguna razón en particular.

**Gráfica 25 Promedio de temperatura por mes año 2015**



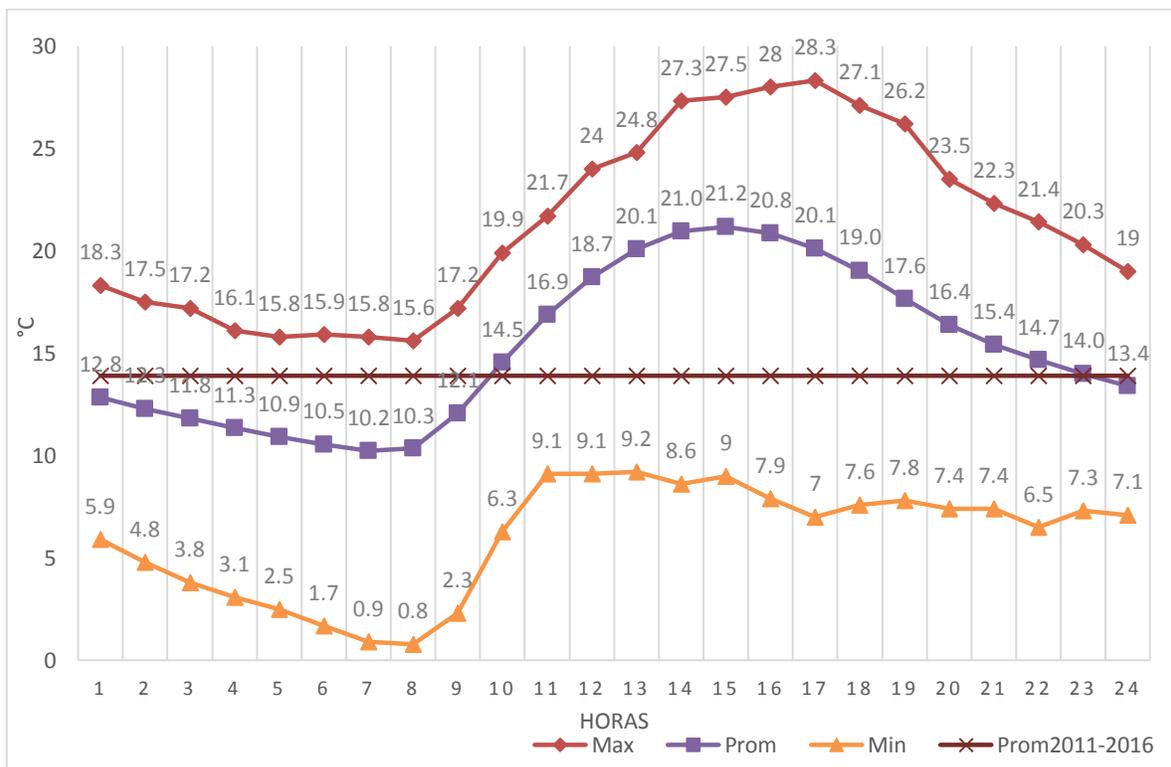
Con base en los datos del año 2015 disponible puede observarse en la gráfica 25 que el mes con la mayor temperatura es abril con 28.3 °C, y que el resto de los meses mantienen un comportamiento uniforme por encima de los 25.9 °C con excepción de enero. Por otro lado, el dato mínimo se encontró en diciembre con 0.8

°C, el cual, junto con enero y febrero correspondientes al invierno son los más fríos, y que a diferencia de los años anteriores sus valores no son negativo

A su vez, en los promedios se puede observar que los datos ya no oscilando cerca de la línea del promedio de los 6 años, ya que de abril a noviembre el promedio va por encima de los 15.6 °C.

5.1.5.2 Temperatura por hora año 2015

Gráfica 26 Promedio de temperatura por hora año 2015



El comportamiento de la temperatura durante el año 2015 presentó un comportamiento diferente entre las horas del día, a diferencia de los años anteriores. Las horas registradas con la mayor temperatura durante el año se presentaron entre las 13 a 20 horas del día, con la máxima de 28.3 a la hora 17.

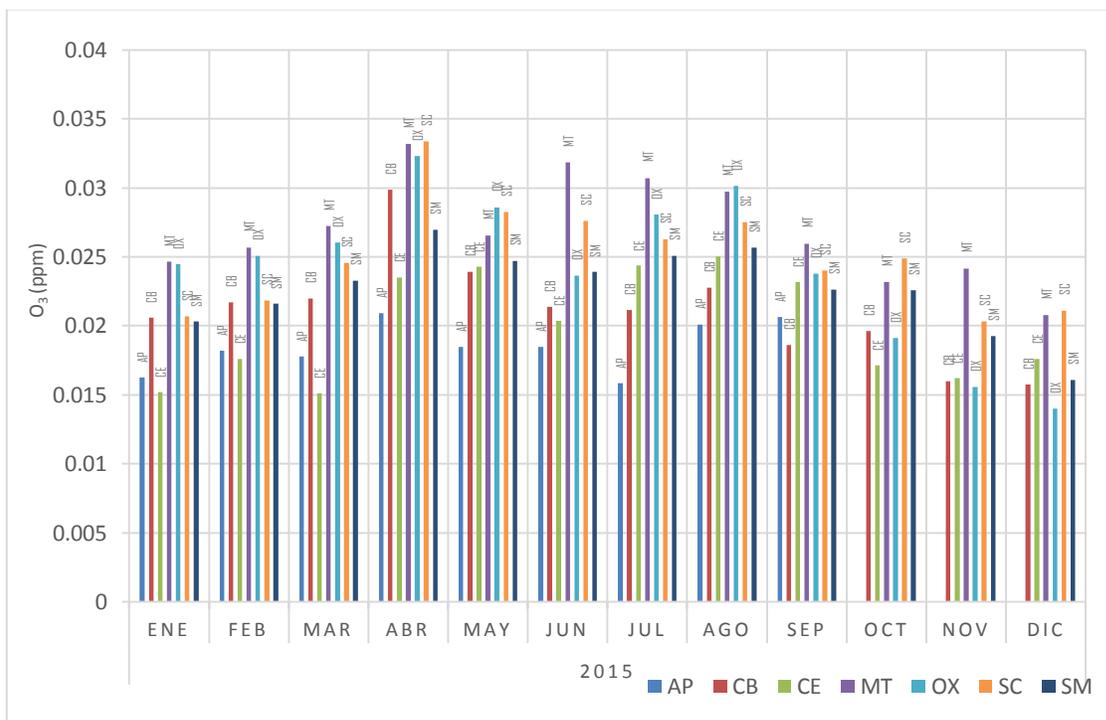
Por el contrario, las horas con la menor actividad solar durante el día fueron de entre las 6 a las 9 de la mañana, con un valor mínimo de 0.8 a la hora 8.

5.1.5.3 Concentraciones de O<sub>3</sub> año 2015

Los registros del año 2015 de las mediciones de O<sub>3</sub> no cuentan con datos de los meses de octubre a noviembre de la estación AP, esto debido a que se planeó cerrarla para reubicarla.

En el año 2015 la diferencia entre los promedios de las concentraciones de O<sub>3</sub> son poco marcadas entre los meses, sin embargo, abril es el mes con los promedios más altos, con rango que se encuentran entre las 0.020 ppm en AP a las 0.033 ppm en MT y SC. Resaltando que las estaciones OX, MT y SC tienen promedios por encima del resto de las estaciones en más de la mitad de los meses del año.

Gráfica 27 Promedio de concentraciones de O<sub>3</sub> año 2015



De igual forma, enero y diciembre del 2015 tienen los promedios más bajos de las concentraciones de O<sub>3</sub>, las cuales van por debajo de los 0.024 ppm.

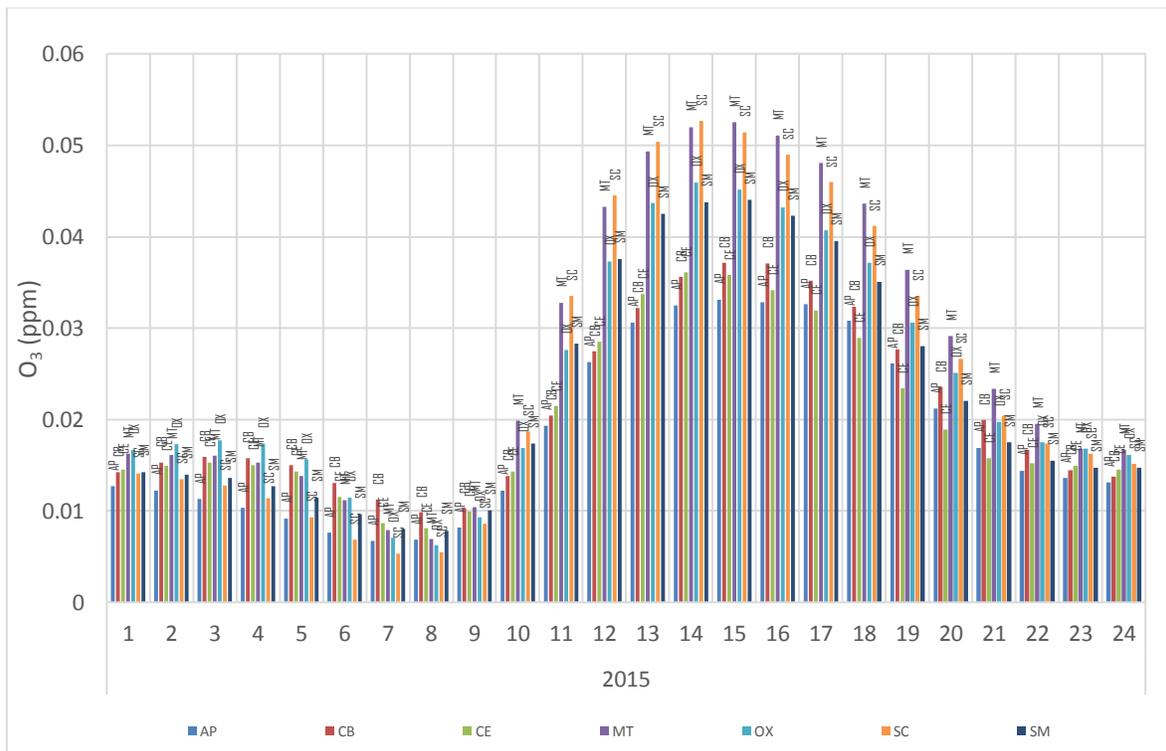
**5.1.5.4 Concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2015**

En el año 2015 los promedios más altos de las concentraciones de O<sub>3</sub> clasificados por hora se presentaron entre las 12:00 a 18:00 horas, teniendo cerca del vértice las horas 14:00 y 15:00 teniendo como rango las 0.032 ppm en AP a 0.052 ppm en SC y MT y las 0.033 ppm en AP a 0.052 en MT.

Las estaciones SC y MT se mantiene por encima del promedio del resto de las estaciones durante las 24 horas del día en el año 2015, seguida por SM y OX.

Así mismo, las horas con los promedios más bajos en el día son las 07:00 y 08:00 con rangos de 0.0052 ppm en SC a 0.011 en CB para la hora 7.

**Gráfica 28 Promedio de las concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2015**

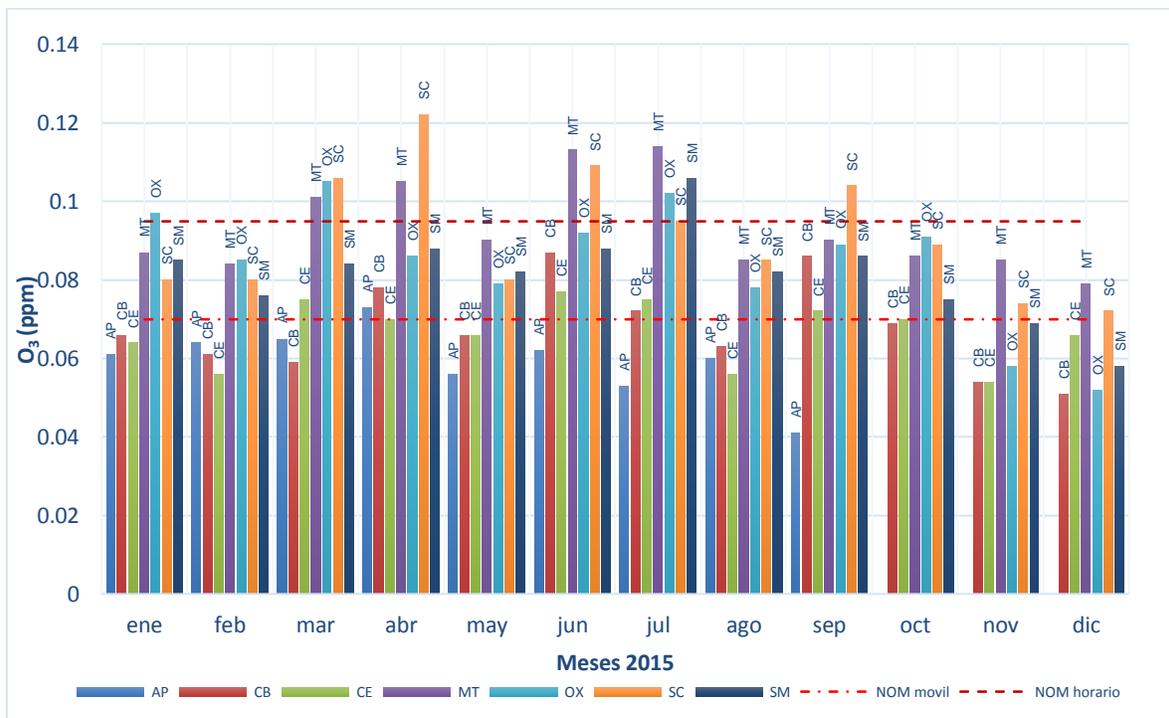


5.1.5.5 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes año 2015

Una gran parte de los máximos registrados durante los meses del año 2015 están por encima de los 0.075 ppm correspondiente al LMP del promedio horario de la NOM en por lo menos dos estaciones, en el caso de los meses que superan el promedio móvil o bien las 0.095 ppm es diferente, ya que sólo son los meses de marzo, abril, junio, julio y septiembre en las estaciones MT, SC y OX. En marzo se marcan máximos en MT, OX y SC de 0.101 ppm a 0.106 ppm, en abril se encontraron en MT y SC con 0.105 ppm y 0.122 ppm respectivamente, en junio están en MT y SC con 0.101 ppm y 0.109 ppm, en julio MT, OX y SM con 0.114 ppm, 0.102 ppm y .0106 ppm, por último, en septiembre SC con 0.104 ppm.

Por el contrario, los meses con los máximos más bajos son noviembre y diciembre con 0.051 ppm en CB en diciembre a 0.085 ppm en noviembre.

Gráfica 29 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes del año 2015

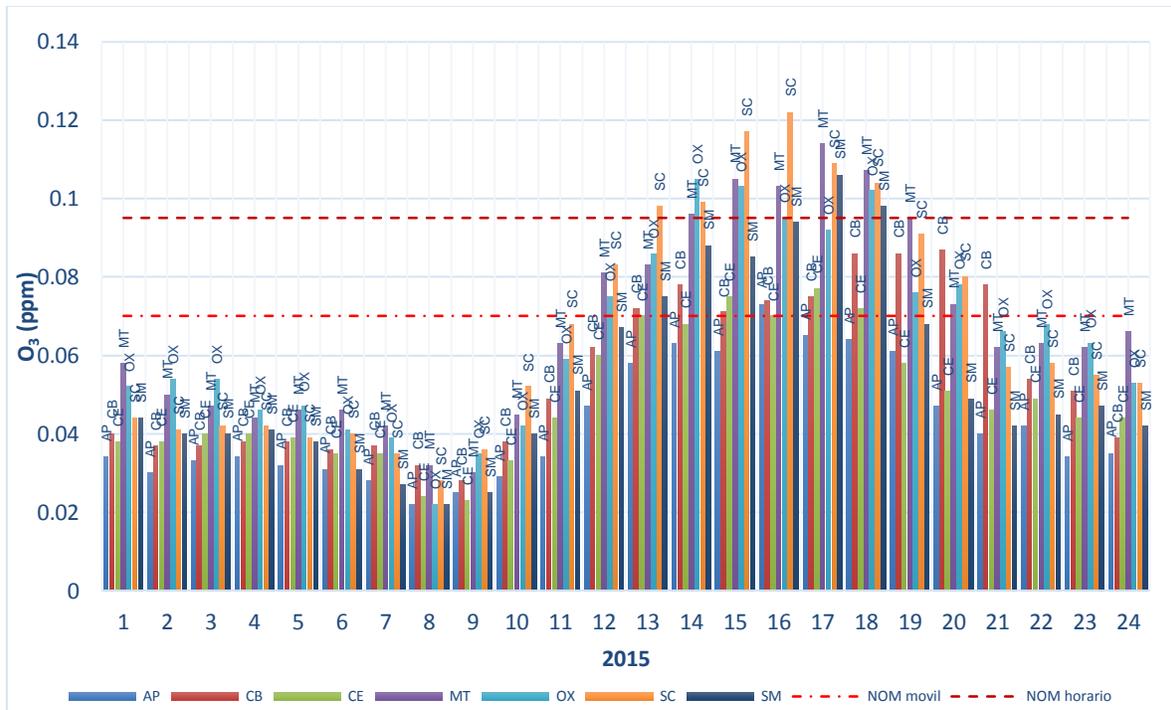


5.1.5.6 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2015

Las horas con los máximos más altos durante las 24 horas del día registrados durante el 2015 y que van por encima del LMP móvil son desde las 12:00 a las 21:00 horas, siendo aquellas horas que supera el LMP horario, o que se acercan al vértice de la gráfica, las horas de entre las 14:00 a las 18:00 llegando hasta las 0.122 ppm de SC en la hora 16 del día 08 de abril. Las estaciones que permanecen por encima de las demás son SC, MT y OX.

Los máximos más bajos registrados están en las horas 08:00 y 09:00, con registros de entre las 0.022 ppm en AP, OX y SM en la hora a 0.036 en SC en la hora 9.

