



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Planeación Urbana y Regional



**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.**

Tesis

**Que para obtener el título de
Licenciada en Ciencias Ambientales**

Presenta:

Wendy Domínguez Arce

Director de Tesis:

M. en C. Jorge Paredes Tavares

Toluca, México, Abril de 2015

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanas por su apoyo y paciencia incondicional es cada meta planteada y nunca dejarme en los momentos difíciles.

A mi director de tesis M. en C. Jorge Paredes Tavares por sus grandiosas ideas y propuestas y la dedicación de tiempo a este trabajo.

Al Operador del centro de control de la RAMA, Ricardo Rodríguez Cárdenas, quien sin trabas me proporciono toda la información solicitada, dio explicación del funcionamiento y respondió cada duda, siempre amable.

A mis revisores M. en A.E. Quím. Ana Marcela Gómez Hinojos y Dr. Eduardo Campos Medina por sus comentarios acertados y constructivos que me permitieron mejorar mi trabajo.

DEDICATORIAS

A mi hija Sara Lilian Domínguez Arce, mi principal motivación en cada logro, a mi ángel y a Jesús Rubén Torres Marín testigo y gran apoyo en cada paso de este trabajo.

Índice

Introducción	1
Planteamiento del problema	3
Justificación	7
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
Hipótesis	9
	10
Capítulo 1. Antecedentes	
1.1 Contaminación atmosférica	12
1.2 Clasificación de la contaminación atmosférica	14
1.2.1 Contaminación de origen natural	14
1.2.2 Contaminación por la actividad humana	15
1.2.3 Clasificación de los principales contaminantes del aire	18
1.2.4 Efectos globales de la contaminación atmosférica	23
1.2.5 Efectos en la salud	27
1.3 Factores que favorecen la concentración de contaminantes	35
1.4 Representación de la distribución de contaminantes con interpolación	42
Capítulo 2. La Contaminación Atmosférica en el Mundo	53
2.1 Calidad del aire y estudios principales	53
2.1.1 Contaminación atmosférica y Salud Pública en Europa	53
2.1.2 Londres	54
2.1.3 El caso de Estados Unidos de América	56
2.1.4 Latinoamérica	60
2.2 México	63
Capítulo 3. Zona Metropolitana del Valle de Toluca	71
3.1 Antecedentes de la calidad del aire en la ZMVT de 1994 a 2009	71
3.1.1 Periodo 1994 – 1999	73
3.1.2 Periodo 1997 - 2005	76
3.1.3 Periodo 2000 – 2009	80
3.1.4 Estudio más reciente 2008 – 2009	84
3.2 Caracterización de la zona de estudio en el año 2011	87
3.2.1 Orografía	89

3.2.2 Dinámica de los vientos	90
3.3 Diseño de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico	93
3.3.1 Operación de la RAMA	95
3.3.2 Estaciones de Monitoreo Atmosférico	95
Capítulo 4. Metodología	102
4.1 Elección del periodo de estudio	103
4.2 Evaluación del cumplimiento de la norma	105
4.2.1 Evaluación del cumplimiento de la NOM por ciudad o zona metropolitana.	106
4.3 Representación espacial de las concentraciones de los contaminantes	107
4.3.1 Estimación de concentraciones en ausencia de estaciones de monitoreo.	107
4.4 Polígono del área de estudio	109
4.5 Tablas básicas en Excel para la generación del grid	110
4.6 Proceso metodológico para la interpolación de los contaminantes.	110
4.6.1 Creación del GRID	111
4.6.2 Interpolaciones	111
4.6.3 Puntos de estaciones	112
4.6.4 Overlay maps	112
4.6.5 Ingresar mapa base	113
4.6.6 Modificar las propiedades del mapa	113
Capítulo 5 Resultados	115
5.1 Distribución y comportamiento de los contaminantes criterio en la ZMVT en el año 2011.	115
5.2 Distribución de los CO en la ZMVT en el año 2011	119
5.3 Distribución de los NO ₂ en la ZMVT en el año 2011	128
5.4 Distribución de los O ₃ en la ZMVT en el año 2011	137
5.5 Distribución de los PM _{2.5} en la ZMVT en el año 2011	146
5.6 Distribución de los PM ₁₀ en la ZMVT en el año 2011	155
5.7 Distribución de los SO ₂ en la ZMVT en el año 2011	164
5.8 Principales problemas de contaminación atmosférica en la ZMVT en el año 2011	172
Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones	175
Anexos	

Índice de cuadros y figuras

Cuadros

Cuadro 1.1 Componentes permanentes y variables del aire seco natural.	11
Cuadro 1.2 Clasificación de fuentes de área.	17
Cuadro 1.3 Clasificación general de los contaminantes gaseosos del aire.	18
Cuadro 1.4 Contaminantes criterio, sus fuentes de emisión y principales efectos a la salud.	29
Cuadro 2.1 Resumen por contaminante de los resultados de la evaluación del desempeño de las redes y de la clasificación de las ciudades y zonas metropolitanas con respecto a su grado de contaminación, por contaminante (2009).	65
Cuadro 3.1 Cronología de eventos importantes de la ZMVT con respecto a la gestión de la calidad del aire.	72
Cuadro 3.2 Acontecimientos importantes en el periodo 1994 – 1997.	74
Cuadro 3.3 Situación de los contaminantes atmosféricos en la ZMVT de 1994 a 1999.	75
Cuadro 3.4 Inventario de emisiones de la ZMVT para el año 2000.	77
Cuadro 3.5 observaciones de los contaminantes en el periodo 1997 – 2005.	78
Cuadro 3.6 Exposición a la población por año (1997- 2005)	79
Cuadro 3.7 Número de días en los que se rebasa la norma (1997 – 2005).	80
Cuadro 3.8 Síntesis de resultados obtenidos de los indicadores del periodo 2000 – 2009.	82
Cuadro 3.9 Comportamiento de los contaminantes durante el año, semana y día 2000-2009.	83
Cuadro 3.10 Evaluación del cumplimiento de la norma 2009.	86
Cuadro 3.11 Información general de la ZMVT.	87
Cuadro 3.12 Principales elevaciones de la ZMVT.	90
Cuadro 3.13 Distribución de las estaciones de monitoreo en la ZMVT.	96
Cuadro 3.14 Evolución de la medición de los contaminantes criterio.	97
Cuadro 4.1 Compilado de porcentaje de datos de la RAMA en la ZMVT por estación y año.	104
Cuadro 4.2 Indicadores para evaluar el cumplimiento de las NOM con respecto a cada contaminante.	105

Cuadro 4.3 Normas de calidad del aire vigentes publicadas por la Secretaria de Salud en el Diario Oficial de la Federación.	106
Cuadro 4.4 Comparativo de diferentes métodos geoestadísticos para crear isolíneas.	108
Cuadro 4.5 Ejemplo de tabla básica utilizada para el monóxido de carbono en el mes de enero	110
Cuadro 5.1 Comportamiento de los contaminantes durante el 2011	116
Cuadro 5.2 Cumplimiento de norma por estación en el año 2011	117
Cuadro 5.3 Cumplimiento de la norma de la ZMVT en el año 2011	118
Cuadro 5.4 Días por encima de la norma del ozono y partículas	172
Cuadro 5.5 Comportamiento del ozono y partículas durante la semana	173
Cuadro 5.6 Comportamiento del ozono y partículas durante el día	174