Gráfica 30 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2015



### 5.1.6 Análisis año 2016

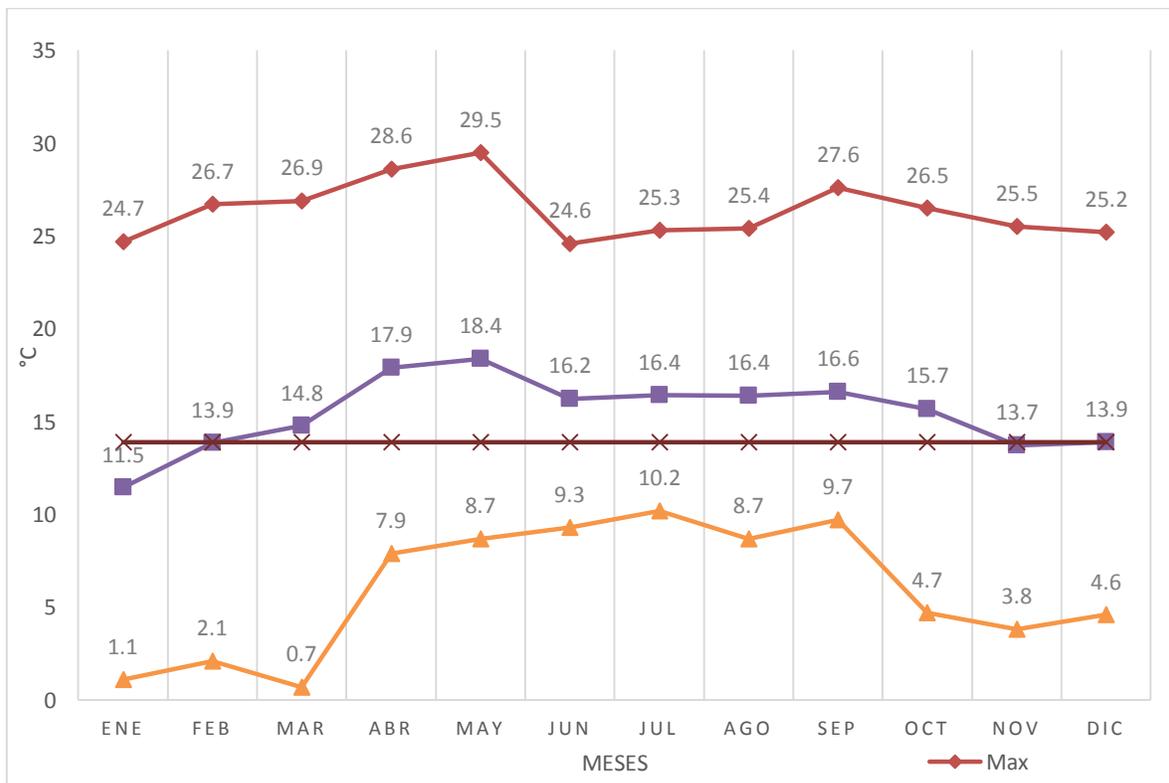
#### 5.1.6.1 Temperatura año 2016

Por último, Los registros del 2016 para temperatura ya tampoco cuentan con los datos de la estación AP ya que se decidió cerrar para su reubicación, ni los de SM de los meses de enero y de mayo a agosto.

Con base en los datos del año 2016 disponible puede observarse en la gráfica 31 que el mes con la mayor temperatura es mayo con 29.5 °C, acompañado por abril y septiembre. Por otro lado, el dato mínimo se encontró en marzo con 0.7 °C, el cual, junto con enero y febrero correspondientes al invierno son los más fríos, y que a diferencia de los años anteriores sus valores ya tampoco son negativos.

A su vez, en los promedios se puede observar que los datos ya no se encuentran oscilando cerca de la línea del promedio de los 6 años, ya que de abril a octubre el promedio va por encima de los 15.7 °C.

**Gráfica 31 Promedio de temperatura por mes año 2016**

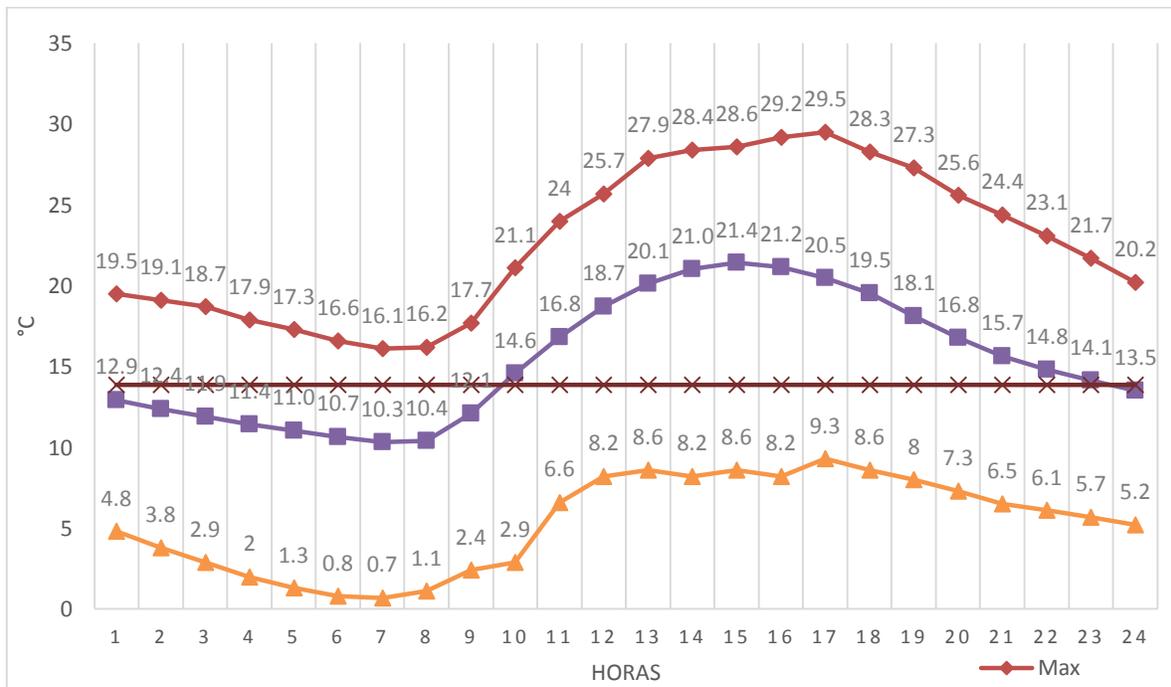


5.1.6.2 *Temperatura por hora año 2016*

El comportamiento de la temperatura durante el año 2016 presentó un comportamiento que va de las horas registradas con la mayor temperatura durante el año entre las 13 a 19 horas del día, con la máxima de 29.5 a la hora 17.

Por el contrario, las horas con la menor actividad solar durante el día fueron de entre las 6 a las 9 de la mañana, con un valor mínimo de 0.7 a la hora 7.

**Gráfica 32 Promedio de temperatura por hora año 2016**



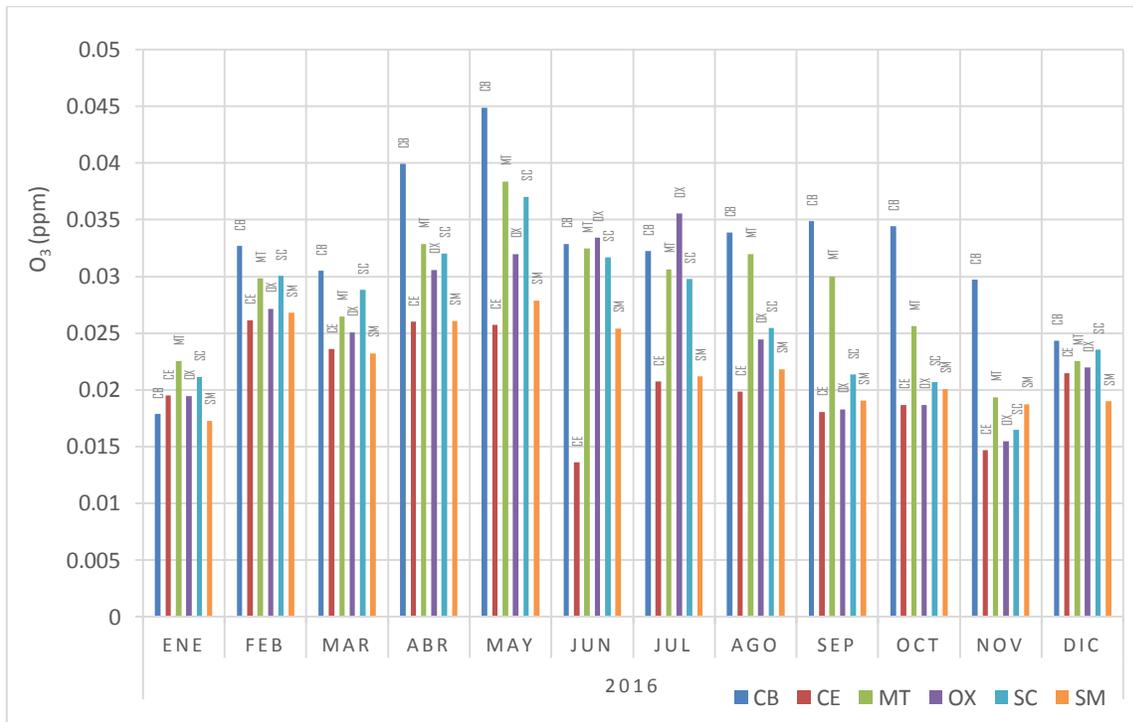
5.1.6.3 *Concentraciones de O<sub>3</sub> año 2016*

Los registros del año 2016 de las mediciones de O<sub>3</sub> ya no cuentan con datos de la estación AP por la reubicación que se programó.

En el año 2016 la diferencia entre los promedios de las concentraciones de O<sub>3</sub> son más notorias de una estación a otra, sin embargo, podría decirse que los meses de abril y mayo son los que presentaron mayores concentraciones con intervalos de

0.026 ppm en CE y SM a 0.039 ppm en CB en abril y de 0.025 en CE a 0.044 ppm en CB en mayo. Destacando que, las estaciones CB, MT y SC son las que sobresalen por tener las mayores concentraciones respecto a las otras.

**Gráfica 33 Promedio de concentraciones de O<sub>3</sub> año 2016**



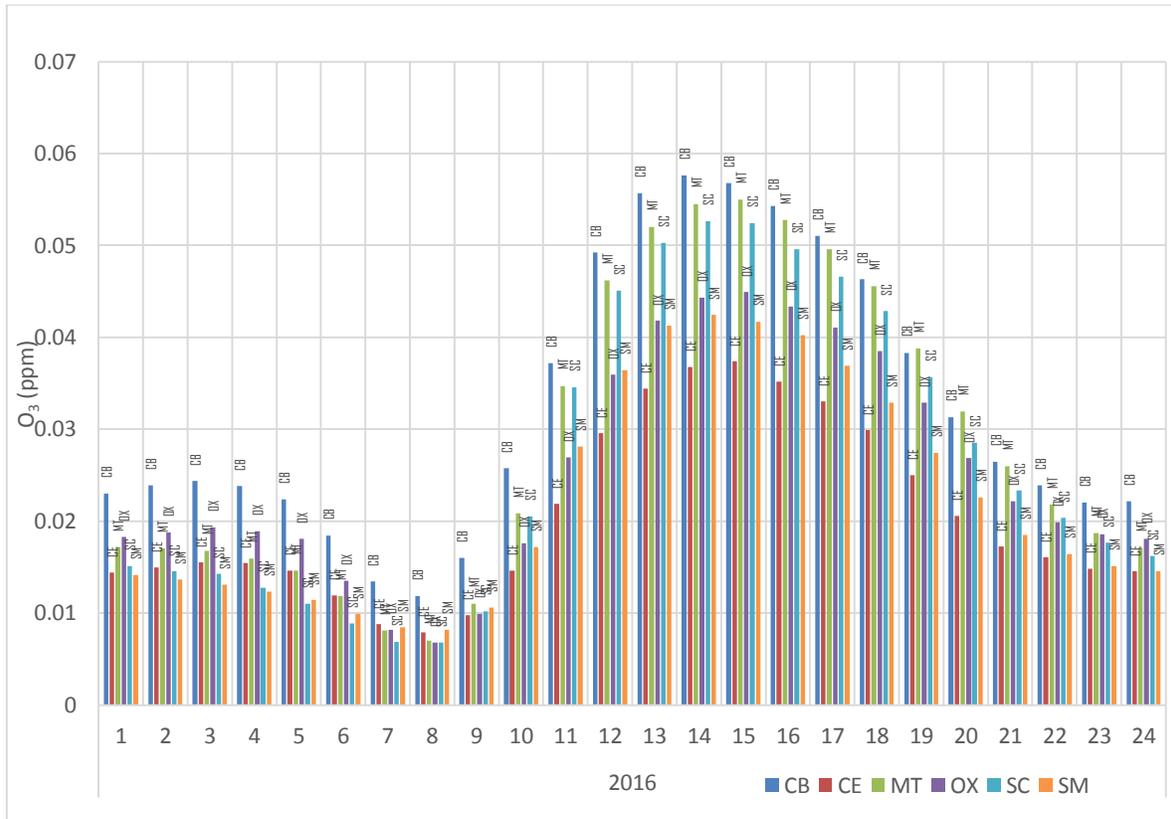
Por otro lado, enero y noviembre tienen los promedios más bajos de las concentraciones de O<sub>3</sub> del 2016, las cuales van por debajo de los 0.023 ppm sin contar los 0.029 ppm de la estación CB de noviembre.

**5.1.6.4 Concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2016**

En el año 2016 los promedios más altos de las concentraciones de O<sub>3</sub> clasificados por hora se presentaron entre las 12:00 a 18:00 horas, teniendo cerca del vértice la hora 14:00 en un intervalo de 0.036 ppm en CE a 0.057 en CB. La estación CB se

encuentra por encima del promedio del resto de las estaciones seguida por las estaciones SC y MT a lo largo del año en clasificación por horas del día.

**Gráfica 34 Promedio de las concentraciones de O<sub>3</sub> por hora año 2016**



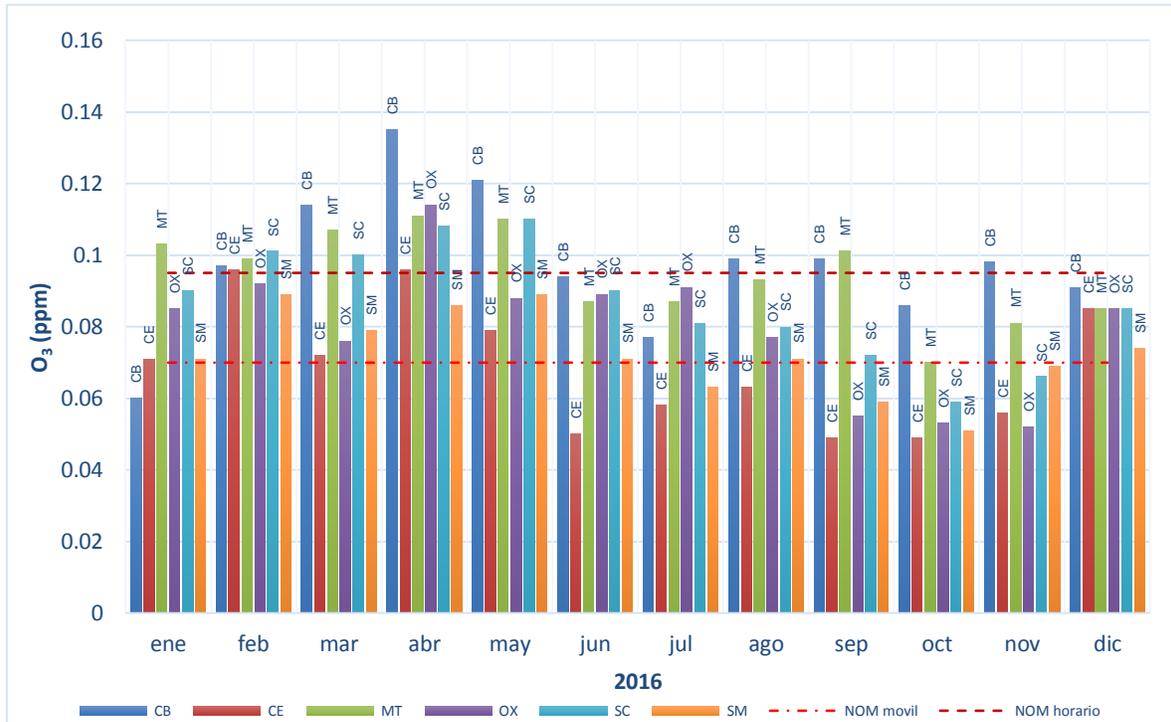
Así mismo, las horas con los promedios más bajos en el día son las 07:00 y 08:00 con rangos de 0.006 ppm en estación SC en la hora 7 y en OX y SC en la 8 a las 0.013 ppm en CB a la hora 7.

**5.1.6.5 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes año 2016**

Los primeros meses del año 2016 están por encima de los 0.075 ppm correspondiente al LMP del promedio horario de la NOM en más de la mitad de las estaciones, en el caso de los meses que superan el promedio móvil o bien las 0.095 ppm son menos que anteriores años, ya que, sólo son los meses de enero a mayo y septiembre los que superan el LMP móvil. Enero encuentra su máximo en la

estación MT con .0103ppm, febrero en las estaciones CB, C, MT y SC en un rango de las 0.096 ppm a las 0.101ppm, marzo en las estaciones SC, Mt, y CB de 0.100 ppm a 0.114 ppm, abril en CB, MT, OX y SC de 0.108 ppm a 0.135 ppm, mayo en MT y SC con 0.110ppm y septiembre en CB y MT con 0.099 a 0.101 ppm.

**Gráfica 35 Registros máximos de O<sub>3</sub> por mes del año 2016**



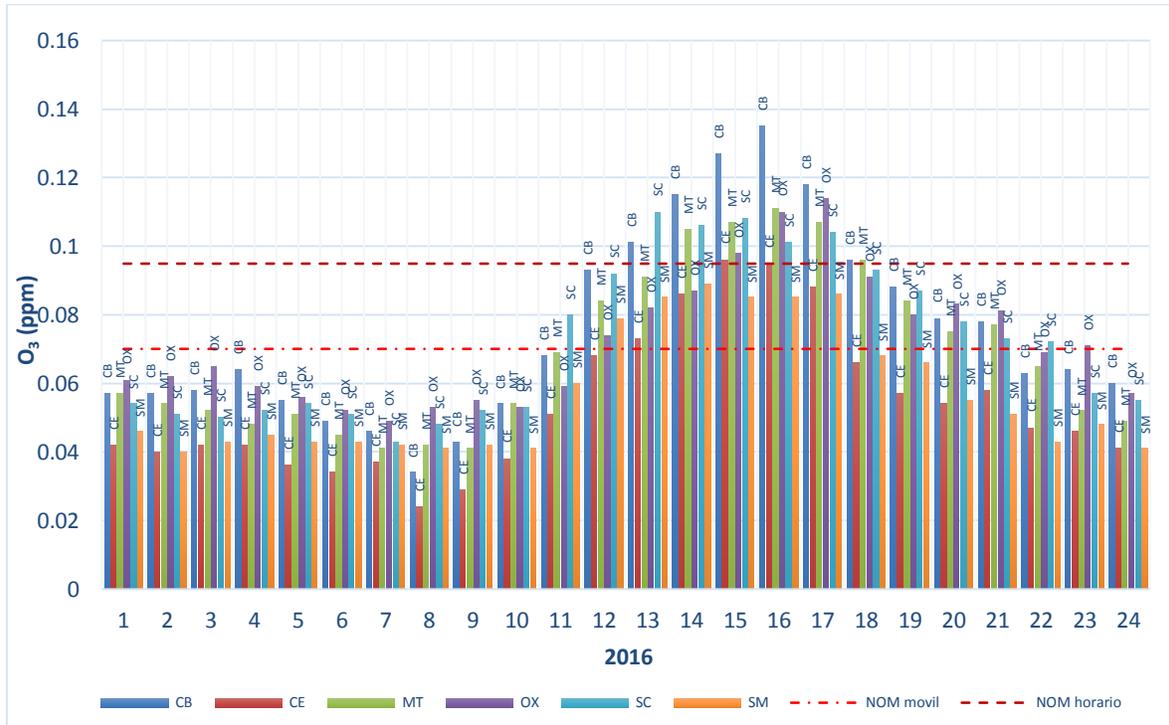
Por el contrario, los meses con los máximos más bajos son octubre y noviembre con 0.049 ppm en CE en octubre a 0.81 de MT, sin contar los valores anormales de CB con 0.086 ppm y 0.098 ppm para estos meses correspondientemente.

**5.1.6.6 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2016**

Las horas con los máximos más altos durante las 24 horas del día registrados durante el 2016 y que van por encima del LMP móvil son desde las 11:00 a las 21:00 horas, siendo aquellas horas que supera el LMP horario, o que se acercan al vértice

de la gráfica, las horas de entre las 13:00 a las 17:00 llegando hasta las 0.135ppm de CB en la hora 16 del día 05 de abril. Las estaciones que permanecen por encima de las demás es la estación CB seguida por SC y MT.

**Gráfica 36 Registros máximos de O<sub>3</sub> por hora del 2016**



Los máximos más bajos registrados están en la hora 07:00 con registros de entre las 0.037ppm de CE a 0.049 ppm de OX.

## 5.2 Análisis de todos los años de las estaciones

### 5.2.1 Por años

En esta segunda parte del capítulo dos, con las gráficas se pretende demostrar, primero, si existió entre los años del 2011 a 2016 una variabilidad climática, para después revisar la evolución de la temperatura y las concentraciones de O<sub>3</sub> a lo

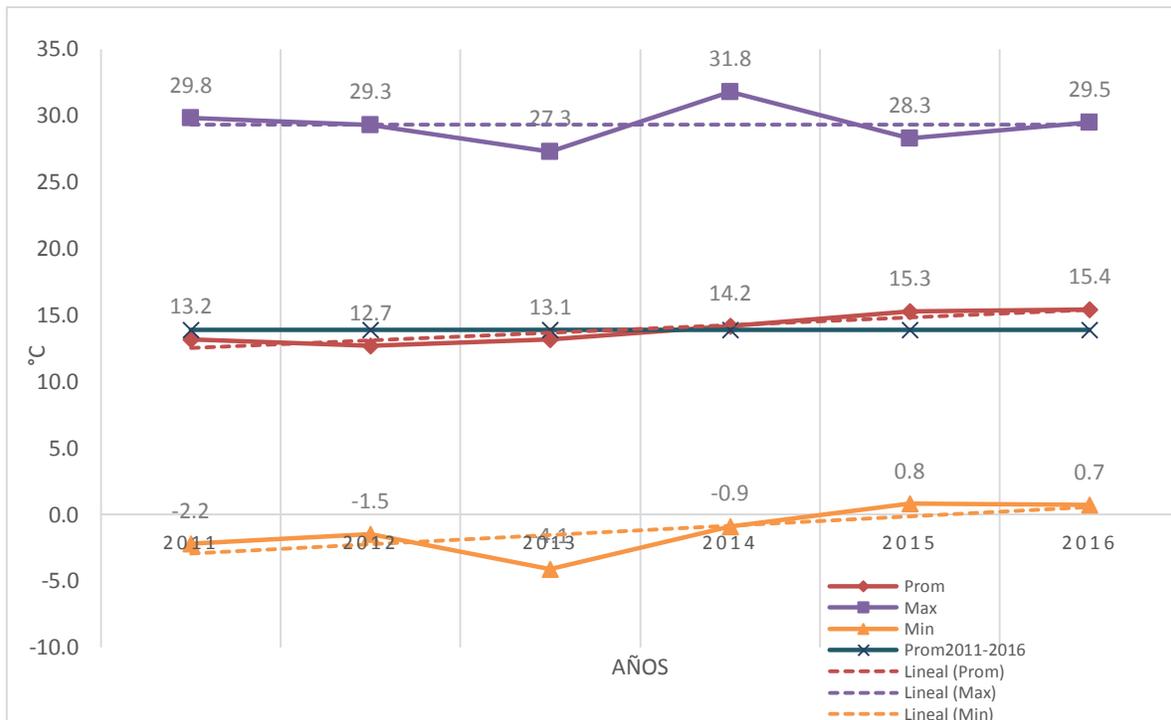
largo de estos años, así como ubicar cual o cuales de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT registran mayores valores, pudiendo demostrar si se ha presentado cambios significativos en este lapso.

5.2.1.1 *Temperatura años 2011-2016*

La gráfica 37, fue realizada con los promedios totales por año, se sumaron los datos válidos y se dividió entre el número de ellos, también, se tomaron en cuenta los valores máximos y mínimos de cada año, se agregaron las líneas de tendencia y el promedio de los seis años usado en las gráficas de temperatura pasada.

Mostrando que, la temperatura más alta se presentó en el año 2014 con 31.8 °C, año en el que los promedios fueron aumentando con significancia. Por el contrario, el año que antecedió a este, el 2013, registro de los seis años en cuestión el valor más bajo con -4.1 °C.

Gráfica 37 Promedio anual de temperatura de 2011-2016

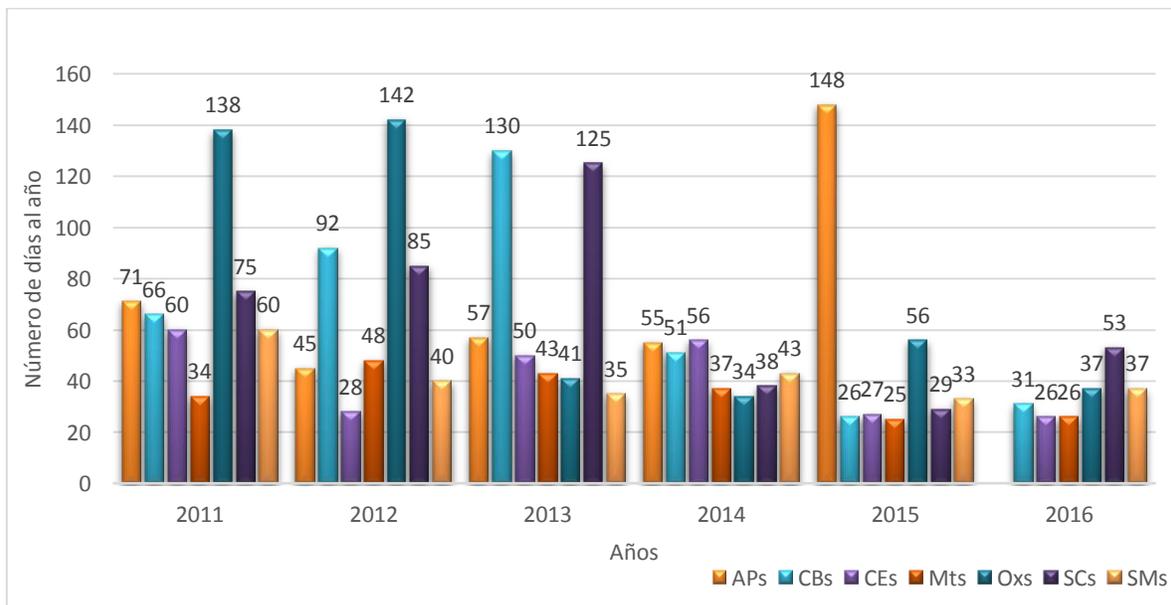


En conclusión, a esta gráfica, se dice que hubo un aumento de la temperatura en los promedios, debido a que el año 2011 registro un promedio de 13.2°C, y el 2016 de 15.4 °C, habiendo entre éstos una diferencia de 2.2 °C, lo que indica que la ZMVT durante este lapso ha presentado una variabilidad en la temperatura importante, puesto que también los mínimos de cada año registrados fueron cada vez más altos.

5.2.1.2 Ozono años 2011-2016

En la gráfica 38, fueron tomados en cuenta los días en los que el limite móvil (0.070ppm) fue rebasado por lo menos en una hora en las diferentes estaciones, para después sumar el total de estos días por mes y finalmente por año. Teniendo como resultado que, a pesar de que en los años 2011-2013 la norma 020 era menos estricta (0.110 ppm y 0.080 ppm respectivamente), estos valores son aún más altos que estas determinantes, mostrándose así que esto años tuvieron notoriamente más exposición al O<sub>3</sub>, principalmente en la estación Oxtotitlán y Centro.

Gráfica 38 Días al año excedentes de la NOM-020-SSA1-2014



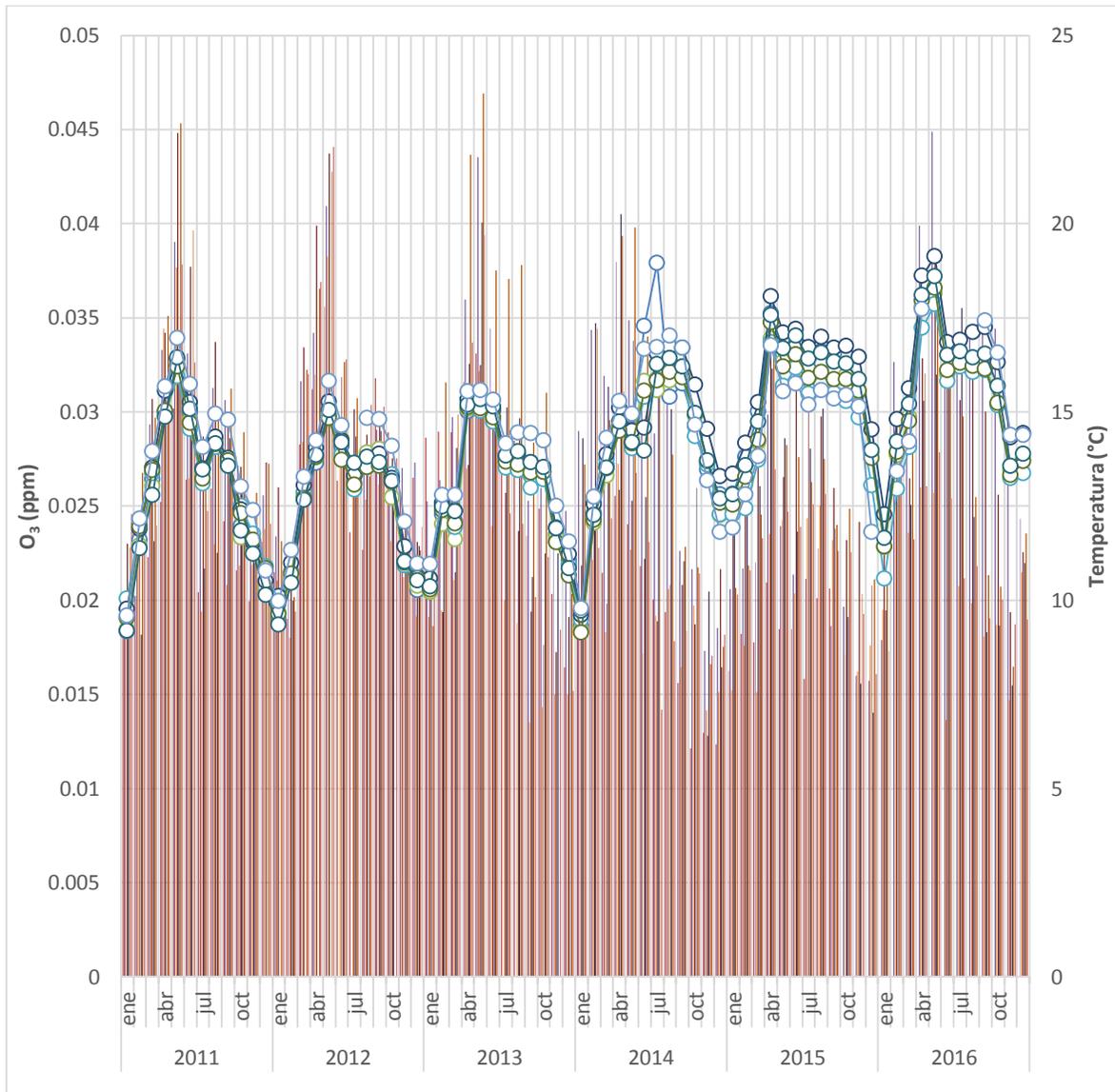
A su vez, del 2014 al 2016 el número de días que excedieron la norma son más bajos que los anteriores, teniendo anomalías en la estación aeropuerto que registró 148 días en el año 2015, así como 53 días en la estación San Cristóbal en el 2016.

### *5.2.1.3 Promedios de O<sub>3</sub> y temperatura de los meses del 2011-2016*

Durante los doce meses de los siete años del 2011 al 2016 los promedios de las mayores concentraciones de O<sub>3</sub> permanecen en los meses de abril a junio, es decir a la época de primavera y verano, y las menores entre los meses de noviembre a febrero que corresponden a los meses de otoño e invierno, comportamiento que atañe también a los promedios de las temperaturas aumentando y disminuyendo en los mismos lapsos.

También se observa que las concentraciones de O<sub>3</sub> en el 2012 fueron menores respecto al 2011 y al 2013, al igual que las temperaturas de los mismos años, consecutivamente, para el año 2014 los promedios de las concentraciones volvieron a bajar en relación con los años anteriores, al contrario de la temperatura que subió sus promedios; en el 2015 las temperaturas mantuvieron sus promedios en el mismo nivel que el 2014, en cuanto al O<sub>3</sub>, este año es el que menores promedios de las concentraciones se registraron. Por último, en el 2016 ambas variables suben conjuntamente en proporción al 2015.

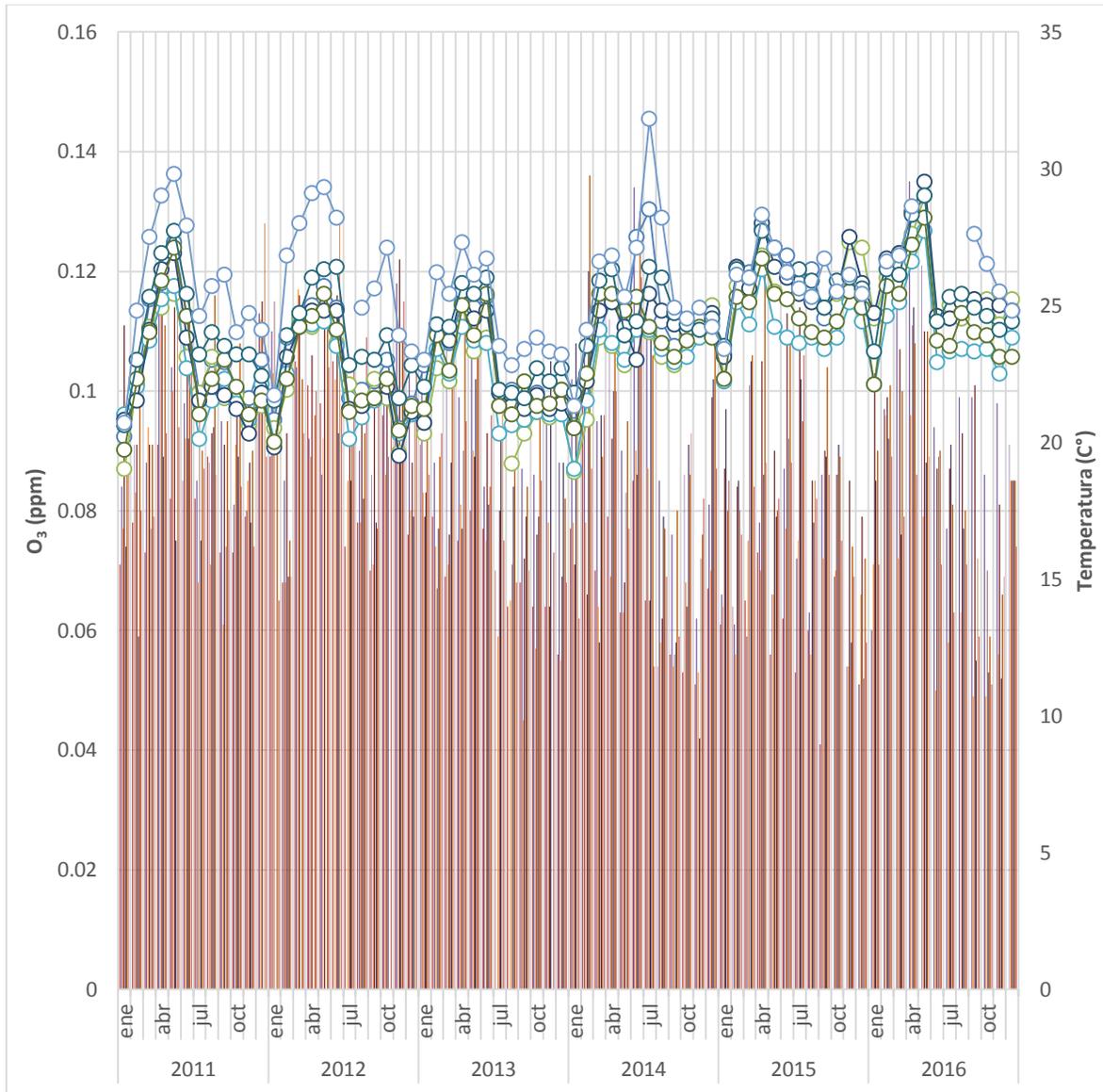
**Gráfica 39 Promedios de O<sub>3</sub> y temperatura por mes (2011-2016)**



*5.2.1.4 Registros máximos de O<sub>3</sub> y temperatura de los meses del 2011-2016*

Durante los doce meses de los siete años del 2011 al 2016 los registros máximos de las concentraciones de O<sub>3</sub> no tienen un patrón regular en los meses de cada año, del mismo modo los registros máximos de las temperaturas tampoco aumentaron o disminuyeron en ciertos meses, aunque si se observó que entre los máximos de O<sub>3</sub> las temperaturas coinciden en como suben y bajan.