Figuras

Figura 1.1 Clasificación de los contaminantes por su estado físico	20
Figura 1.2 Formación de lluvia acida	25
Figura 1.3 Daños causados por el ozono troposférico en hojas de algunos cultivos	27
Figura 1.4 Efectos de los contaminantes en la salud	34
Figura 1.5 Distribución espacial de las PM ₁₀ en la ZMVT en el año 2005	43
Figura 1.6 Distribución espacial de las O ₃ en la ZMVT en el año 2005	44
Figura 1.7 Distribución espacial de las CO en la ZMVT en el año 2005	44
Figura 1.8 Distribución espacial de las SO ₂ en la ZMVT en el año 2005	45
Figura 1.9 Distribución espacial de las NO ₂ en la ZMVT en el año 2005	45
Figura 1.10 Representación espacial de las concentraciones en base al promedio de los promedios diarios de 24 horas de PM ₁₀ de la ZMVT 2000 – 2009	48
Figura 1.11 Representación espacial de las concentraciones utilizando el promedio de los promedios anuales de los máximos diarios de los promedios móviles de 8 h de O ₃ en la ZMVT 2000 - 2009	49
Figura 1.12 Representación espacial de las concentraciones utilizando el promedio de los promedios diarios de 24 h de SO ₂ en la ZMVT 2000 – 2009	49
Figura 1.13 Representación espacial de las concentraciones utilizando el promedio de los máximos diarios de NO ₂ en la ZMVT 2000 – 2009	50

Figura 1.14 Representación espacial de las concentraciones utilizando el promedio de los promedios anuales de los máximos diarios de los promedios móviles de 8 h de CO en la ZMVT 2000 – 2009	50
Figura 2.1 Niebla londinense de 1952	55
Figura 3.1 Distribución de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT en 1994	73
Figura 3.2 Principales problemas con la calidad el aire en 2008 o 2009 y distribución de la población.	85
Figura 3.3 Inventario de emisiones de la ZMVT 2004.	88
Figura 3.4 Dinámica de los vientos sobre la ZMVT	91
Figura 3.5 Rosa anual de los vientos	92
Figura 3.6 Estación centro	98
Figura 3.7 Tubos de entrada de muestras de aire y distribución a los diferentes analizadores de contaminantes.	99
Figura 3.8 Analizador de partículas	99
Figura 3.9 Analizador de ozono. Pantalla externa en tiempo real	99
Figura 3.10 Analizador de ozono. Vista interna del proceso que permite obtener el valor a reportar	99
Figura 3.11 Analizador de óxidos de nitrógeno. Pantalla externa en tiempo real	100
Figura 3.12 Analizador de óxido de azufre. Pantalla externa en tiempo real	100
Figura 3.13 Analizador de monóxido de carbono. Pantalla externa en tiempo real	100
Figura 3.14 En este procesador se guardan los datos y se transforman para poder ser leídos y almacenados en una computadora convencional	100
Figura 3.15 Esta computadora manda en tiempo real a través de internet todos los valores obtenidos por los analizadores al centro de control ubicado en Ex Rancho San Lorenzo, Conjunto SEDAGRO, Edificio "C", planta baja S/N San Lorenzo Coacalco para ser revisados.	101
Figura 3.16 Centro de control	101
Figura 4.1 Metodología para la representación de la distribución espacial de los contaminantes atmosféricos de la ZMVT 2011.	102
Figura 4.2 Polígono con base a las coordenadas UTM y mapa base.	109
Figura 4.3 Ejemplo de distribución espacial de las concentraciones de CO en el mes de Enero 2011.	114

Índice de Anexos

Anexo 1 Normatividad	1
Anexo 1.1 Resumen de los valores límite permisibles de los contaminantes criterio en algunos países y organizaciones del mundo 2006.	1
Anexo 1.2 Comparación de los Criterios de Calidad del Aire de México y la OMS (vigentes en el año 2011).	2
Anexo 2 Rosas de los vientos por estación de monitoreo para el año 2011	3
Anexo 2.1 Rosa de los vientos de la estación Oxtotitlán para el año 2011	3
Anexo 2.2 Rosa de los vientos de la estación Toluca centro para el año 2011	4
Anexo 2.3 Rosa de los vientos de la estación Metepec para el año 2011	5
Anexo 2.4 Rosa de los vientos de la estación Ceboruco para el año 2011	6
Anexo 2.5 Rosa de los vientos de la estación San Mateo Atenco para el año 2011	7
Anexo 2.6 Rosa de los vientos de la estación Aeropuerto para el año 2011	8
Anexo 2.7 Rosa de los vientos de la estación San Cristóbal Huichochitlán para el año 2011	9
Anexo 3 Graficas de resultados de la evaluación realizada por el INE en el periodo 2000 – 2009 en la ZMVT	10
Anexo 3.1 Límite anual del promedio anual de los promedios de 24h de PM ₁₀ por estación de la ZMVT 2000 – 2009	10
Anexo 3.2 Límite de 24 horas utilizando el percentil 98 de los promedios de 24 h de PM ₁₀ por estación en la ZMVT 2000 – 2009	10
Anexo 3.3 Calidad del aire buena, mala y regular de la ZMVT por PM ₁₀ 2000 – 2009	11
Anexo 3.4 Calidad del aire buena, mala y regular por estación de la ZMVT de PM ₁₀ 2000 - 2009	11
Anexo 3.5 Límite anual utilizando el quinto máximo de las concentraciones diarias de los promedios móviles de 8 h de O ₃ por estación en la ZMVT 2000 – 2009	12
Anexo 3.6 Limite horario utilizando el máximo horario de O ₃ por estación en la ZMVT 2000 - 2009	12
Anexo 3.7 Calidad del aire buena, regular y mala de los máximos diarios de una hora de O ₃ en la ZMVT 2000 - 20	13
Anexo 3.8 Calidad del aire buena, regular y mala de los máximos diarios de una hora de O ₃ por estación en la ZMVT 2000 - 20	13

Anexo 3.9 Límite anual utilizando el promedio anual de las concentraciones horarias de SO ₂ por estación en la ZMVT 2000 – 2009	14
Anexo 3.10 Límite 24 horas utilizando el segundo máximo de los promedios de 24 h de SO ₂ por estación en la ZMVT 2000 – 2009	14
Anexo 3.11 Calidad del aire buena, regular y mala de los promedios de 24 h de SO ₂ de la ZMVT 2000 – 2009	15
Anexo 3.12 Calidad del aire buena, regular y mala de los promedios de 24 h de SO ₂ por estación de la ZMVT 2000 – 2009	15
Anexo 3.13 Limite horario utilizando el segundo máximo horario de NO ₂ por estación en la ZMVT 2000 – 2009	16
Anexo 3.14 Calidad buena, regular y mala utilizando en los máximos diarios de NO ₂ en la ZMVT 2000 – 2009	16
Anexo 3.15 Calidad buena, regular y mala utilizando en los máximos diarios de NO ₂ por estación en la ZMVT 2000 – 2009	17
Anexo 3.16 Limite horario utilizando el segundo máximo del promedio móvil de 8h de CO por estación en la ZMVT 2000 – 2009	17
Anexo 3.17 Calidad del aire buena, regular y mala utilizando los máximos diarios de los promedios móviles de 8 h de CO en la ZMVT 2000 – 2009	18
Anexo 3.18 Calidad del aire buena, regular y mala utilizando los máximos diarios de los promedios móviles de 8 h de CO por estación en la ZMVT 2000 – 2009	18

Introducción

La contaminación del aire es responsable de 1.3 millones de muertes prematuras en el mundo cada año (OMS, 2011). En México la calidad del aire es un problema serio, ya que en las ciudades mexicanas en el periodo 2005 a 2010 hubieron 38 mil muertes por cáncer de pulmón, enfermedades cardiopulmonares e infecciones respiratorias asociadas a la exposición a la contaminación atmosférica (Stevens et al, 2008) 5 mil muertes correspondieron a niños y 6 de cada 10 muertes ocurrieron en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara, Monterrey, Puebla y Toluca. Tan solo en 2008 la OMS publico 14, 734 muertes prematuras asociadas a contaminación en México (OMS, 2008).

Actualmente no existen trabajos ni documentos que aborden el tema de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca; si bien la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) se encarga de evaluar y publicar la calidad del aire en la ZMVT a través de reportes mensuales que están al alcance de la población, la preocupación por la calidad del aire que respiramos no es un tema de prioridad para la gran mayoría. Erróneamente se cree que la atmósfera tiene la capacidad de depurarse pues las ráfagas de viento y la lluvia transportan los contaminantes y su percepción no es tan clara en algunas regiones.

Es necesario despertar el interés de la sociedad en el aire que respiran pues a pesar de la dinámica de los vientos el aire no se purifica al contrario la contaminación se distribuye y se combina por el mundo y las toneladas de contaminantes emitidas en una ciudad pasan a formar parte de una contaminación global que afecta a cada ser vivo sobre el planeta.

El presente trabajo se divide en seis capítulos en los primeros dos capítulos se describe de manera general la contaminación atmosférica, su origen, clasificación de los contaminantes y sus efectos en la salud; así como su distribución en el

mundo y las acciones que han tomado algunos países para mejorar la calidad del aire. Se incluye la información más actual (2009) del monitoreo de las ciudades en México al igual que el diseño de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), su operación y las estaciones de la que esta formada.

En el capítulo 3 se sintetizan los resultados de los estudios realizados por el Instituto Nacional de Ecología (INE) en los cuatro almanaques de datos y tendencias de la calidad del aire en la ZMVT durante el periodo 1994 - 2009 en tres diferentes periodos de estudio correspondientes a los cuatro ejemplares publicados de los almanaques.

En el capítulo 4 se describe a detalle la metodología utilizada en el presente trabajo que va desde la elección del periodo de estudio, hasta la representación espacial de cada contaminante e incluso la edición y presentación de mapas. En el capítulo 5 se presentan los mapas de distribución obtenidos, los cuales representan el comportamiento de cada contaminante por mes en la zona de influencia de cada estación de monitoreo a través de interpolaciones descritas en la metodología, adicionalmente se incluye la evaluación del cumplimiento de la norma de cada contaminante y la presentación de los principales problemas de contaminación atmosférica de la ZMVT en el año 2011.

Para finalizar en el capítulo 6 se incluyen conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos con la finalidad de concientizar al lector y mejorar la calidad del aire que respiramos por medio de la difusión de información concisa y confiable.

Planteamiento del problema

El cuidado del medio ambiente es fundamental para garantizar el desarrollo sustentable de nuestra sociedad y con él ofrecer un porvenir seguro a las futuras generaciones.

La exposición a la contaminación del aire y la toxicidad de los contaminantes tiene efectos en la salud humana e incluyen desde síntomas agudos (como dolor de cabeza e irritación de los ojos) hasta enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso la muerte prematura. La diversidad de los efectos depende de factores tales como la concentración y las características del contaminante, además de la susceptibilidad del individuo expuesto y el tiempo de exposición (GEM, 2007).}

El monitoreo junto con los inventarios de emisiones son las herramientas básicas para la atención de los problemas de calidad del aire. En este proceso es imprescindible contar con un diagnóstico preciso de la distribución en espacio y tiempo de cada parámetro o contaminante, pues sólo a partir de ello es posible estimar la magnitud del problema que se pretende atender.

Las autoridades requieren de los datos registrados en las estaciones de monitoreo y de los inventarios de emisiones para diseñar medidas de control de la contaminación atmosférica. En México actualmente hay más de ochenta localidades que cuentan con redes o estaciones de monitoreo. Sin embargo, únicamente en las tres grandes zonas metropolitanas (Guadalajara, Monterrey y el Valle de México) los datos se han generado de manera constante desde que comenzaron sus operaciones. Esto quiere decir que solamente el 40% de la población mexicana puede conocer la calidad del aire que respira, y que las autoridades en el resto de las ciudades no cuentan con información completa para dimensionar el problema, proponer soluciones y evaluar estrategias (INE, 2011).

Como medida para el control de la contaminación en las grandes zonas urbanas del país, en los últimos años se ha consolidado la instalación y operación de redes de monitoreo. Así, Toluca cuenta con Red Automática de Monitoreo Atmosférico desde 1994, la cual consta actualmente de 7 estaciones de monitoreo que funcionan con sistemas de medición continua de parámetros primarios de la calidad del aire:

- Ozono (O_3)
- Bióxido de azufre (SO_2)
- Bióxido de nitrógeno (NO_2)
- Monóxido de carbono (CO)
- Partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM_{10})
- Partículas menores a 2.5 micrómetros de diámetro ($PM_{2.5}$)

Cuenta además con equipo meteorológico que reporta la humedad relativa (HR), la temperatura (TMP), la dirección del viento (DV) y la velocidad del viento (VV).

Para tener fundamento y certeza en las decisiones que se toman en materia de calidad del aire, las mediciones registradas en las redes de monitoreo deben reflejar la situación atmosférica actual y real; en otras palabras, los datos generados deben ser de calidad. Instituciones como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología (INE) en colaboración con las diferentes redes de monitoreo en México han publicado una serie de almanaques desde 1994 hasta 2009 en cuatro ediciones:

- Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en cinco ciudades mexicanas (1994 – 1999).
- Segundo almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en seis ciudades mexicanas (1994 – 2002).
- Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas (1997 – 2005).

- Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en veinte ciudades mexicanas (2000 – 2009).

Todos estos con el propósito de poner a la disposición de autoridades, investigadores, grupos ambientalistas y público en general, estadísticas básicas y tendencias de la calidad del aire de las ciudades correspondientes en cada almanaque, cabe mencionar en todas las publicaciones se incluyen los datos de la ZMVT.

De manera general en los primeros dos almanaques se incluye información sobre la calidad del aire únicamente, en los dos últimos se incluye información como el grado de exposición de la población además de una clasificación de las ciudades por el número de días que se rebasó la norma, por contaminante y en el cuarto almanaque también se incluye una evaluación del desempeño de cada red de monitoreo. Es así que se puede observar el siguiente comportamiento de los contaminantes en la ZMVT:

1. Primer almanaque (1994 – 1999)

No hay información trascendente que nos permita tener un panorama de la situación en ese periodo. Adema de que no había medición de todos los contaminantes.

2. Segundo almanaque (1994 – 2002)

A través del análisis de la información presentada se hicieron hallazgos significativos sobre la calidad del aire en la ZMVT. Se encontró que las concentraciones de SO₂ y CO, no habían excedido la norma anual o diaria, el NO₂ en 1996 rebaso de manera ocasional el valor de la norma, mientras que el O₃ y las PM₁₀ registraron concentraciones elevadas y se había rebasado la norma diaria principalmente de PM₁₀.

3. Tercer almanaque (1997 – 2005)

De acuerdo con la información del tercer almanaque, en 2005 la ZMVT obtuvo el 2° lugar en PM_{10} , 3° en SO_2 y 4° en O_3 , CO y NO_2 a nivel nacional, esta clasificación responde a un indicador compuesto que pondera tanto la frecuencia de días en los que se excede el límite establecido en la norma de calidad del aire, como la magnitud de las concentraciones alcanzadas en cada ciudad o zona metropolitana. Dentro de la clasificación se encuentran nueve zonas metropolitanas y ciudades mexicanas: las zonas metropolitanas del Valle de México (ZMVM), de Guadalajara (ZMG), del Valle de Toluca (ZMVT) y de Monterrey (ZMM), y las ciudades de Puebla, Tijuana, Mexicali, Salamanca y Ciudad Juárez.

4. Cuarto almanaque (2000 – 2009)

De acuerdo con la información disponible en el cuarto almanaque 2000 – 2009 se observa que, en general, la red de monitoreo tiene un desempeño mínimo aceptable, por lo que es necesario atender varias áreas de oportunidad importantes para mejorar su desempeño general.