**Gráfica 40 Registros máximos de O<sub>3</sub> y temperatura por mes (2011-2016)**

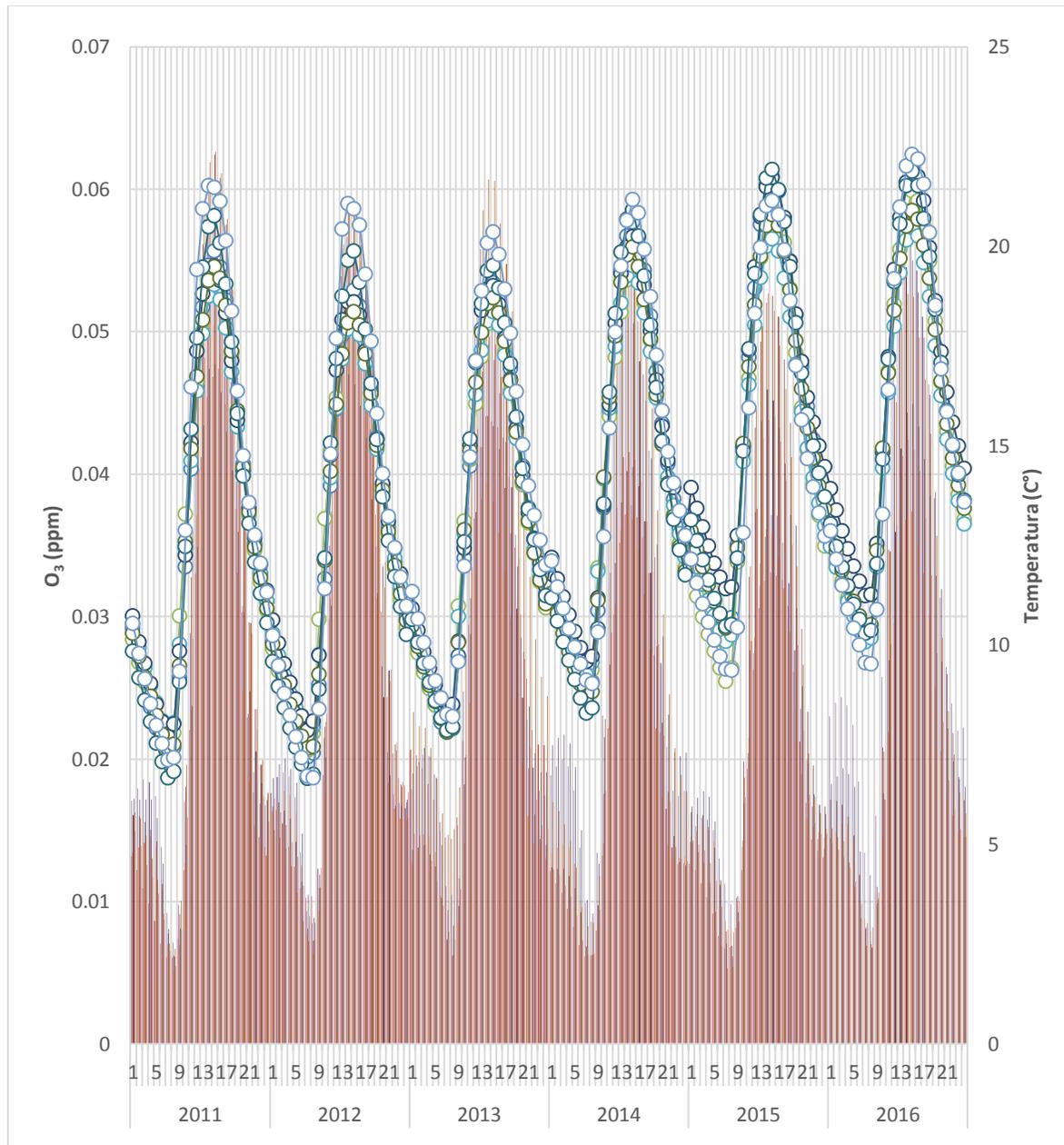


También se observa que las concentraciones máximas de O<sub>3</sub> registradas en el 2012 fueron un poco mayores respecto al 2011 y al 2013, por otro lado, las temperaturas de los mismos años se mantienen en un mismo rango. Para el año 2014 los máximos de las concentraciones de O<sub>3</sub> volvieron a bajar en relación con los años anteriores, al contrario de la temperatura que subió sus máximos; en el 2015 las temperaturas mantuvieron sus máximos en el mismo nivel que el 2014, en cuanto

al  $O_3$ , este año registra máximos constantes. Por último, en el 2016 ambas variables suben conjuntamente en proporción al 2015.

5.2.1.5 Promedios de  $O_3$  y temperatura de las horas del 2011-2016

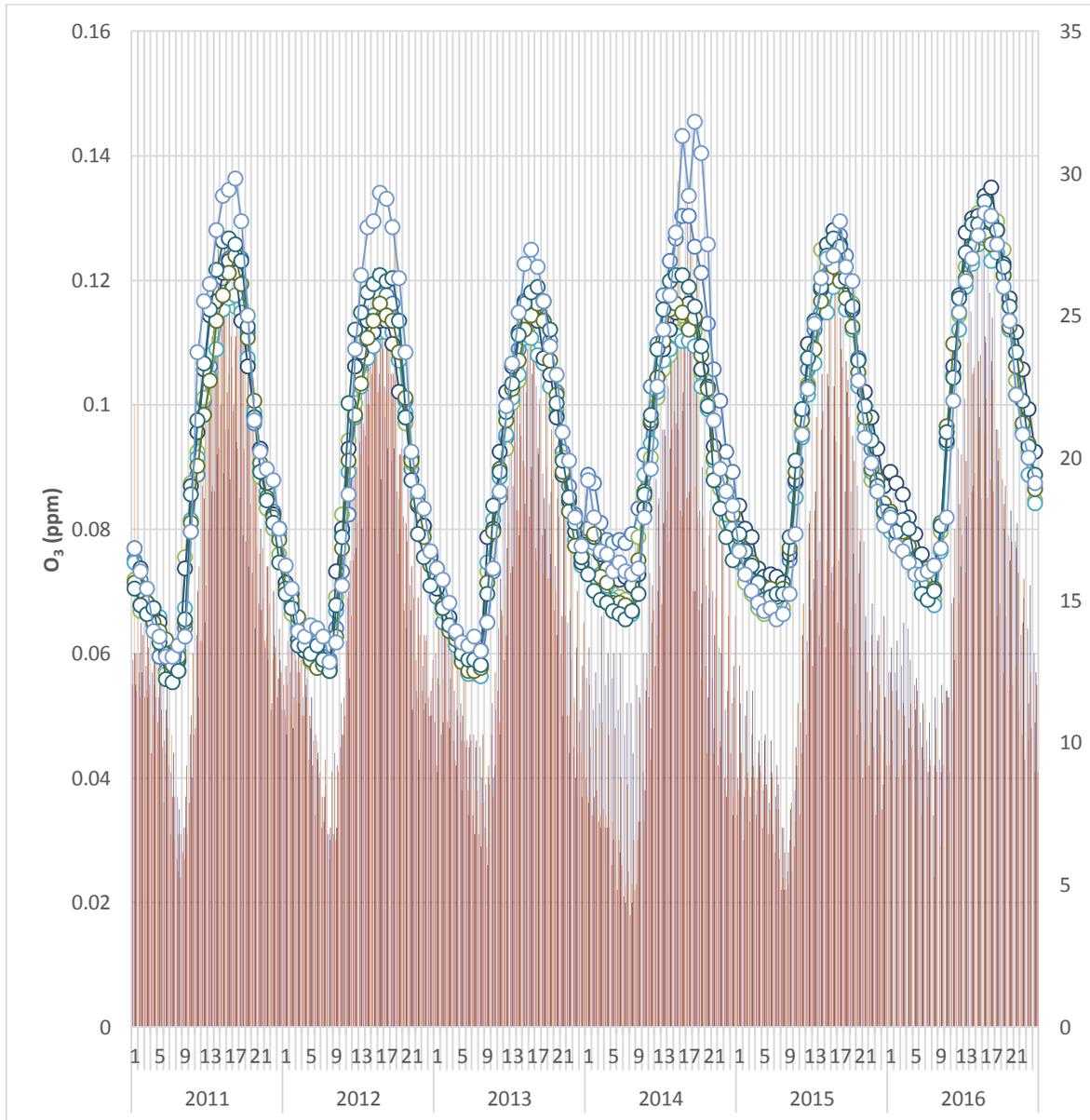
Gráfica 41 Promedios de  $O_3$  y temperatura por hora (2011-2016)



Los promedios de las concentraciones de  $O_3$  y temperatura en el 2012 fueron menores respecto al 2011 y el 2013, así mismo los promedios del 2014 fueron más bajas que las del 2012. Los promedios del 2015 son los más bajos de los seis años en estudio, a pesar de eso, en el 2016 los promedios volvieron a subir.

5.2.1.6 Registros máximos de  $O_3$  y temperatura de las horas del 2011-2016

Gráfica 42 Promedios máximos de  $O_3$  y temperatura por hora (2011-2016)



Los máximos de las concentraciones de  $O_3$  y temperatura en el 2012 fueron menores respecto al 2011, de igual forma en el 2013 estos máximos fueron menores, los máximos del 2014 estuvieron más bajos que los del 2012. Los promedios del 2015 son los más bajos de los seis años en estudio, a pesar de eso, en el 2016 los promedios volvieron a subir.

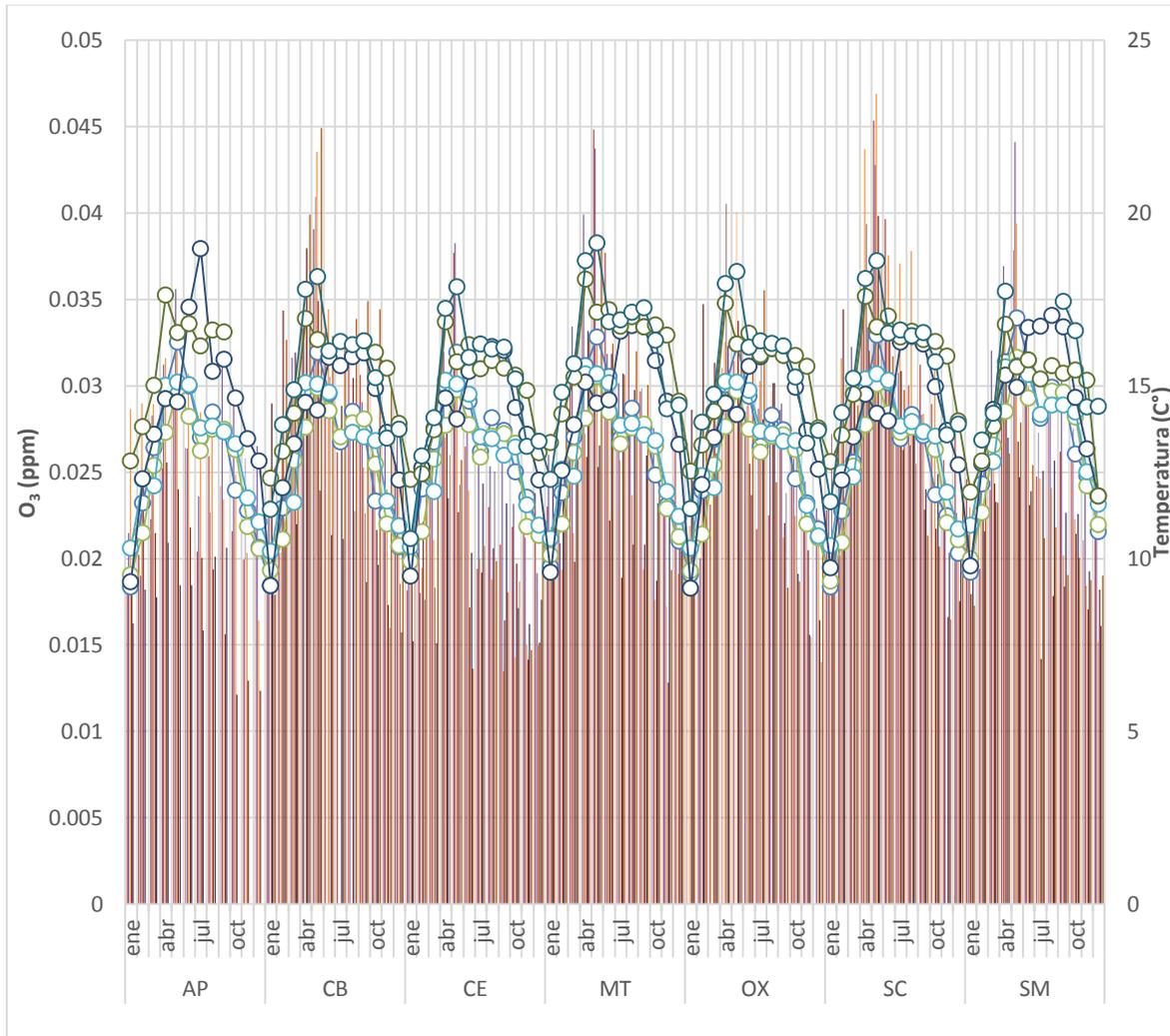
### 5.2.2 Por estaciones

En esta parte, con las gráficas se pretende demostrar la evolución de la temperatura y las concentraciones de  $O_3$  en las estaciones de la RAMA-ZMVT a lo largo de los años 2011-2016, pudiendo demostrar si han presentado cambios significativos durante los seis años del estudio.

#### 5.2.2.1 *Promedios por estación de $O_3$ y temperatura de los meses del 2011-2016*

Las estaciones que tienen promedios más altos de los seis años del 2011-2016 son San Cristóbal, Ceboruco y Metepec. Los promedios más bajos los tiene la estación de CE. Por el contrario, Aeropuerto y Centro son las estaciones con los promedios durante el año más bajos.

**Gráfica 43 Promedios de O<sub>3</sub> y temperatura de los meses por estación**

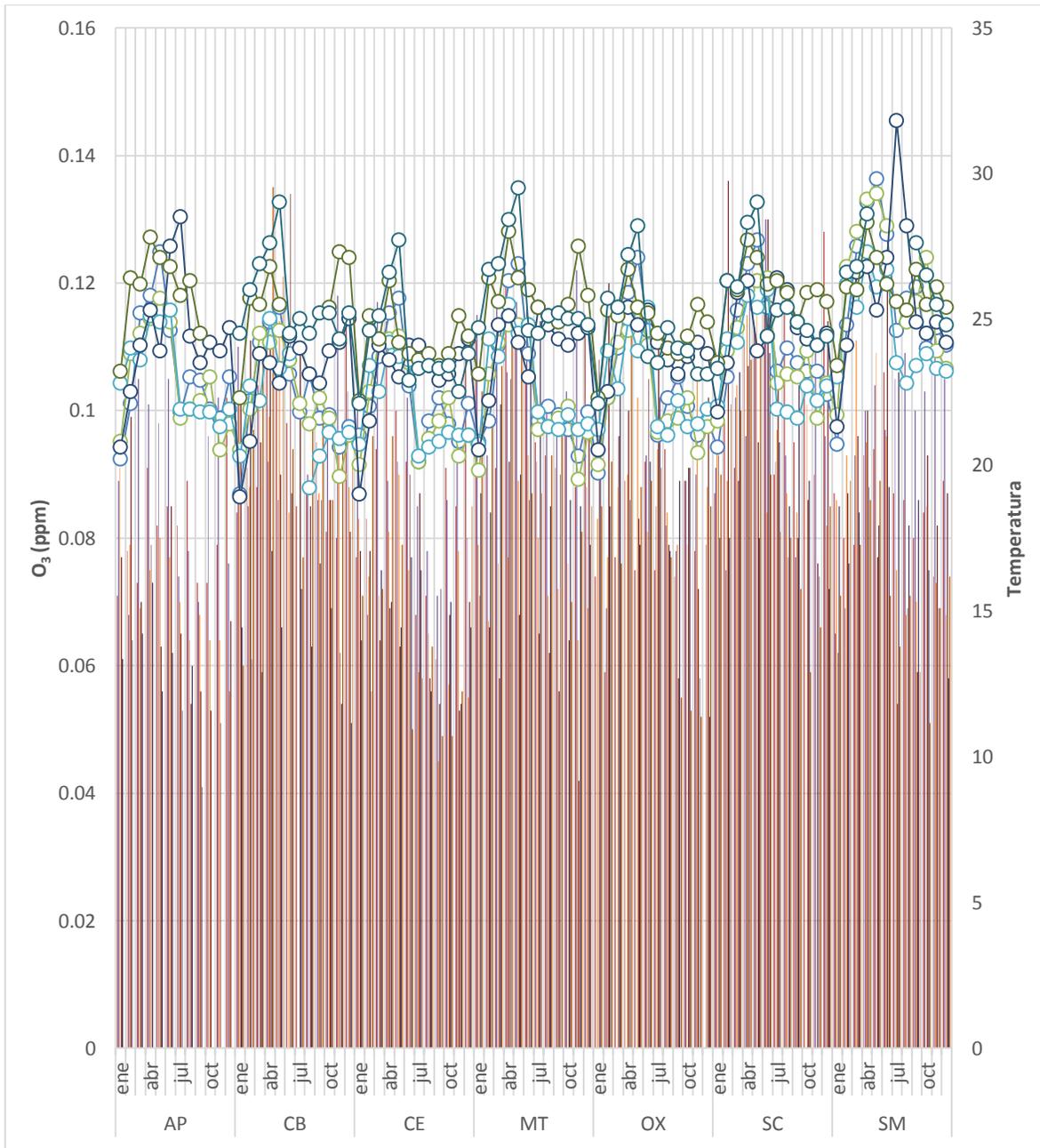


*5.2.2.2 Registros máximos por estación de O<sub>3</sub> y temperatura de los meses del 2011-2016*

La gráfica 44. Muestra que las estaciones que tienen los máximos más altos de los seis años, del 2011-2016, son San Cristóbal, Ceboruco y Metepec, coincidiendo de esta forma con la gráfica anterior.