En la ZMVT hay altas concentraciones en PM_{10} y O_3 y el desempeño de estos parámetros requiere atención según la última auditoría realizada en 2009; además la ZMVT ocupa el segundo lugar en grado de contaminación por PM_{10} . Durante ese año se rebasó la norma en el 42% de los días del año, más que en cualquier otra localidad, y el límite anual se superó con concentraciones que son el doble de dicho límite.

En Toluca al igual que en la mayoría de las redes de monitoreo, los datos reportados son insuficientes para realizar un diagnóstico completo de la calidad del aire entre 2000 y 2009, para evaluar el cumplimiento de las normas de la calidad del aire o, inclusive, se dejaron de realizar mediciones de uno o varios contaminantes durante uno o varios años.

Esta información evidencia la falta de información suficiente y concisa para tomar decisiones adecuadas, es por esto que en la medida en que la información sobre la calidad del aire se ponga a disposición del público, del sector privado y de las

autoridades ambientales, la sociedad en su conjunto podrá, en principio, tomar conciencia sobre los problemas de contaminación atmosférica de su localidad y, por ende, proponer y participar activamente en las acciones para mejorarla. El primer paso para aspirar a reducir los miles de casos de mortalidad y morbilidad que ocasiona la contaminación atmosférica en nuestro país cada año es conocer y dar a conocer el estado que guarda el aire.

Justificación

El aire es un elemento esencial para la existencia de todo ser vivo. Diariamente nuestros pulmones filtran 15 kg de aire atmosférico, mientras que solo absorbemos 2.5 kg de agua y menos de 1.5 kg de alimento (Adame et al., 2000).

La contaminación atmosférica y su incidencia tóxica sobre la calidad de vida humana y la de los otros seres que habitan nuestro planeta es uno de los problemas ambientales más difíciles de prevenir y controlar. La inhalación de aire, aun contaminado, es un acto obligatorio e involuntario para la supervivencia de los organismos. Este problema reviste mayor gravedad que otros tipos de contaminación como la del agua, pues en el último termino de ingestión de aguas contaminadas en muchas ocasiones es voluntaria, por lo menos para los seres humanos, y existen medios para su control aun en condiciones rudimentarias, como ebullición o filtración, en particular cuando la contaminación de origen biológico (Villegas, 1999).

El problema de la contaminación atmosférica está generalizado a escala mundial, de acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud, 1.5 millones de personas murieron en 2004 debido a cáncer de pulmón, enfermedades cardiopulmonares e infecciones respiratorias relacionadas con la exposición a la contaminación atmosférica en zonas urbanas. En los países de ingresos medios y bajos del continente americano, como México, el 2% de todas las muertes registradas en 2004 se relacionó con la contaminación atmosférica, particularmente con la exposición a partículas suspendidas (PM₁₀ y PM_{2.5}). Esta

proporción es diez veces mayor que la mortalidad asociada con el cambio climático global (WHO, 2009).

Se estima que más de la mitad de la mortalidad mundial debida a las PM₁₀ ocurre en países en desarrollo en donde las concentraciones promedio anuales de esas partículas exceden los 70 microgramos por metro cúbico. La OMS calcula que, de reducirse estas concentraciones a 20 microgramos por metro cúbico (valor recomendado para proteger la salud de la población) se reduciría en 15 % la mortalidad relacionada con la contaminación atmosférica, mas no se eliminaría, pues no existe un umbral “seguro” de concentración de partículas en el ambiente (WHO, 2006).

En nuestro país se estima que 38 mil personas murieron entre 2001 y 2005 por cáncer de pulmón, enfermedades cardiopulmonares e infecciones respiratorias relacionadas con la exposición a la contaminación atmosférica. De estas aproximadamente 5 000 fueron niños. (Stevens et al., 2008).

Estas cifras representan más del doble de las muertes atribuidas a las enfermedades diarreicas ocasionadas por el consumo de agua no potable y por la falta de medidas sanitarias.

Es por ello que las instituciones encargadas de la toma de decisiones requieren conocer la distribución espacial y concentración de contaminantes atmosféricos, para enfocar las acciones en las zonas críticas y obtener resultados precisos.

Objetivo General

Representar la distribución espacial de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la ZMVT en el año 2011.

Objetivos específicos

1. Describir la situación histórica de la calidad del aire en la ZMVT de 1994 a 2009.
2. Recopilar, depurar y sintetizar las bases de datos históricas para seleccionar el año de estudio con base a la disponibilidad temporal y espacial de datos.
3. Delimitar el área de estudio a partir del radio de influencia de las estaciones de monitoreo y generar la interpolaciones por contaminante.
4. Evaluar el cumplimiento de la norma por estación de monitoreo y de manera general a la ZMVT por contaminante.

Hipótesis

La interpolación por el método geo estadístico Kriging de los valores de los contaminantes criterio permitirá conocer su concentración y distribución espacial en un área dentro de la zona de influencia de las estaciones de monitoreo de la ZMVT en el año 2011.

Capítulo 1

Antecedentes

Siempre que en nuestro planeta se utilice cualquier clase de energía, existe la posibilidad de una contaminación residual, esta contaminación puede tomar la forma de un gas, de un líquido, o de un sólido, y puede provenir de fuentes inorgánicas u orgánicas. El ser humano, en sus actividades, emite contaminantes gaseosos, sólidos y líquidos, los cuales deben ser asimilados dentro del aire, la tierra o los cuerpos de agua. Cuando se emiten contaminantes en el aire, las descargas son solamente dispersadas dentro del ambiente; normalmente no disminuyen en cantidad, más aún, la química del aire puede aumentar la toxicidad de un contaminante. El aire, debido a fuerzas naturales, puede distribuir la contaminación sobre grandes áreas geográficas y por consiguiente este asunto es de interés global (Roberts, 2001).

El aire se contamina como consecuencia de una gran cantidad de actividades que se desarrollan de manera cotidiana a escala individual (el uso del automóvil y la quema de basura), a escala institucional o empresarial (la quema de combustibles en la industria y el uso de solventes), de fuentes naturales (erupciones volcánicas e incendios forestales), o bien por la utilización de servicios (tintorerías y restaurantes). El resultado de estas actividades es la emisión de gases o partículas contaminantes que pueden afectar a la salud humana y a los ecosistemas.

El aire en estado “puro” (cuadro 1.1) permite que los seres humanos puedan respirar sin tener afectaciones a la salud. Sin embargo, el aire que respiramos puede ser alterado debido a la presencia de otros compuestos.

En los gases a temperatura y presión constantes, los volúmenes ocupados son directamente proporcionales al número de moléculas contenidas, por consiguiente,

decir que hay 1 ppm en el aire significa que hay una molécula entre un millón. Estos valores de concentración no proporcionan por si mismos información alguna sobre los efectos de los contaminantes.

En el caso de algunas sustancias, 1 ppm no tiene importancia alguna; en el caso de otras, en cambio, es altamente significativa. Por consiguiente, se ha de considerar tanto las concentraciones de los contaminantes como sus efectos sobre los organismos vivos y los materiales (Turk, 2004).

Cuadro 1.1. Componentes permanentes y variables del aire seco natural

Permanentes	% de volumen	ppm	Variables	ppm
Nitrógeno	78.09	780 900	Vapor de agua	
Oxígeno	20.94	209 400	Dióxido de carbono	315
Argón	0.93	9 300	Ozono	0.02
Neón		18	Dióxido de azufre	
Helio		5	Dióxido de nitrógeno	0.02
Kriptón		1	Óxido de nitrógeno	0.5
Xenón		1		
Hidrogeno		0.5		
Metano		315		

Fuente: Turk (2004).