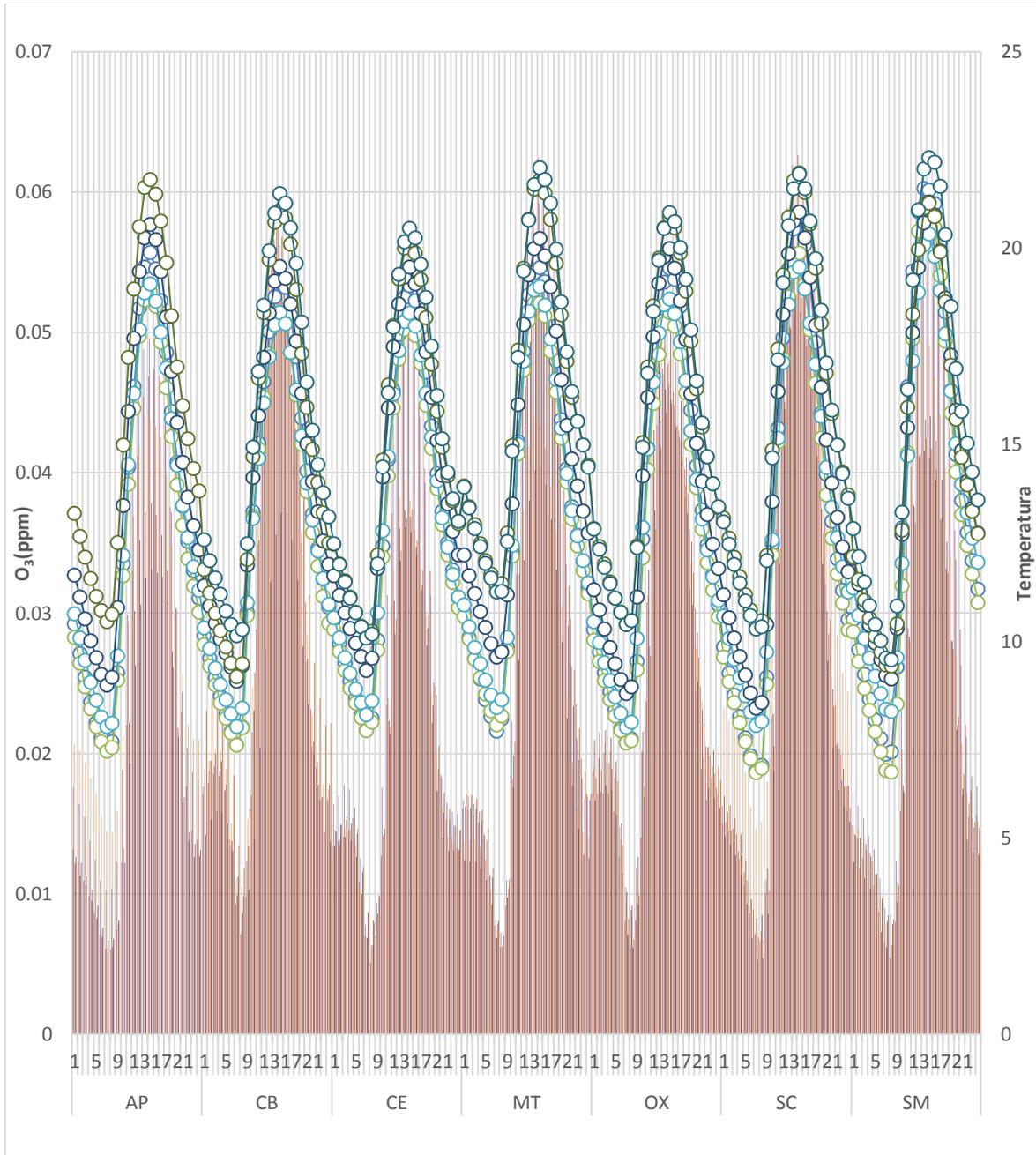
Del mismo modo, los máximos más bajos los tienen también las estaciones de Aeropuerto y Oxtotitlán.

Gráfica 44 Registros máximos de O<sub>3</sub> y temperatura de los meses por estación



5.2.2.3 Promedios por estación de  $O_3$  y temperatura de las horas del 2011-2016

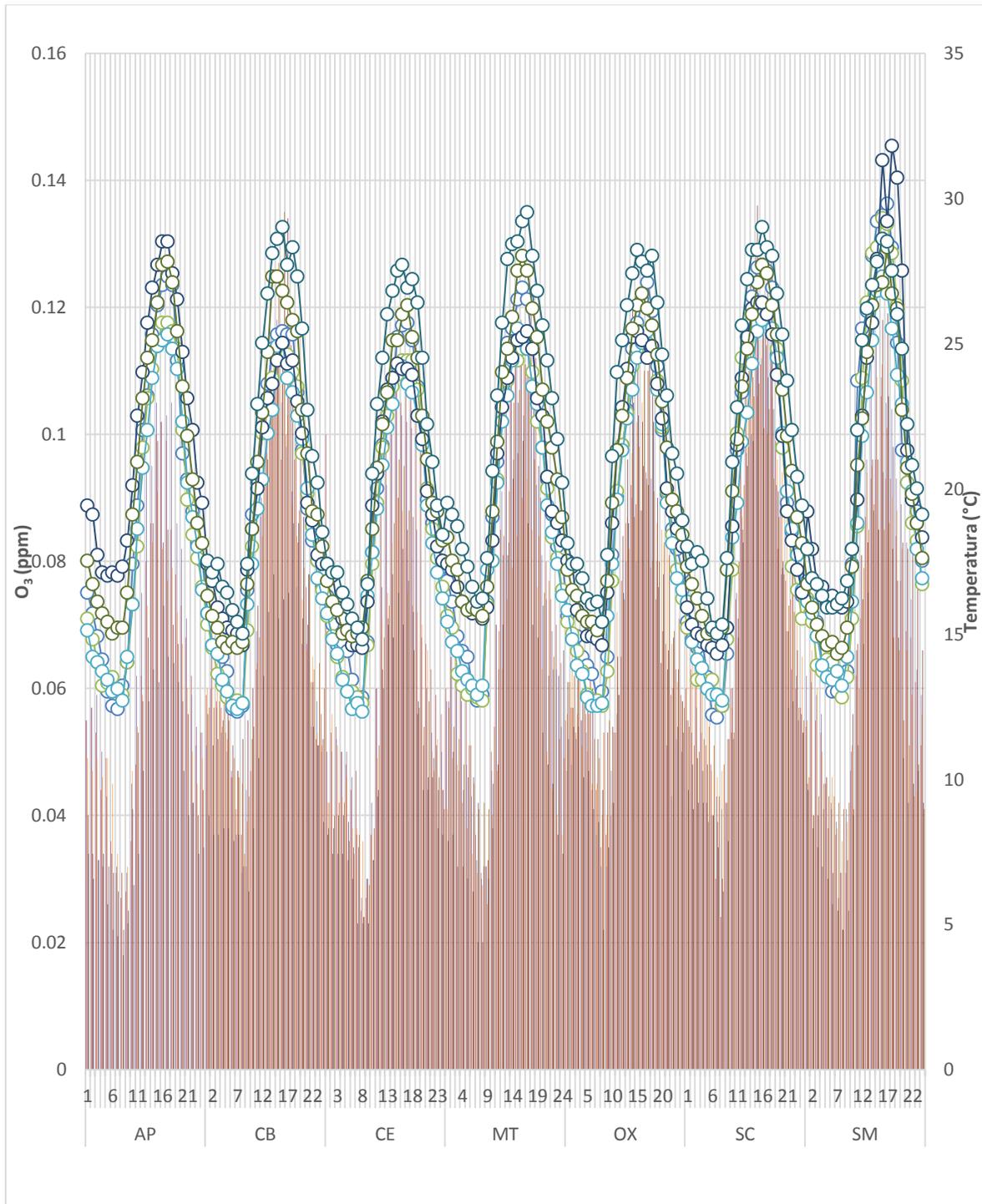
Gráfica 45 Promedios de  $O_3$  y temperatura de las horas por estación



Las estaciones que cuentan con los promedios más altos por horas durante los años 2011-2016 es la estación SC seguida por CB y MT, por el contrario, los promedios más bajos pertenecen a la estación CE y luego AP.

5.2.2.4 Registros máximos por estación de  $O_3$  y temperatura de las horas del 2011-2016

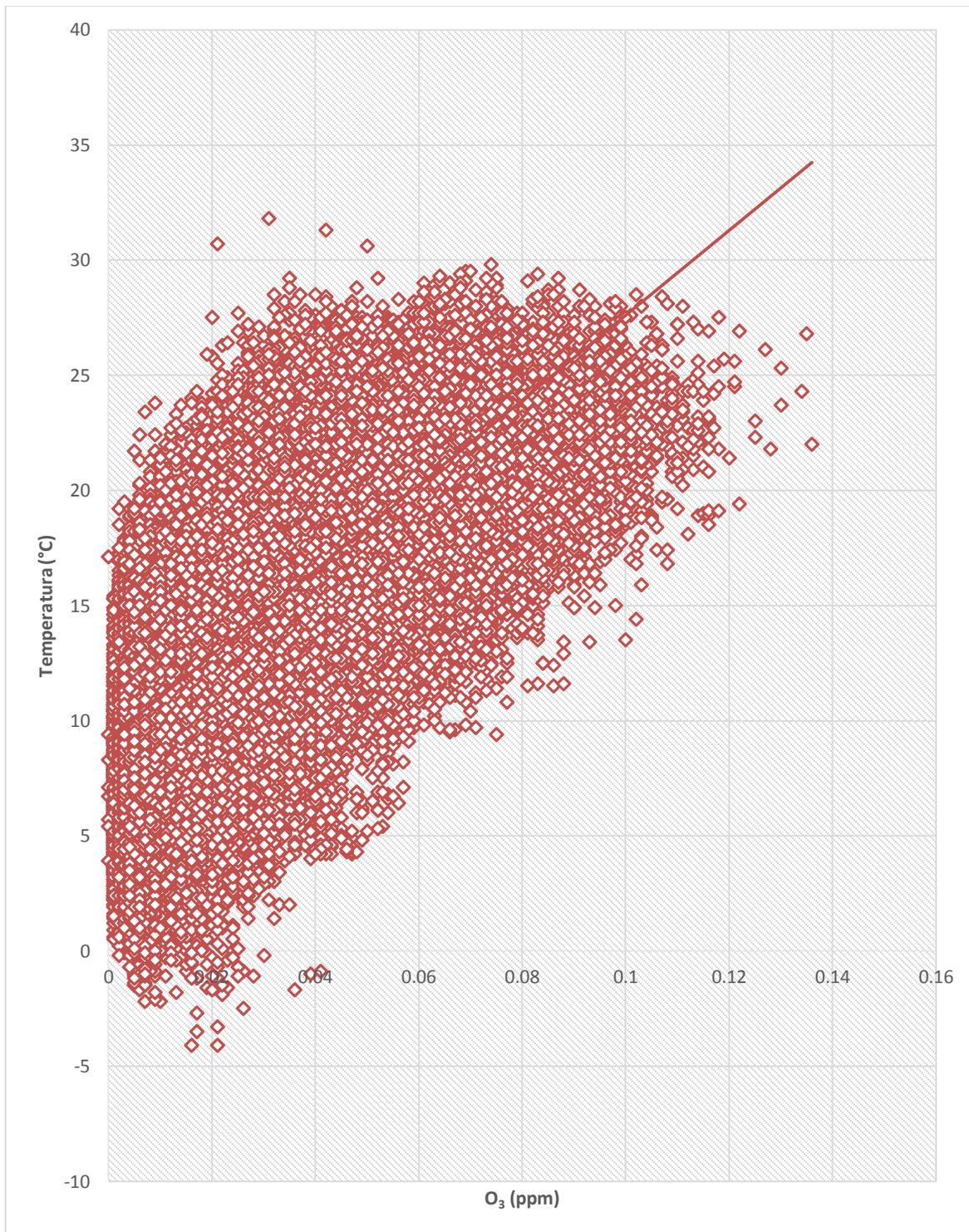
**Gráfica 46 Registros máximos de  $O_3$  y temperatura de las horas por estación**



Las estaciones que cuentan con los máximos más altos por horas durante los años 2011-2016 es la estación SC seguida por CB y MT, por el contrario, los promedios más bajos pertenecen a la estación CE y luego AP.

### 5.3 Correlación de concentraciones de $O_3$ y temperatura

Gráfica 47 Diagrama de dispersión entre  $O_3$  y temperatura



En la gráfica 47, se muestra el diagrama de dispersión de las concentraciones de O<sub>3</sub> y la temperatura, dando un resultado de coeficiente de correlación de Pearson de 0.7133, lo que indica que es una correlación alta, es decir, que la temperatura y el O<sub>3</sub> están relacionados entre sí, ya que si bien es un comportamiento natural en la atmósfera de estas dos variables, el contraste de estos resultados con las gráficas anteriores muestra que la ZMVT ha presentado una variabilidad en la temperatura y por tanto en las concentraciones de O<sub>3</sub>.

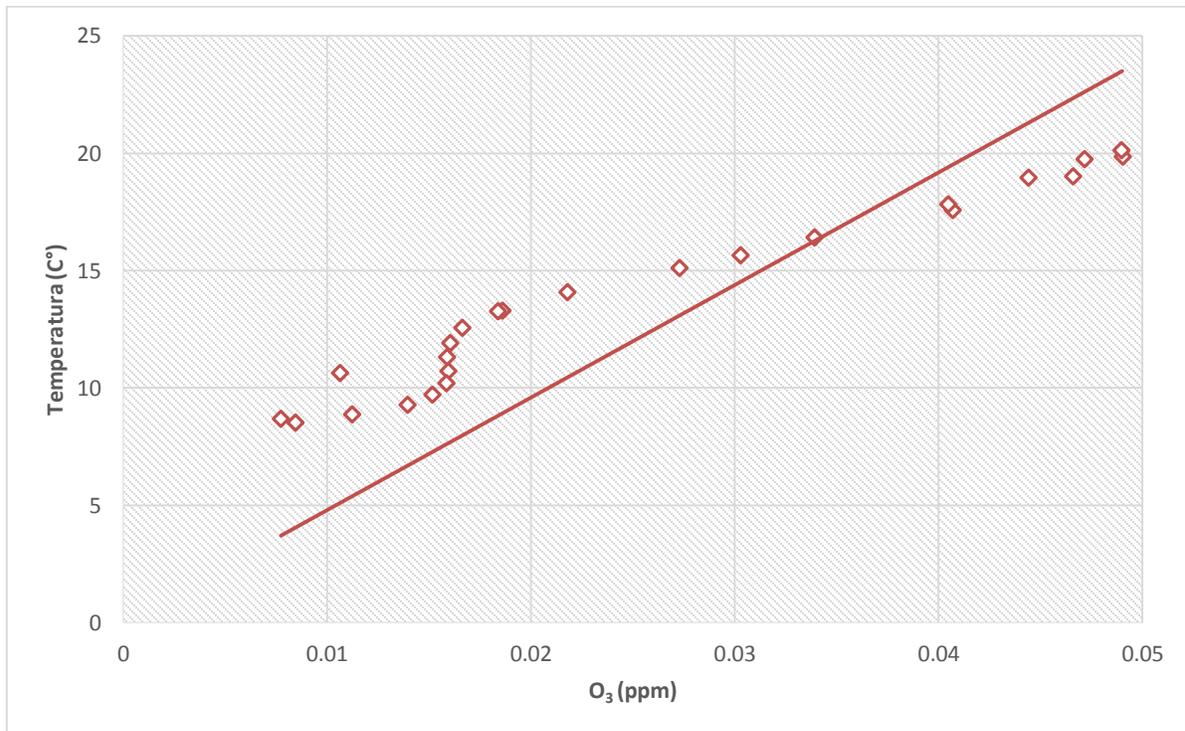
Para dejar claro, la relación entre éstas dos variables como se ha visto en todo el apartado de los resultados, se tomaron en cuenta los promedios primero por horas y después de los meses por todos los años en estudio.

**Tabla 14 Datos de correlación. Promedios por hora de todos los años**

| <b>Horas</b> | <b>Ozono</b> | <b>Temperatura</b> |
|--------------|--------------|--------------------|
| 1            | 0.015872     | 11.30095           |
| 2            | 0.015933     | 10.71369           |
| 3            | 0.015843     | 10.19286           |
| 4            | 0.015165     | 9.708284           |
| 5            | 0.013919     | 9.265686           |
| 6            | 0.01123      | 8.862292           |
| 7            | 0.008427     | 8.522629           |
| 8            | 0.007721     | 8.687954           |
| 9            | 0.010631     | 10.63815           |
| 10           | 0.018596     | 13.27698           |
| 11           | 0.030264     | 15.64431           |
| 12           | 0.040682     | 17.57276           |
| 13           | 0.046592     | 19.0165            |
| 14           | 0.049014     | 19.85815           |
| 15           | 0.048966     | 20.12005           |
| 16           | 0.047151     | 19.74484           |
| 17           | 0.044395     | 18.94864           |
| 18           | 0.040446     | 17.82471           |
| 19           | 0.033899     | 16.41045           |
| 20           | 0.027265     | 15.11312           |
| 21           | 0.021765     | 14.08263           |
| 22           | 0.018362     | 13.2728            |
| 23           | 0.016622     | 12.55378           |
| 24           | 0.016027     | 11.9104            |

Primeramente, en la tabla 15 se muestran los promedios obtenidos por hora utilizados para el diagrama de dispersión, de la gráfica 48, el cual muestra que el coeficiente de correlación de Pearson del promedio de las 24 horas del día durante los seis años de las siete estaciones de las concentraciones de  $O_3$  y temperatura es de 0.9779 indicando así una alta correlación, es decir, que la temperatura y el  $O_3$  están relacionados de forma positiva directa. Ya que se observa que, a mayor actividad solar, mayores concentraciones de  $O_3$  se encuentran.

**Gráfica 48 Diagrama de dispersión de los promedios de  $O_3$  y temperatura por hora**



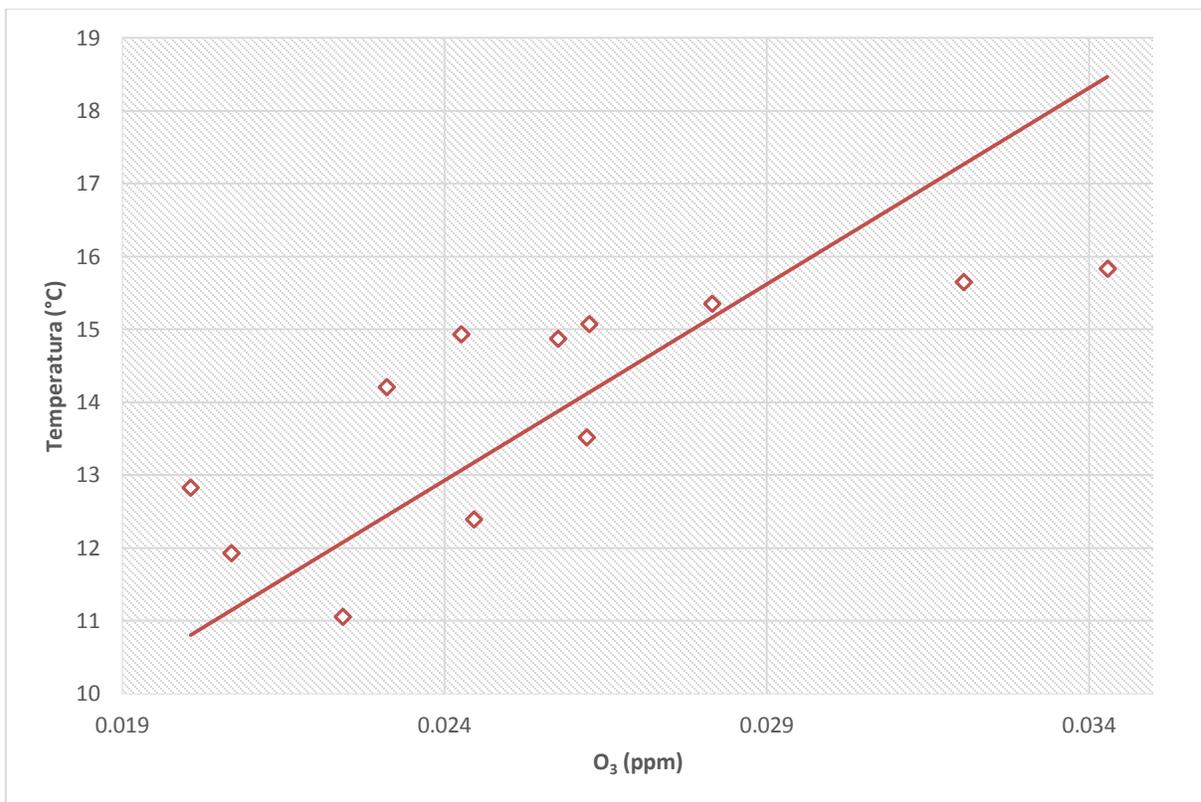
En segundo lugar, como ya se ha mencionado se usaron los promedios de las temperaturas por meses de los seis años, mostrados en la tabla 16.

**Tabla 15 Datos de correlación. Promedios por mes de todos los años**

| Meses | Ozono    | Temperatura |
|-------|----------|-------------|
| ene   | 0.022418 | 11.05767    |
| feb   | 0.024453 | 12.38975    |
| mar   | 0.026208 | 13.51994    |
| abr   | 0.032056 | 15.64922    |
| may   | 0.034287 | 15.83003    |
| jun   | 0.028152 | 15.35191    |
| jul   | 0.025756 | 14.87458    |
| ago   | 0.02624  | 15.06873    |
| sep   | 0.024254 | 14.93454    |
| oct   | 0.023099 | 14.20687    |
| nov   | 0.020061 | 12.82463    |
| dic   | 0.020686 | 11.92871    |

Mostrados en la gráfica 49 mediante un diagrama de dispersión, demostrando que el coeficiente de correlación de Pearson del promedio de los doce meses durante los seis años de las siete estaciones de las concentraciones de O<sub>3</sub> y temperatura es de 0.7613, siendo una correlación aceptable ya que supera los 0.5 presentando también entre las variables una relación de forma positiva directa. Esto también demostrado en gráficas anteriores ya que en los meses correspondientes a la época de primavera y verano hubieron concentraciones más altas, en contraste que en las épocas de otoño e inviernos éstas se mantuvieron por debajo de los demás.

Gráfica 49 Diagrama de dispersión de los promedios por mes



# Conclusiones y recomendaciones

En el primer objetivo particular de la presente investigación se planteo contextualizar y delimitar el área de influencia de las 7 estaciones de la RAMA-ZMVT para la medición de la calidad de aire, así como la representatividad de éstas dentro de los municipios de Zinacantepec, Toluca, Ocoyoacac, San Mateo Atenco, Xonacatlán, Lerma y Metepec; concluyendo que a pesar de que en términos de la calidad del aire se han considerado éstas 7 estaciones como parte representativa del estado de la atmósfera para el territorio de los 7 municipios, e incluso para los 22 municipios de la ZMVT, los lugares de muestreo no son suficientes, ya que si se toma en cuenta el radio máximo de influencia de las estaciones (6 km) únicamente se abarcan en su totalidad los municipios de San Mateo y Metepec, un gran porcentaje de Toluca y una pequeña parte de Lerma y Zinacantepec; faltando los municipios de Xonacatlán y Ocoyoacac.

A su vez, se observó que, aunque estos sitios de muestreo se encuentran dentro de las zonas de desarrollo industrial con mayor contribución de emisiones a la atmosfera de los gases y COVs impulsores de O<sub>3</sub>, no son suficientes para decidir sobre las medidas de acción, y que incluso, el sistema de monitoreo en la zona llega a ser ineficiente, por lo que los esfuerzos por medir la contaminación atmosférica dentro de estos municipios y toda el área metropolitana, deber ser mayores, aumentando la precisión y confiabilidad de los datos.

Los siguientes dos objetivos particulares, buscaron procesar los datos obtenidos de la RAMA-ZMVT por promedios y máximos registrados por mes, año y estación para el caso de las concentraciones de O<sub>3</sub>, encontrando que; en los diferentes años analizados del 2011 al 2016, el 2011 es el año con los promedios de las temperaturas y las concentraciones de O<sub>3</sub> más altos seguido por el año 2012, por el contrario, el año 2015 es el que registró las concentraciones de O<sub>3</sub> más bajas de los seis años involucrados en la investigación, observando que el año 2016 en lugar de verse más bajo en los valores que el 2015 presentó un incremento de hasta 2°C de temperatura y de 0.01 ppm de O<sub>3</sub>. Resaltando que entre los años no existe un patrón regular de comportamiento de ambas variables.

A su vez, los máximos registrados a lo largo de los seis años en estudio tampoco muestran un patrón regular entre ambas variables, pero si muestran un rango de entre los 0.105 ppm a los 0.136 ppm en el caso del O<sub>3</sub>, y de los 25°C a los 30°C de temperatura.

Por otro lado, los meses con más presencia de O<sub>3</sub> y de temperatura durante los años son los de abril a junio, es decir, los meses con mayor temperatura a lo largo de los años pertenecientes al verano. Por el contrario, los meses que registran concentraciones de O<sub>3</sub> y temperaturas menores son los meses más fríos, época de invierno) comenzando por noviembre a febrero. También podemos resaltar que el mes de diciembre no es un mes con concentraciones de O<sub>3</sub> altos a pesar de las fechas y las tradiciones que puedan emitir los gases impulsores de O<sub>3</sub>.

En adición a lo anterior, las horas del día con más concentraciones son las horas después de las 11:00 a las 18:00, siendo las 15:00 horas en las que se tiene la mayor exposición de O<sub>3</sub> en todos los años, meses y estaciones, tal es el caso también del comportamiento de los registros de temperatura

Al contrario de esto, las horas sin presencia de la luz solar, es decir, las primeras y las últimas horas del día son las que permanecen por debajo de las concentraciones de las 24 horas del día, es decir de los 0.025 ppm, al igual que los registros de temperatura.

Para los registros máximos, una gran parte de estos datos están por encima de los 0.075 ppm correspondiente al LMP del promedio horario de la NOM -020 en por lo menos dos estaciones, en el caso de los meses que superan el promedio móvil o bien las 0.095 ppm son los meses de marzo, abril, junio, julio y septiembre en las estaciones MT, SC y OX principalmente, estaciones que se distribuyen a lo largo de las regiones establecidas por la RAMA-ZMVT (norte, sur y centro). Tal es el mismo comportamiento de los máximos de temperatura en los mismos meses.

Para finalizar, las estaciones SC y CB, de las regiones norte y sur, son las estaciones con las concentraciones de O<sub>3</sub> y temperaturas más altas de los años del 2011-2016, y por el contrario las más bajas pertenecen a la estación AP, lo cual no

justifica que esta última se haya cerrado por estar cerca del aeropuerto y el posible sesgo.

Los máximos registrados por estación durante los seis años en cuestión se muestran regularmente distribuidos, es decir todas las estaciones registran máximos por encima de los LMP de la normatividad sin resaltar alguna, comenzando por los primeros tres años que a pesar de estar regidos por una norma anterior sus valores se ven elevados por mucho, mostrando un número de días excedentes de hasta 142 en el 2012, y que, aunque durante estos seis años, el número de días que salen de la norma han disminuido gradualmente, son aún mayores por lo que hay que implementar más medidas para el control de la emisión de los impulsores de Ozono, con base en que existen estudios como Quadri de la Torre & Sánchez Castaño (1992), y la Organización Mundial de la Salud (2006), que indican que los efectos del O<sub>3</sub> en la salud están más relacionados con la exposición acumulativa del sistema que con las concentraciones máximas de una hora.

El objetivo para determinar si ha existido variabilidad en la temperatura en la zona de estudio durante los años 2011-2016, dio positivo teniendo un aumento de 2.2°C con respecto a los datos en este mismo tiempo en estudio, cabe señalar que ya que se tiene un lapso reducido éste resultado puede no influir en la medición de la variabilidad en un tiempo más prolongado, aun así ésta situación si es preocupante, ya que como se ha ido mencionando el comportamiento natural de la temperatura y el O<sub>3</sub>, es que el aumento de uno propicia directamente al aumento del otro, considerando a su vez más factores como el crecimiento poblacional sobre estos siete municipios, la demanda de espacios y servicios, y el crecimiento económico puede propiciar a futuro concentraciones de O<sub>3</sub> y temperaturas aún más perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

Por último, analizar la correlación entre la Variabilidad de temperatura y la concentración de O<sub>3</sub> en el área de influencia de las 7 estaciones de la RAMA-ZMVT, a partir de los datos registrados por la RAMA-ZMVT, durante el periodo del 2011-2016 dio que: la correlación entre estas variables para este estudio dio positivamente alta con un 0.7133. Y que, la correlación entre estas variables para el

estudio dio positivamente alta con un 0.07613 para los promedios de los meses y 0.9779 para los promedios de las horas, aprobando en su totalidad la hipótesis de la investigación de que “existirá un aumento de la temperatura y las concentraciones de Ozono en los años 2011-2016, acorde con la literatura, en la zona se deberá observar esta correlación en diferentes momentos, con base en nuevas condiciones derivadas del crecimiento urbano”.

## Recomendaciones

En la búsqueda de nuevo conocimiento con base en la presente investigación se sugiere al lector:

- ✚ En primera instancia, aumentar el número de estaciones de monitoreo atmosférico para la ZMVT principalmente en los municipios de Zinacantepec Ocoyoacac y Xonacatlán para poder cubrir en su totalidad los 7 municipios considerados por la RAMA, una vez instaladas estas estaciones se recomienda considerar estaciones en los municipios de Almoloya y Capulhuac hasta cubrir el territorio de los 22 municipios considerados por la Gaceta de gobierno.
- ✚ Considerar analizar de forma detallada el estado de los sitios de monitoreo y su influencia en los reportes diarios de la calidad del aire en la zona., así como la integración del comportamiento de todos los contaminantes criterio medidos en éstas estaciones.
- ✚ Considerar los resultados de la presente para la realización de investigaciones próximas que puedan estudiar y analizar los efectos sobre la salud y el medio ambiente con el aumento de la temperatura y las concentraciones acumulativas del O<sub>3</sub> sobre el territorio
- ✚ Enfocar los estudios en el proceso que la industrialización ha tenido en la zona a lo largo de los años, las regulaciones normativas sobre las emisiones a la atmósfera de éstas y el número total de emisiones que llegan a la atmósfera de forma actualizada.

- ✚ Así como la regulación aún más estricta de los automóviles, aumentando el radio de influencia de la “ecozona”, haciendo vías de comunicación y servicios de transporte más efectivos para la población.
- ✚ Implementar a su vez, más acciones para la disminución de las concentraciones de O<sub>3</sub>, que permitan una calidad del aire óptima para la población
- ✚ Invertir esfuerzos y recursos en áreas que influyan en la disminución de la temperatura dentro de la ciudad.
- ✚ Impulsar la difusión sobre los reportes de la calidad del aire en la población para que ésta pueda adoptar medidas de prevención y no se exponga directamente a los altos niveles de O<sub>3</sub> y temperatura.

# Anexos

## Anexo 1

### Características socioeconómicas

#### Dinámica poblacional

La población total de los siete municipios considerados por la RAMA-ZMVT considerados para esta investigación es de 1,516,996 habitantes según los datos del Censo Poblacional del 2010 (INEGI, 2010). Como se puede observar en la tabla 16 Toluca, Metepec, Zinacantepec y Lerma son los municipios que concentran mayor población, siendo a su vez los de mayor expansión urbana.

**Tabla 16 Número de población por municipio**

| No.          | Municipio        | 2000      | 2005      | 2010      | % población 2010 |
|--------------|------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| 1            | Lerma            | 99,870    | 105,578   | 134,799   | 8.89             |
| 2            | Metepec          | 194,463   | 206,005   | 214,162   | 14.12            |
| 3            | Ocoyoacac        | 49,643    | 54,224    | 61,805    | 4.07             |
| 4            | San Mateo Atenco | 59,647    | 66,740    | 72,579    | 4.78             |
| 5            | Toluca           | 666,596   | 747,512   | 819,561   | 54.03            |
| 6            | Xonacatlán       | 41,402    | 45,274    | 46,331    | 3.05             |
| 7            | Zinacantepec     | 121,850   | 136,167   | 167,759   | 11.06            |
| <b>Total</b> |                  | 1,233,471 | 1,361,500 | 1,516,996 | 100.00           |

Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda 2010 (INEGI, 2010) y Secretaria del Medio Ambiente (2012)

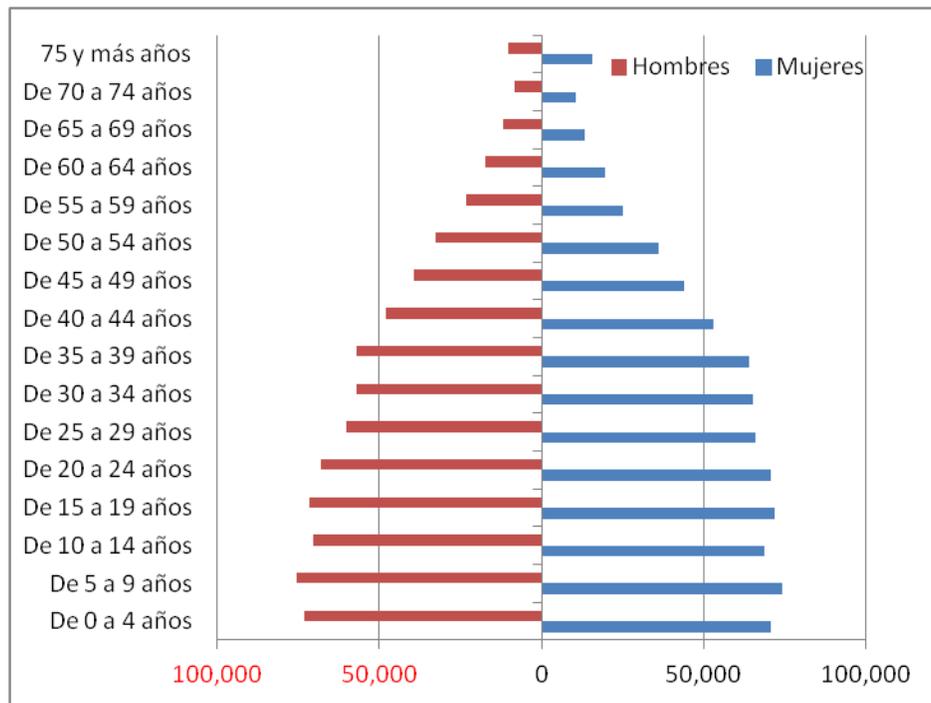
Metepec, Toluca y San Mateo Atenco en los primeros años del siglo XXI sufrieron un crecimiento urbano y un incremento en la población, propiciando que compartieran su conurbación física, y con respecto a la densidad poblacional se convirtieron en los municipios más densos. San Mateo Atenco por la actividad de la industria del calzado que no concentra su planta industrial en un área definida; y Metepec ha concentrado una importante actividad económica a partir de las tiendas departamentales, logrando la localización de asentamientos humanos por dicha actividad y por su cercanía con las principales vialidades regionales; esto lo ha convertido en el subcentro de la zona con alta competitividad frente al centro metropolitano de Toluca (Iracheta Cenecorta & Venancio Flores, 2015).