La causa principal de toda la contaminación del aire es la combustión, y esta es esencial para el desarrollo de la sociedad (producción de materiales, transporte, generación de energía). Cuando ocurre la combustión perfecta o teórica, el hidrógeno y el carbono del combustible se combinan con el oxígeno del aire para producir calor, luz, dióxido de azufre y vapor de agua. Sin embargo las impurezas del combustible, una incorrecta relación entre el combustible y el aire, o temperaturas de combustión demasiado altas o demasiado bajas son causa de la formación de productos secundarios, tales como monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, cenizas finas e hidrocarburos no quemados- todos ellos son contaminantes del aire (Wark et al, 2007).

Además de la combustión, existen otros procesos y actividades que generan emisiones a la atmósfera, entre ellos el uso de solventes, la aplicación de pinturas, la aplicación de asfalto, la disposición final de residuos sólidos municipales, el tratamiento de aguas residuales e incluso la vegetación, entre otros (Camacho et al, 2003).

1.1 Contaminación atmosférica

Se define como la presencia en el aire de toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, altere o modifique su composición y condición natural (INE, SEMARNAT, 2000). En el caso del aire es una sustancia que, en alta concentración, puede causar daño al hombre, a los animales, vegetales o a los materiales. Puede incluir casi cualquier compuesto susceptible de ser transportado por el aire en forma de partículas sólidas, gotas líquidas, gases o sus combinaciones. Se clasifican en primarios, secundarios y terciarios (GEM, 2007). Por otro lado Villegas (1999), considera como contaminación, a cualquier desviación de la composición promedio del aire, en particular cuando se presentan efectos adversos, desde simples molestias hasta perjuicios graves para la salud.

Los contaminantes que se emiten a la atmósfera pueden ser transportados de un lugar a otro o depositados en un sitio específico, durante todo ese proceso, hasta que se estabilizan, sufren transformaciones químicas o físicas. Las especies químicas se pueden depositar en la superficie terrestre o en diversos sistemas, generalmente en forma de aerosoles (nubes, brumas, gotas u otros), los cuales también son arrastrados a la superficie terrestre por la lluvia o el viento hasta que se eliminan o se establecen en las altas capas de la atmósfera (Villafaña, 2003).

La contaminación atmosférica está formada por una mezcla de sólidos, líquidos y gases que se dispersan de acuerdo con las condiciones meteorológicas y

topográficas existentes en el lugar en donde se encuentre la fuente de emisión (incluyen los humos, polvos, polen, microorganismos, vapores, gases y sus mezclas) (Camacho et al, 2003).

Su incidencia sobre la calidad de la vida humana y la de otros seres que habitan nuestro planeta es uno de los problemas ambientales más difíciles de prevenir y controlar. La inhalación de aire, aún contaminado, es un acto obligatorio e involuntario para la supervivencia de los organismos. Los graves efectos de la contaminación atmosférica están enunciados en las llamadas premisas de Stokinger que Villegas (1999), analiza en su libro Evaluación y Control de la Contaminación:

- a. “Los agentes contaminantes del aire son potencialmente responsables de una mayor cantidad de enfermedades que los compuestos contenidos en el agua y en los alimentos juntos (envejecimiento, asma, bronquitis, cáncer del conducto respiratorio)”.
- b. “Como regla general, los agentes de contaminación atmosférica manifiestan sus efectos en forma combinada con otros agentes (es raro que lo hagan solos) o con factores existentes en el huésped (infecciones, deficiencia genética del metabolismo)”.

De acuerdo con las leyes físicas, la contaminación se puede asimilar, transformar o eliminar, de tal modo que los sistemas permanecen en equilibrio. Sin embargo, en muchos casos las emisiones de grandes cantidades de sustancias a la atmósfera han rebasado la capacidad de equilibrio de este sistema, ocasionando con ello la alteración del ambiente natural (Kathryn et al., 2004).

1.2 Clasificación de la contaminación atmosférica

La contaminación del aire es principalmente un fenómeno que se presenta en la vida urbana, cuando la capacidad del aire para diluir los contaminantes se ha sobrecargado. La población, el desarrollo industrial y la dependencia de los motores de combustión interna son causa de un incremento en las emisiones gaseosas y las partículas. A los transportes en vehículos les corresponde el 42% de todos los contaminantes, en peso, la mayoría de los cuales es monóxido de carbono que se disipa rápidamente. A la ignición de combustibles de fuentes estacionarias corresponde solo el 21% de todos los contaminantes, en peso, pero producen alrededor del 25% de las emisiones totales de óxidos de azufre. Por consiguiente, se debe considerar el peligro relativo del contaminante emitido (Ayers, 2001).

A pesar de que las principales emisiones se le atribuyen a los diversos procesos de combustión de las empresas y de los motores de vehículos existen diferentes orígenes, tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos que son descritos a continuación.

1.2.1 Contaminación de origen natural

Estas fuentes siempre han existido, en mayor o menor magnitud y frecuencia, de acuerdo con González, (2003), son todos los procesos o fenómenos de emisión que se presentan en los ecosistemas, como resultado de la acción de eventos meteorológicos, geológicos y/o procesos metabólicos. Villegas (1999) incluye también a todos los fenómenos que suceden en la naturaleza como la actividad volcánica (vierte partículas, SO_2 , SO_3 , H_2S , CO y CO_2), los incendios forestales espontáneos (contaminan el aire con CO , CO_2 , SO_x , NO_x y partículas), la presencia de vegetación (producen materiales que son transportados por el aire como polen), erosión (continuo desprendimiento de partículas), emisiones por los procesos metabólicos de la vegetación, la cual contiene gran cantidad de

hidrocarburos y los océanos emiten partículas de sal que son corrosivas y eventualmente pasan a la atmósfera (Villegas, 1999).

1.2.2 Contaminación por la actividad humana

Como su nombre lo indica esta clasificación incluye diversas actividades relacionadas con el dinamismo de la sociedad como lo son: transporte en vehículos automotores (contaminan con NOx, hidrocarburos, CO, plomo, benzopirenos, provenientes de combustiones incompletas), las domésticas (contaminación debida al uso de combustibles en la cocina y calefacción, produce partículas, SOx, NOx y CO), la industrial (por procesos de producción y quema de combustibles contaminan con humos y partículas, SOx, insecticidas, fungicidas y disolventes orgánicos) y la incineración de basuras (produce CO, humos, aerosoles y partículas) (Villegas, 1999).

Estas actividades también son llamadas fuentes antropogénicas por diferentes autores. Son clasificadas por González (2003) & Villafaña (2003) por su movilidad o distribución espacial.

a. Por su movilidad se clasifican en:

1. Fuentes fijas

De acuerdo con el artículo 6° del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEGEEPA) en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, se definen como “toda instalación establecida en un solo lugar que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales, de servicios o actividades que generan o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera” (DOF, 1998). Ejemplos de estas fuentes son las cementeras, refinerías e industrias de proceso (químicas y de alimentos, entre otras).

2. Fuentes móviles

El mismo reglamento de la LEGEPA, las define como todo equipo y maquinaria no fijos, con motores de combustión y similares, que con motivo de su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera, las cuales incluyen automóviles, camionetas, camiones de carga, motocicletas y el transporte público en general (aviones, barcos, trenes, etc.)(DOF, 1998).

b. Por su distribución espacial se clasifican en:

1. Fuentes puntuales

Son aquellas fuentes cuya totalidad de emisiones contaminantes a la atmósfera son reportadas al nivel de cada establecimiento, de tal forma que es posible monitorear en ellas el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes, así mismo es factible integrar y mantener actualizado el inventario de fuentes de contaminación. La mayoría de las industrias tales como petroquímica, farmacéutica, automotriz, celulosa y papel, química, asbesto, vidrio, metalúrgica, avicultura, acuicultura, productos lácteos, molienda de trigo, fabricación de hielo, preparación y mezclas de alimentos para animales, refresqueras tabacaleras, entre otras, son fuentes puntuales.