### **Estructura poblacional por edades**

La gráfica 50, muestra el número de población de los siete municipios en estudio con respecto a las edades, junto con el porcentaje de hombres y mujeres al que corresponde. El área de estudio tiene un total de 1,516,996 habitantes, en donde 735,506 correspondiente al 48 por ciento son hombres y de mujeres un 51 por ciento con un número total de 781,490 registrados hasta el 2010 por el Censo de población y vivienda (INEGI, 2010)

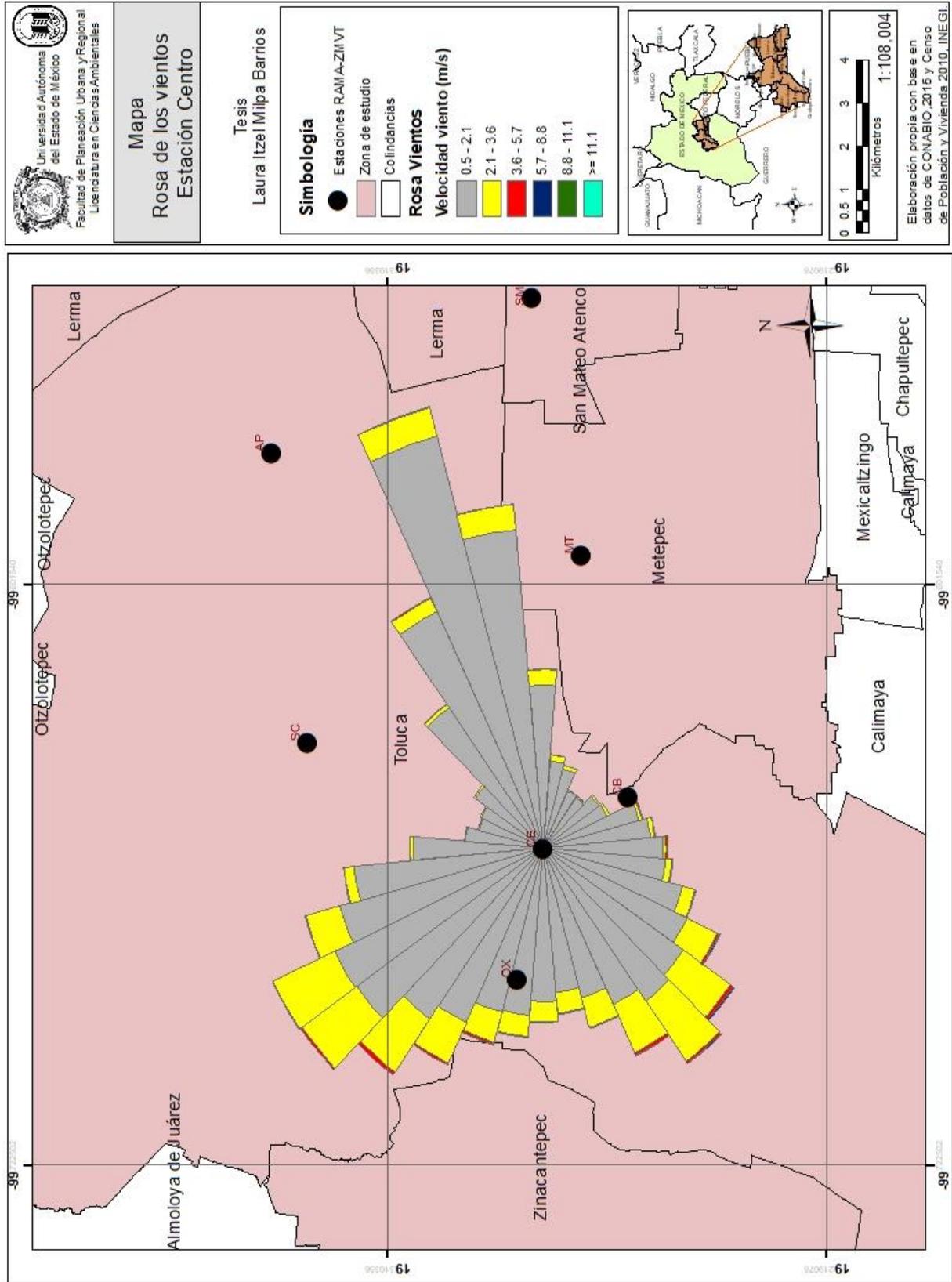
El rango de edad con más porcentaje de población corresponde a las edades de entre 5 y 9 años, que abarca el 9.87% de la población total; al contrario de las edades de 70 y más años que corresponden al porcentaje menor de la población.

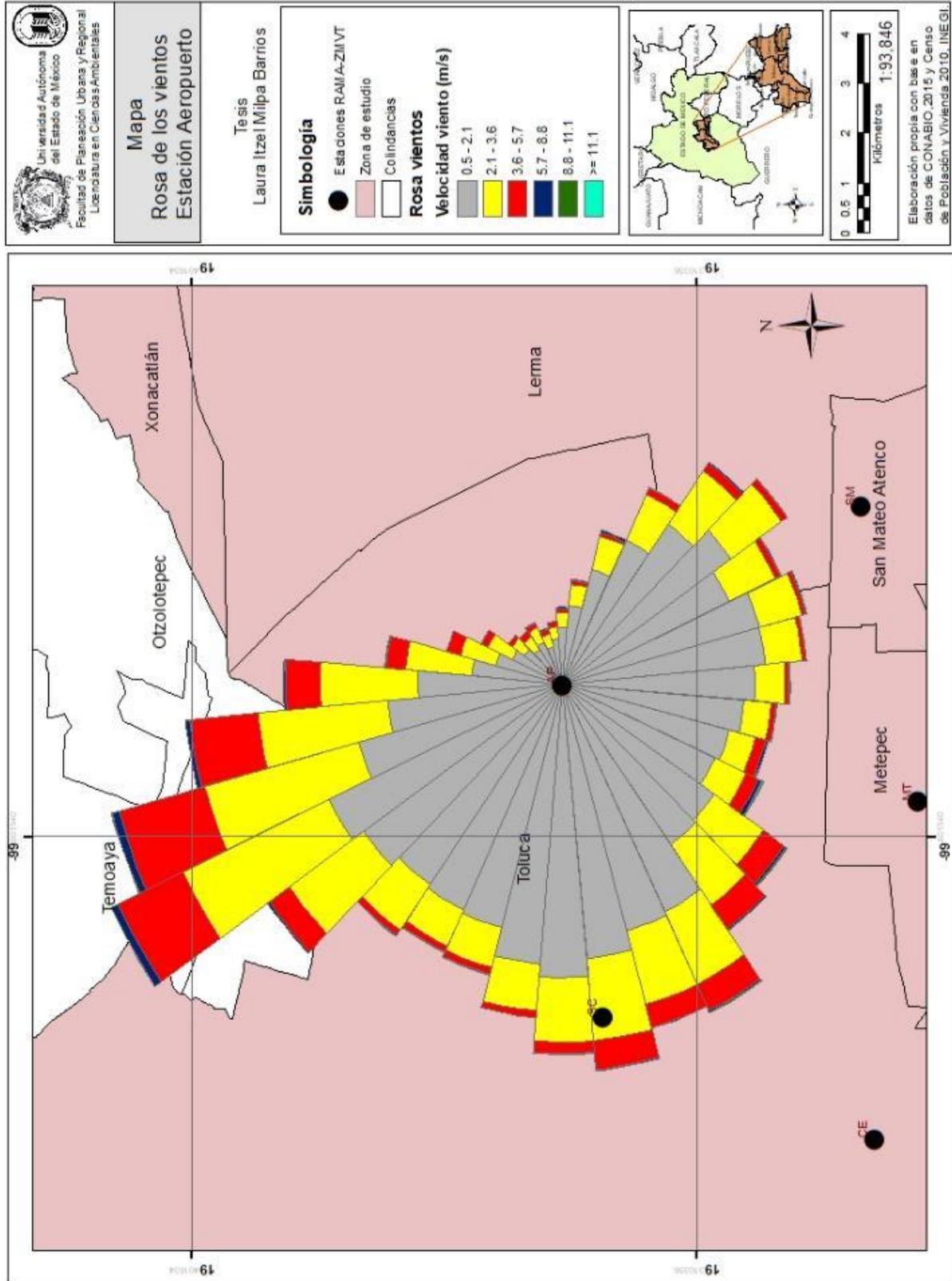
**Gráfica 50 Pirámide por edades de los 7 municipios del 2010**

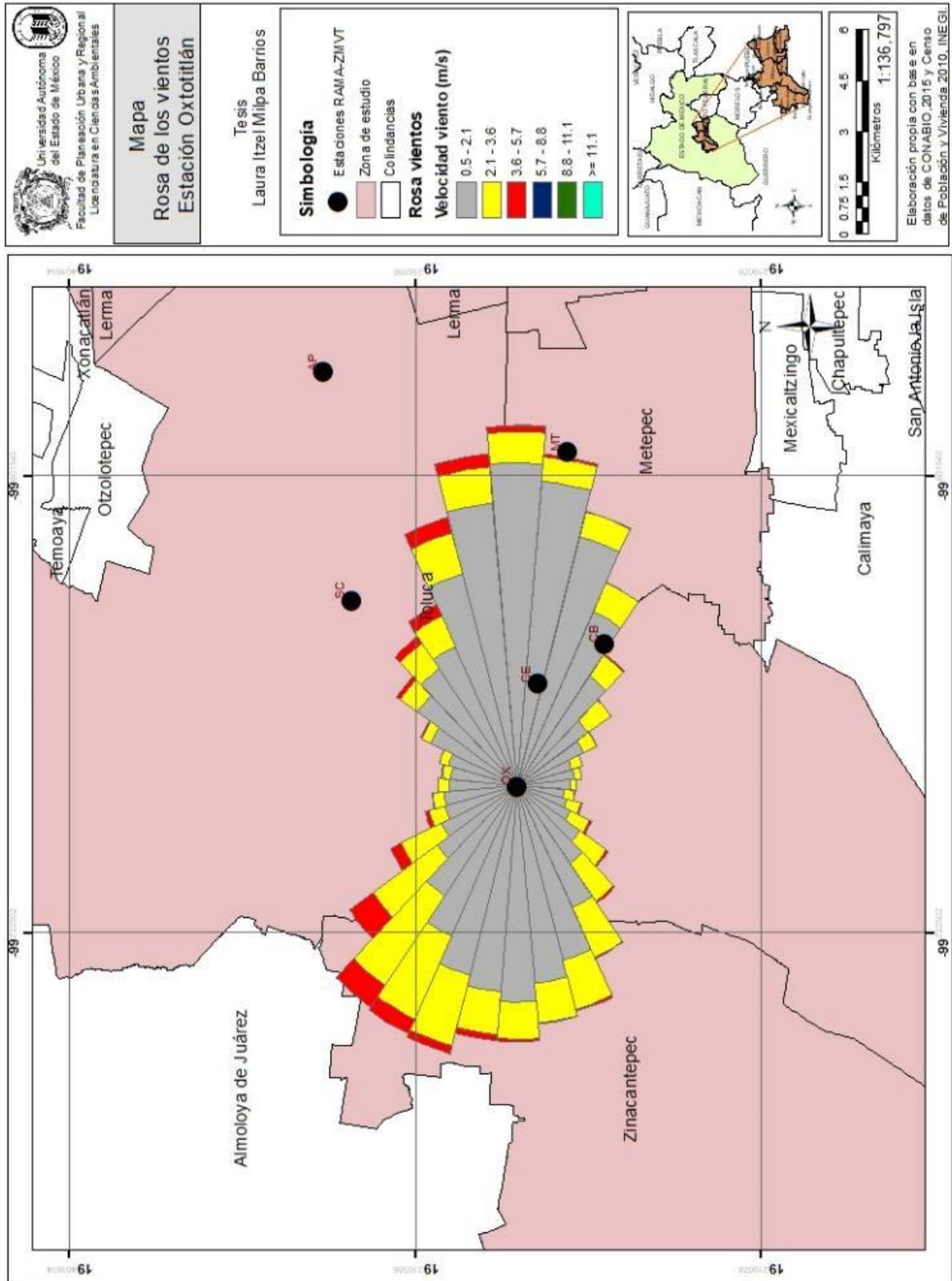


Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda 2010 (INEGI, 2010)

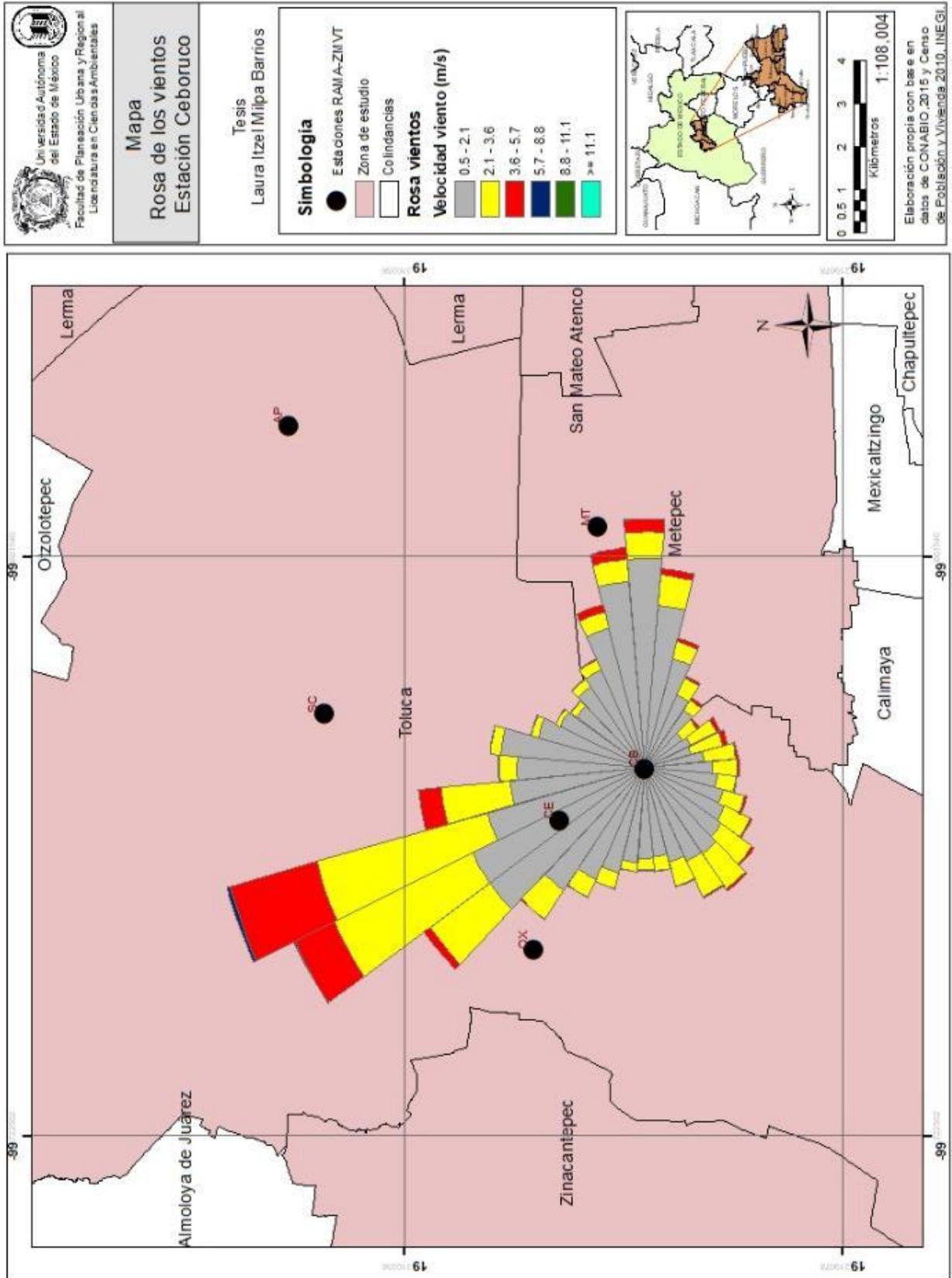


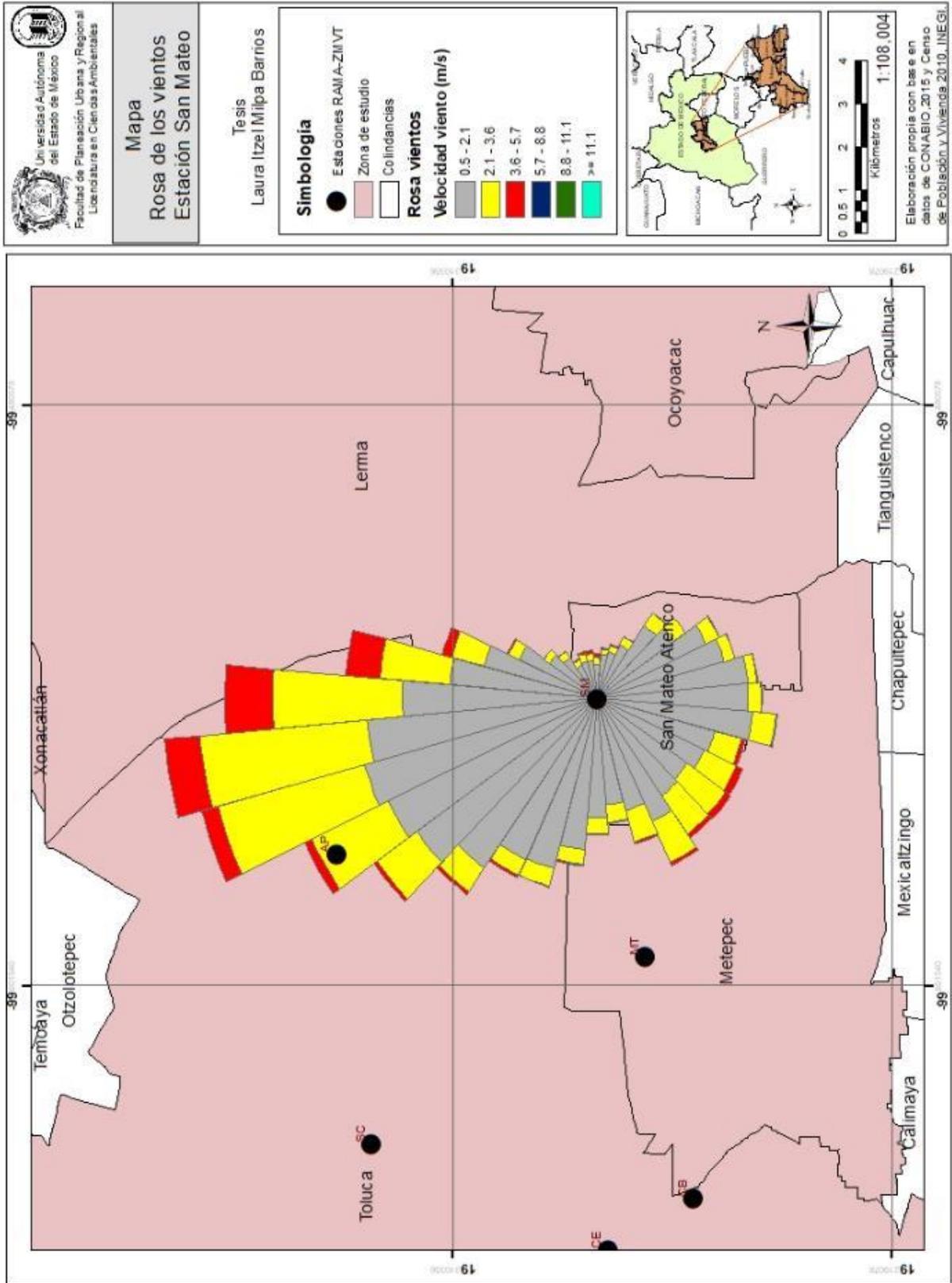












# Bibliografía

AMBIOTEC S.A. de C.V., 1992. *Diseño de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de Toluca*. primera ed. Toluca(México): SEGOB.

Anguiano Posada, M. B., Hernández Ramírez, N. & Suárez Díaz, G. M., 2015. *Los efectos del proceso de metropolización de Toluca en el crecimiento urbano de San Antonio la Isla, Estado de México 1990-2013*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.

Arias Valdés, R., 1997. *Toluca, la otra metrópoli mexiquense*. Toluca: Instituto de Administración Pública del Estado de México.

Arteaga Botello , N., 2005. Los estudios sobre la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Aproximaciones estructurales y centradas en los actores. *Región y Sociedad*, XVII(33), pp. 71-105.

Barmejo, V. y otros, 2013. Cambios de la composición atmosférica: incremento del depósito de nitrógeno y de los niveles de ozono troposférico. En: *Conservar Aprovechando*. España: s.n., pp. 13-55.

Bayona, G., García, Y. C. & Sarmiento, H. R., 2010. CO<sub>2</sub> y radiación solar: ¿Causantes del calentamiento global?. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, Septiembre, 34(132), pp. 339-345.

Benavides Ballesteros, H. O. & León Arizabal, G. E., 2007. *Información Técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Subdirección de Meteorología.

Bravo, J. L., Nava, M. M. & Muhlia, A., 2000. Relaciones entre la magnitud del valor máximo de ozono, la radiación solar y la temperatura ambiente. *Revista internacional de Contaminación Ambiental*, 16(2), pp. 45-54.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión , 2016. *Ley General del Cambio Climático*. México: Diario Oficial de la Federación .

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1917. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. México: Diario Oficial de la Federación .

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México: Diario Oficial de la Federación .

CECONT, Equipo Técnico de Gases de Efecto Invernadero, 2007. *Gases de efecto invernadero. Conceptos básicos*.. Lisboa: Instituto de Meteorología.

Centro Mario Molina, 2012. *Centro Mario Molina para estudios estretgicos sobre energía y medio ambiente*. [En línea] Available at: <http://centromariomolina.org/25-aniversario-del-protocolo-de-montreal/>

Cisniega Rojas, G., 2002. Contaminación del aire urbano: efectos de la radiación solar. *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.

COESPO, 2012. *Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Aspectos sociodemográficos*.. Touca: Gobierno del Estado de México.

Colin Baird, 2001. *Química Ambiental*. Segunda ed. Barcelona: Reverté.

Colque Pinelo, M. & Sánchez Campos, V. E., 2007. *Los Gases de Efecto Invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global?*. Lima: Asociación Civil Labor/ Amigos de la Tierra- Perú.

CONABIO, 2017. *Portal de Geoinformación. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*, México: s.n.

Coordinación del Programa acción por el Ozono en América Latina y el Caribe, 2010. *Tratados internacionales para la protección a la capa de Ozono*. [En línea] Available at: <http://www.pnuma.org/ozono/Documentos/DiaOzono/tratados%20internacionales%20ozono.pdf> [Último acceso: 02 08 2016].

Domínguez Arce, W., 2015. *Representación espacial por interpolación con Kriging de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca en el año 2011*. Toluca(México): Universidad Autónoma del Estado de México.

Ebbing, D. D. & Gammon , S. D., 2010. *Química general*. 9 ed. México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V..

EPA, 2017. *Contaminantes criterios del aire*, s.l.: s.n.

FIDEPAR, 2014. *Información estadística de los Desarrollos Industriales del Estado de México*. [En línea] Available at: [http://fidepar.edomex.gob.mx/desarrollos\\_industriales](http://fidepar.edomex.gob.mx/desarrollos_industriales) [Último acceso: 22 05 2016].

Figueruelo , J. E. & Dávila, M. M., 2004. *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales*. Barcelona: Reverté.

Frontal, B. y otros, 2005. *EL espectro Electromagnético y sus Aplicaciones*. Mérida: s.n.

Galante Marcos, A., 2011. *Protocolo de Kioto y desarrollo sostenible*. [En línea] Available at: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16032/1/cuadbiod34\\_03.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16032/1/cuadbiod34_03.pdf) [Último acceso: 06 octubre 2017].

García Chávez, M. d. I. A. & Gómez Hinojos, A. M., 2014. *Análisis correlacional entre el incremento de los automóviles y la concentración de partículas menores a diez micrómetros (PM10) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante el período 2006-2011*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.

Garriga Trillo, A. J. y otros, 2015. *Introducción al análisis de datos*. Digital ed. Madrid: Universidad de Educación a Distancia.

González, J. C., 2010. ¿Cómo está nuestra capa de Ozono en la sabana de Bogotá?. *Perfiles libertadores*, Junio, Issue 6, pp. 154-158.

H. "LI" Legislatura del Estado de México, 1993. Decreto Número 176. *Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de México, Gaceta del Gobierno*, 18 marzo, pp. 1-40.

H. "LI" Legislatura del Estado de México, 2009. Decreto número 13. *Periódico Oficial del Gobierno del Estado Libre y Soberano de México, Gaceta del Gobierno*, 19 noviembre, pp. 1-32.

Hernández Romero , J. C., Madrigal Uribe, D. & Morales Méndez, C., 2004. Comportamiento del Monóxido de Carbono y el clima en la ciudad de Toluca, de 1995 a 2001. *Ciencia Ergo Sum*, Noviembre, 11(3), pp. 263-274.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P., 2003. *Metodología de la investigación*. 3era ed. México: McGraw-Hill Interamericana.

Hernández, E. R., 2001. *El efecto invernadero*. Buenos Aires: Agrupamiento de Ingenieros Ecologistas.

IGCEM, 2015. *Datos e indicadores de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. [En línea] Available at: <http://observatorio.edomex.gob.mx/zmvt> [Último acceso: 30 mayo 2018].

INECC, 2016. *Normatividad*. [En línea] Available at: <http://www.inecc.gob.mx/calibre-informacion-basica/564-calibre-normatividad> [Último acceso: 22 05 2016].

INEGI, 2010. *Censos y Conteos de Poblacion y Vivienda*. [En línea] Available at: [http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/entidad\\_indicador.aspx?ev=5](http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/entidad_indicador.aspx?ev=5) [Último acceso: 2014 Agosto 26].

INE-SEMARNAT, 2011. *Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)*. Primera ed. s.l.:Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Instituto Nacional de Ecología, 2009. *Estudio de emisiones y actividad vehicular en tres ciudades mexicanas. Fase III: Guadalajara, Nogales y Toluca. Informe final*. Coyoacán : Centro de Transporte Sustentable de México, A. C.,

IPCC, 2007. *Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Ginebra, Suiza: IPCC.

Iracheta Cenecorta, A. & Venancio Flores, A., 2015. Gobernanza metropolitana como estrategia para planificar y gestionar el desarrollo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. *Revista de Estudios Regionales*, enero-abril, Issue 102, pp. 91-118.

Jaramillo-Robledo, Á., Arcila-Pulgarín, J., Montoya-Restrepo, E. C. & Quiroga-Zea, F., 2006. La radiación solar; consideraciones para su estudio en las plantaciones de café (*coffea arabica* L.). *Meteorología colombiana*, marzo, Volumen 10, pp. 12-22.

Magaña Rueda, V. O., 2006. El cambio climático global, ¿qué significa?. En: *Más allá del cambio climático. Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global..* México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp. 79-87.

Manahan, S. E., 2005. *Introducción a la química ambiental*. 8° ed. Florida: Reverté UNAM .

Martínez, J. & Fernández, A., 2004. *Cambio climático: una visión desde México*. 1 ed. México, D.F. : Instituto Nacional de Ecología.

Matus C., P. & CH., R., 2002. Norma Primaria de calidad del aire. *Revista de enfermedades respiratorias*, Vol. 18(No. 2), pp. pp. 112-122.

Medellín Milán , P., 2001. *Mario Molina y el Principio precautorio. La destrucción de la capa de Ozono.* [En línea]  
Available at: <http://ambiental.uaslp.mx/docs/PMM-AP010412-MarioMolina.pdf>

Molina, L. T. & Molina, M. J. (., 2005. *La calidad del aire en la megaciudad de México: Un enfoque integral.* Primera ed. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.

Naciones Unidas, 1992. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* [En línea]  
Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>  
[Último acceso: 13 04 2018].

Naciones Unidas, 1998. *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* [En línea]  
Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>  
[Último acceso: 13 04 2018].

Negrete Salas, M. E. & Salazar Sánchez, H., 1986. Zonas metropolitanas en México. 1980. *Estudios demográficos y urbanos*, enero, 1(1), pp. 97-124.

Organización Mundial de la Salud, 2006. *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.* Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

Pedroza, H. & Dicovskyi, L., 2007. *Sistemas de análisis estadístico con SPSS.* INTA ed. Manaua: IICA.

Pérez Pérez, G., 2015. *Espectro electromagnético.* [En línea]  
Available at: [https://www.espectrometria.com/espectro\\_electromagnitico](https://www.espectrometria.com/espectro_electromagnitico)  
[Último acceso: 02 10 2017].

Pérez, J. I. y otros, 2010. Variaciones climáticas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca , Estado de México : 1960-2007. *Ciencia ERGO SUM*, Julio-Octubre, 17(2), pp. 143-153.

PNUMA, S. d. O., 2006. *Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono.* Séptima Edición ed. Nairobi: s.n.

Puliafito, S. E. y otros, 2013. Contaminación del aire por fuentes estacionarias en Mendoza. *Revista de la Universidad de Mendoza*, pp. 19-22.

Quadri de la Torre, G. & Sánchez Castaño, L. R., 1992. *La Ciudad de México y la contaminación atmosférica.* Primera ed. Ciudad de México: Limusa: Grupo Noriega.

Quintero-Angel, M., Carvajal-Escobar, Y. & Aldunce, P., 2012. Adaptación a la variabilidad y el cambio climático: Intersecciones con la gestión del riesgo. *Luna Azul*, enero-junio, Issue 34, pp. 257-271.

RAMA, 2014. *Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMTV. Secretaria del Medio Ambiente.* [En línea]

Available at: <http://rama.edomex.gob.mx/contaminacion-atmosferica/que-es>  
[Último acceso: 05 04 2016].

Real academia española, 2016. *Estribación*. [En línea]  
Available at: <http://dle.rae.es/?id=GzHeqUf>  
[Último acceso: 03 Octubre 2016].

Reyes Cervantes, H. J., 2008. *Tesis doctoral. Estimación de tendencias en niveles máximos de contaminación usando regresión por cuantiles ajustando el efecto por variables meteorológicas*. Texcoco(Estado de México): Colegio de Postgraduados. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas .

Ruiz Suárez, L. G., Castro, T., García, A. & UNAM, C. d. C. d. I. A., 2008. *Informe sobre: Perspectiva de los efectos del cambio climático en la calidad del aire; estudio de análisis, la Cd. de México*. [En línea]  
[Último acceso: 24 Febrero 2016].

Secretaría de Salud, 2014. *Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O3) en el aire ambiente y criterios para su evaluación..* s.l.:Diario Oficial de la Federación.

Secretaria del Medio Ambiente, 2012. *Programa para mejorar la calidad del aire Valle de Toluca 2012-2017*. Primera ed. Metepec(Estado de México): Gobierno del Estado de México.

Secretaría del Ozono, 1999. *Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de Ozono*. Kenya: PNUMA.

Secretaria del Ozono, 2001. *Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono*. Kenya: PNUMA.

SEDESOL, CONAPO e INEGI, 2004. *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. primera ed. México: SEGOB.

SEDESOL, CONAPO e INEGI, 2007. *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005*. primera ed. México: SEGOB.

SEDESOL, CONAPO e INEGI, 2012. *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010*. primera ed. México: SEGOB.

SEMARNAT, 2012. *Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 2007-2011. Informe de Evaluación Periodo 2007-2011..* Toluca : Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes .

SEMARNAT, 2012. *El medio ambiente en México 2013-2014*. [En línea]  
Available at: [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen14/05\\_atmosfera/5\\_3\\_2.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/05_atmosfera/5_3_2.html)  
[Último acceso: 25 08 2017].

SEMARNAT, 2012. *NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire..* México : Diario Oficial de la Federación .

SEMARNAT, 2014. *El medio ambiente en México 2013-2014*. [En línea] Available at: [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen14/05\\_atmosfera/5\\_2\\_4.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/05_atmosfera/5_2_4.html) [Último acceso: 06 octubre 2017].

Serna, M., 1995. La deplección de la capa de ozono: algo en que pensar. *Dermatología venezolana*, 33(4), pp. 153-157.

Sigró Rodríguez, F. J., 2004. *Variabilidad espacio-temporal de la temperatura del aire en Cataluña. Tesis de Doctorado*. Tarragona: Departament d'Història, Història de l'Art i Geografia. Universitat Rovira i Virgili.

Sillman, S., 1999. *Overview: Tropospheric ozone, smog and ozone-NOx-VOC sensitivity*. [En línea] Available at: <https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiQp7XS2OPLAhWLuoMKHT2EBZIQFgqeMAA&url=http%3A%2F%2Fwww-personal.umich.edu%2F~sillman%2FSillman-webOZONE.pdf&usq=AFQjCNGxzEqM9zyCHI0IHOMacFpPvSzjw&sig2=rvNUypebmxsNfmMuRQ5yLA&ca> [Último acceso: 15 03 2016].

Trejo Vázquez, R., 2006. El IMECA. Indicador del Grado de Contaminación de la Atmósfera. *Instituto Tecnológico de Aguascalientes*, enero-junio, Volumen 31, pp. 50-53.

UNEP, s.f. *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Medio Ambiente por el desarrollo..* [En línea] Available at: [http://www.pnuma.org/cambio\\_climatico/](http://www.pnuma.org/cambio_climatico/) [Último acceso: 28 08 2016].

UNO-Habitat, 2016. *Índice de prosperidad urbana en la República Mexicana. Reporte nacional de tendencias de la prosperidad urbana en México*. s.l.:INFONAVIT, SEDATU.

Vázquez Garfias, M., Audry Sánchez, J. & Garfias, F. J., 2005. Tropospheric Ozone Prediction in Mexico City. *Journal of the Mexican Chemical Society*, vol. 49(núm. 1), pp. pp.2-9.

Vega, M., 2010. *Tratado Internacionales para la Protección a la Capa de Ozono*. [En línea] Available at: <http://www.pnuma.org/ozono/Documentos/DiaOzono/tratados%20internacionales%20ozono.pdf> [Último acceso: 05 10 2017].

Venancio Flores, A., 2016. *Tesis de doctorado. Planificación y gestión del desarrollo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Un análisis desde la gobernanza, 2005-2012*. Premio Bial IAPEM 2016 ed. Toluca (México): Instituto de Administración Pública del Estado de México, AC..

Wark, K. & Warner, C. F., 2013. *Contaminación del aire*. México, D.F. : Limusa.

Whitten, K. W., Raymond, E. D., Peck, M. L. & Stanley, G. G., 2008. *Química*. 8° ed. D.F.: Cengage Learning.