2. Fuentes no puntuales, también llamadas fuentes de área

Son aquellas que incluyen una o varias actividades distribuidas en un área determinada, cuyas contribuciones particulares, a diferencia de las fuentes puntuales, no pueden identificarse y evaluarse en forma precisa. En forma individual, emiten cantidades relativamente bajas de contaminantes, pero en conjunto sus emisiones representan un aporte considerable de contaminantes a la atmósfera. En esta categoría se incluye la mayoría de establecimientos

comerciales, de servicio y los hogares. Una clasificación de fuentes no puntuales o de área se muestra en el cuadro 1.2.

Cuadro 1.2 Clasificación de fuentes de área

Pérdidas evaporativas por transporte y almacenamiento de combustible	Distribución y almacenamiento de gasolina Carga de aeronaves Almacenamiento de combustible
Evaporación de solventes por fuentes de área	Lavado en seco Limpieza y desengrase Artes gráficas Consumo comercial de solventes Recubrimientos industriales Superficies arquitectónicas Pintura automotriz Pintura de tránsito Esterilización de hospitales Incineración de residuos hospitalarios
Fuentes evaporativas de hidrocarburos	Rellenos sanitarios Tiraderos a cielo abierto Distribución de gas L.P. Uso de asfalto Panaderías Plantas de tratamiento de agua residual
Fuentes móviles no carreteras	Locomotoras foráneas Locomotoras de patio Aeropuerto (operaciones de aeronaves)
Fuentes de combustión	Combustión habitacional Combustión comercial-institucional

Fuente: Villafaña et al. (2003).

1.2.3 Clasificación de los principales contaminantes del aire

Los contaminantes del aire se clasifican en primarios o secundarios, según sean emitidos a la atmósfera por fuentes de origen natural, debidos a las actividades humanas, o que se formen en esta por las interacciones químicas entre los contaminantes primarios y los constituyentes y condiciones de la atmósfera. (Camacho et al., 2003).

a. Por su origen se clasifican en:

1. Contaminantes primarios

Los contaminantes del aire son primarios cuando se encuentran tal como fueron emitidos a la atmósfera, como resultado de un proceso natural o antropogénico, como el monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO₂). (Ver cuadro 1.3). (Villafaña, 2003).

- Materia particulada (partículas, aerosol, polvo, ceniza fina, niebla, vapores (humo o tabaco), humo, hollín).
- Hidrocarburos
- Oxidantes fotoquímicos
- Asbestos y metales

Cuadro 1.3 Clasificación general de los contaminantes gaseosos del aire

Clase	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Compuestos que contienen azufre	SO ₂ , H ₂ S	SO ₃ , H ₂ SO ₄ , MSO ₄ (sulfatos)
Compuestos orgánicos		Cetonas, aldehídos, ácidos
Compuestos que contienen nitrógeno	NO, NH ₃	NO ₂ , MNO ₃ (nitratos)
Óxidos de carbono	CO, CO ₂	
Halógenos	HCl, HF	

Fuente: Elaboración propia con base en la clasificación de Gonzales (2003) y Roberts (2001).

2. Contaminantes secundarios

Los contaminantes secundarios provienen de reacciones químicas de los contaminantes entre sí o con otros componentes de la atmósfera. Ejemplo: ozono (O_3) y sulfatos.

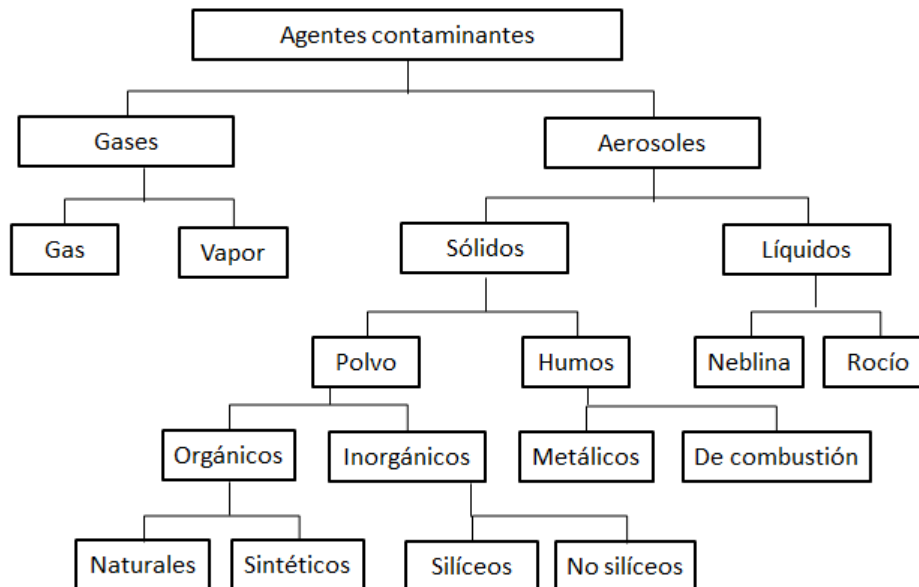
Los oxidantes fotoquímicos se generan cuando los hidrocarburos volátiles, los óxidos de nitrógeno y el oxígeno son expuestos a la radiación UV produciendo otros compuestos, tales como ozono (O_3), peroxiacil nitratos (PAN), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), radicales hidroxilo (OH) y aldehídos (como el formaldehído), etc. (González et al., 2003).

La interacción de los fenómenos de contaminación atmosférica como los óxidos de nitrógeno, que mediante reacciones fotoquímicas generan el smog, son también gases de efecto invernadero y contribuyen a la destrucción del ozono, además de ser causantes de la lluvia ácida. Los óxidos de azufre inciden en la destrucción del ozono, son gases de invernadero y son causantes de la lluvia ácida. Los CFC destruyen el ozono y son gases de invernadero. El dióxido de carbono no es parte integrante del smog, ni destruye la capa de ozono, pero el aumento en su concentración es determinante en el efecto invernadero, su ciclo normal y benéfico está asociado con la presencia de suficiente vegetación sobre la Tierra, capaz de lograr su fijación por medio de la fotosíntesis. No obstante, la destrucción del escudo ozono, el smog y la lluvia ácida afectan la vegetación y pueden traer como consecuencia el aumento del gas carbónico y del efecto invernadero. El ozono de la estratósfera protege a la Tierra de los rayos UV del Sol, pero en la tropósfera es un gas de invernadero que forma el smog y contribuye al calentamiento global. Dichas interrelaciones muestran como el problema de la contaminación atmosférica debe ser resuelto de manera integral, considerando todo el conjunto de fenómenos. (Villegas, 1999).

b. Por su estado físico

Es la más utilizada, tiene en cuenta las propiedades físicas y las fases en que se encuentran los contaminantes; se puede apreciar en la figura 1.1.

Figura 1.1. Clasificación de los contaminantes por su estado físico



Fuente: Villegas (1999).

Los denominados gases son aquellas sustancias cuyo punto de ebullición es inferior a la temperatura ambiente, por ejemplo el CO_2 , el SO_2 . Los vapores son los provenientes de sustancias cuyo punto de ebullición es superior a la temperatura ambiente, por ejemplo el cloroformo, éter, vapor de agua.

Los aerosoles son dispersiones coloidales o verdaderas soluciones de sólidos o líquidos en fase gaseosa; los aerosoles que dispersan sólidos lo pueden hacer en forma de humos o en forma de partículas sólidas (polvo); los humos pueden ser de metales sometidos a altas temperaturas que causan vaporización (humos metálicos) o provenientes de procesos de combustión. Los polvos pueden ser orgánicos: sustancias naturales o sintéticas, e inorgánicos: materiales silíceos o no

silíceos; esta última división debido al especial efecto sobre las vías respiratorias del material silíceo (silicosis) (Villegas, 1999).

Otros autores los clasifican en gases que incluyen también los vapores, una vez difundidos no tienden a depositarse, sino que permanecen en la atmósfera, transformándose en compuestos más simples o más complejos; y partículas que pueden ser líquidas o sólidas, incluyen polvo, humo y cenizas. Miden entre 500 y 0.0002 micras, las de mayor tamaño se depositan con más rapidez y producen sus efectos cerca de las fuentes de emisión, las de tamaño mediano se alejan más y se depositan a una cierta distancia de la fuente, y las más pequeñas se comportan casi igual a un gas, es decir, se mantienen suspendidas y son transportadas por los vientos a distancias mayores (González, 2003).

c. Por su composición química

1. Orgánicos: son aquellos que contienen carbono e hidrógeno (hidrocarburos, alcoholes, ácidos, aldehídos, cetonas, éteres, compuestos nitrogenados, azufrados, entre los principales) (González, 2003).
2. Inorgánicos: son aquellos que no contienen compuestos con carbono, excepto el monóxido y dióxido de carbono, así como partículas metálicas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, ácidos, bases y sales (González, 2003).

d. Por el sitio en que se encuentran

1. Aire del exterior: aire atmosférico
2. Aire del interior: aire dentro de los inmuebles (González, 2003)

e. Clasificación fisiológica

De acuerdo con los efectos predominantes sobre la salud de los individuos sometidos a exposición se ha propuesto la siguiente clasificación (Villegas, 1999):

1. Irritantes: sustancias corrosivas que actúan sobre las mucosas; la concentración del contaminante produce mayor efecto que la duración a la exposición; puede ser de acción inmediata como el amoníaco, ácido sulfúrico, formaldehido o de efectos crónicos o retardados como el ozono y el NO₂.
2. Asfixiantes: Pueden ser sustancias no tóxicas pero que en elevadas concentraciones desplazan el oxígeno tales como el CO₂, metano, etano, llamadas asfixiantes simples; o asfixiantes químicos que interfieren procesos de intercambio de oxígeno en el organismo como el monóxido de carbono, el ácido cianhídrico, el nitrobenzeno.
3. Anestésicos y narcóticos: los anestésicos disminuyen o eliminan la sensibilidad en tanto que los narcóticos causan inconsciencia. Entre otros están las cetonas de hidrocarburos alifáticos y el éter.
4. Tóxicos sistemáticos: atacan de preferencia un sistema o conjunto de órganos. Algunos de estos se eliminan con facilidad del organismo como los insecticidas orgánicos fosforados, y otros son almacenados o eliminados con mucha lentitud como el plomo y los hidrocarburos clorados.

Algunos de los contaminantes del aire, por sus efectos en la salud de la población, han sido normados y se han establecido límites máximos de concentración en el aire ambiente. Estos contaminantes son conocidos como criterio. Los contaminantes criterio incluyen : el ozono (O₃), el monóxido de carbono (CO), el

bióxido de azufre (SO₂), el bióxido de nitrógeno (NO₂) y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}). En términos generales estos contaminantes son los más estudiados en las redes de monitoreo atmosférico en las principales ciudades del mundo.

1.2.4 Efectos globales de la contaminación atmosférica

El principal impacto de la contaminación del aire es el que tiene sobre la salud humana. El clima puede desempeñar un papel significativo en la forma en que nos afecta la contaminación. La velocidad del viento y la profundidad de la atmósfera determinan la forma de dispersión de los contaminantes. Los sitios naturales de baja altura, tales como depresiones, ríos, bahías, y áreas alrededor de las montañas atrapan contaminantes durante las inversiones de temperatura. La atmósfera también se carga sobre las ciudades que tienen industria y un tránsito pesado, aun en localidades favorables (Ayers, 2001).

Villegas (1999) en su libro Evaluación y Control de la Contaminación señala los principales efectos de carácter global de la contaminación atmosférica y son los siguientes:

a. Smog

Consiste en una acumulación de contaminantes secundario en la atmósfera, que flotan sobre la región, producen turbiedad en el aire y después descienden ocasionando graves perjuicios sobre los habitantes, sobre la vegetación y sobre las edificaciones. Se debe a la inversión térmica que impide la difusión y dilución de los contaminantes.

b. Reducción de la capa ozono

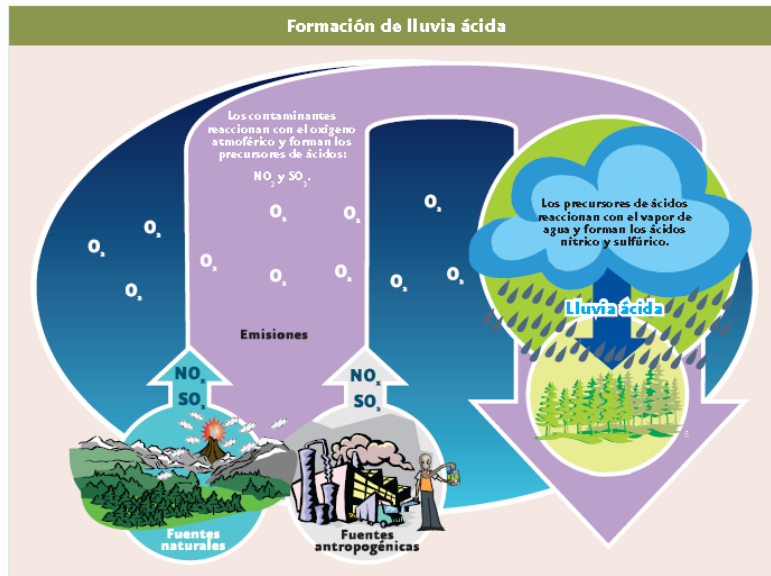
Debido a la industrialización que genera gases que reaccionan con el ozono, mediante secuencias que causan su destrucción, como el caso de los óxidos de nitrógeno. Reacciones similares se presentan con los óxidos de azufre, los de los halógenos y con algunos hidrocarburos gaseosos como el metano y el etano. Es sobre todo notable la destrucción de ozono por los compuestos clorofluorocarbonados (CFC), tales como los freones usados en refrigeración, que debido a su baja reactividad química ascienden inertes la troposfera y llegan a la estratosfera donde se encuentran con el ozono para reaccionar, de tal manera que cada molécula de CFC puede destruir, mediante la actuación en cadena del cloro atómico, un número muy grande de moléculas de ozono.

c. La lluvia ácida

Es producida por la combinación de agua de lluvia con los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno, el gas carbónico y los óxidos de cloro que producen los ácidos oxácidos correspondientes, entre ellos el sulfúrico, nítrico, clórico y carbónico (Ver figura 1.2).

Los óxidos producidos corroen las vías respiratorias de seres humanos y animales, destruyen los tejidos foliares de las plantas y afectan las estructuras de edificaciones, atacando los metales para producir corrosión y destruyendo las paredes exteriores que contienen carbonatos y óxidos de calcio. La lluvia ácida, en el ciclo ecológico del agua va a los ríos, quebradas y represas causando graves daños sobre los seres vivos: si el pH del agua se mantiene por debajo del valor 4,0 se produce con el tiempo la destrucción de todos los vertebrados, de gran parte de los microorganismos y de la mayoría de los invertebrados.

Figura 1.2. Formación de lluvia ácida



Fuente: SEMARNAT (2000).

d. El efecto invernadero

En el efecto invernadero intervienen dos fenómenos que se contrarrestan: Por una parte la recepción de energía lumínica del sol es obstaculizada por la contaminación que enturbia la atmósfera y por otro lado la emisión de energía calórica hacia el espacio es disminuida por la misma contaminación. Así la contaminación del aire tiene un efecto contradictorio en el calentamiento del planeta: deja entrar menos energía pero inhibe su salida con gases como el metano, el óxido nitroso, dióxido de carbono y los CFC.

Otros efectos que se presentan son:

Reducción de la visibilidad causada por la dispersión de la luz, debida a pequeñas partículas en el aire; la reducción más pronunciada es producida por partículas entre 0.5 y 1 micrómetro de diámetro.

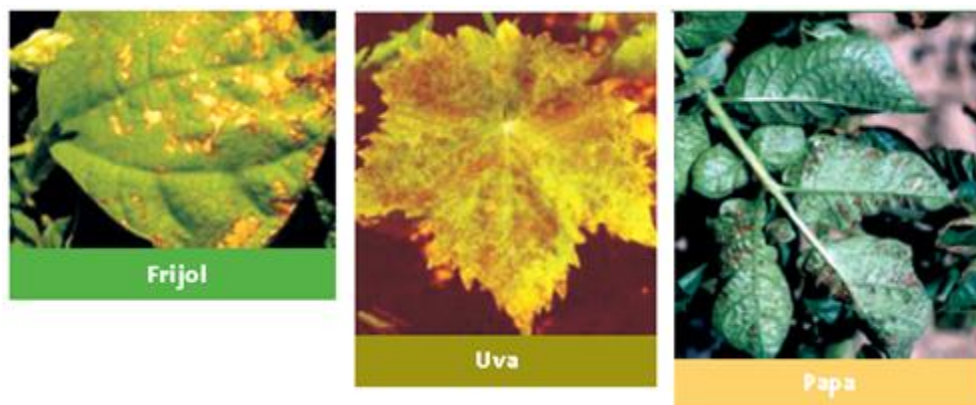
e. Efectos sobre materiales, vegetación y animales.

El acero se corroe de dos a cuatro veces más rápido en las áreas industriales que en las áreas rurales a causa de la contaminación en partículas y de azufre. La contaminación en partículas acelera el deterioro de las estatuas y los edificios, y también de los suelos, las ropas, los automóviles y las casas. El ozono daña los textiles, los colorantes y el caucho.

Todos los fluoruros resultan actuar como venenos cumulativos para las plantas, causando la ruina del tejido de las hojas. El smog fotoquímico (oxidante) blanquea y vitrifica las espinacas, la lechuga, el cardo, la alfalfa, el tabaco y otras plantas de hoja, el etileno, hidrocarburo que se encuentra en los gases de escape de los automóviles y los motores diesel, daña los pétalos de los claveles hace que se encrespen hacia dentro y destruye las orquídeas decolorando y secando sus sépalos (Turk, 2004).

El dióxido de azufre daña las tierras madereras y la vegetación. El smog ha causado una declinación en la producción de naranjas de la cuenca de Los Ángeles, el flúor y los óxidos de azufre has marchitado los cultivos de pinos y de cítricos en Florida. El ganado padece de fluorosis (debido al flúor de la vegetación). A niveles elevados de SO_2 y NO_x las plantas sufren de “envejecimiento precoz” (Ver figura 1.3). El ozono es una amenaza significativa para las verduras frondosas, los cultivos, los arbustos, los frutales y los árboles del bosque (Ayers, 2001).

Figura 1.3. Daños causados por el ozono troposférico en hojas de algunos cultivos.



Fuente: SEMARNAT (2000)

1.2.5 Efectos en la salud

Los efectos en la salud humana están determinados por la exposición a la contaminación del aire y la toxicidad de los contaminantes, e incluyen desde síntomas agudos (como dolor de cabeza e irritación de los ojos) hasta enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso la muerte prematura. La diversidad de los efectos depende de factores tales como la concentración y las características del contaminante, además de la susceptibilidad del individuo expuesto y el tiempo de exposición. La exposición se considera crónica cuando uno está expuesto a la contaminación durante periodos largos (años), y aguda cuando se trata de periodos cortos (días u horas) (Turk, 2004).

Internacionalmente, los contaminantes del aire se han clasificado en contaminantes criterio y contaminantes peligrosos del aire (CPA), los segundos son un conjunto de compuestos que pueden causar efectos serios e irreversibles en la salud humana, tales como los compuestos orgánicos volátiles (COV).

Los contaminantes criterio se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llama contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos criterio de calidad del aire en

los Estados Unidos, con el objetivo de establecer para los contaminantes niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población.

Actualmente, el término contaminantes criterio ha sido adoptado en muchos países y, en general, comprende los siguientes contaminantes: partículas suspendidas (PM), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO_2), bióxido de nitrógeno (NO_2) y plomo (Pb). (Ver anexo 1 para conocer los valores internacionales de las normas establecidas para cada contaminante).

El monóxido de carbono sustituye al oxígeno en la sangre y hacen más lentas las reacciones. Esto es causa de una carga más pesada sobre el corazón, los pulmones, la tiroides y la capacidad mental. Los óxidos de azufre causan daño temporal y permanente al sistema respiratorio y producen ácido sulfúrico, el cual causa daños posteriores. Los oxidantes fotoquímicos, O_3 y PAN causan irritación en los ojos y ataques de asma y afectan a las personas sanas mientras hacen ejercicio. Hasta recientemente se han estudiado poco los NO_x los cuales contribuyen a la formación de O_3 . La contaminación en partículas causa lesiones pulmonares y enfermedades respiratorias, y algunas partículas, como aquellas que contienen berilio y plomo, contribuyen al daño de otros organismos (Ayers, 2001). En el Cuadro 1.4 se describen los contaminantes criterio, sus fuentes de emisión y efectos a la salud.

Cuadro 1.4. Contaminantes criterio, sus fuentes de emisión y principales efectos a la salud.

Contaminante	Definición	Ejemplo	Fuente	Efectos
Materia particulada	Cualquier material sólido o líquido dividido finamente diferente al agua no combinada. Partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor de 10 micras (PM10), también conocidas como partículas “inhalables”, y partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor de 2.5 micras (PM2.5), también conocidas como partículas “respirables”.	Polvo, humo, gotitas de petróleo, berilio, asbesto,	Hornos, trituradoras, molinos, afiladores, estufas, calcinadores, calderas, incineradores, acabados textiles, mezcladores y tolvas, cabinas de aspersión, digestores, incendios forestales, automóviles, calentadores domésticos, termoeléctricas	Visibilidad disminuida, enfermedades crónicas del sistema respiratorio, asbestosis, envenenamiento con plomo, reducción de la función pulmonar, agravamiento del asma, y muertes prematuras por afecciones respiratorias y cardiovasculares, destrucción de la vida vegetal, efectos sobre el clima

(Continuación)

Contaminante	Definición	Ejemplo	Fuente	Efectos
Dióxidos de azufre	Gas reactivo, incoloro, acre, corrosivo, gases tóxicos producidos cuando se quema combustible que contiene azufre. Desempeña un papel importante en la formación de lluvia ácida y partículas secundarias.	SO ₂ en forma gaseosa o ácido sulfuroso (H ₂ SO ₃) y ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) en forma líquida, un componente de la lluvia acida.	Artículos eléctricos, calderas industriales, fundiciones de cobre, refinерías de petróleo, fuentes de automóviles, calentadores residenciales y comerciales, plantas de generación de energía.	Dificultad para respirar cuando se disuelven en la nariz y en las vías superiores; tos crónica y secreciones de las mucosas; lluvia acida destruye la vida de las plantas, los peces, especialmente en las áreas primitivas, como la de los parques y de los bosques nacionales; contribuye a una visibilidad disminuida en la medida de las porciones de sulfato de las partículas suspendidas.
Monóxido de carbono	Gas incoloro, inodoro, venenoso, más ligero que el aire, producido por la combustión incompleta del carbón de las combustiones.		Fuentes estacionarias que queman combustibles; fuentes móviles que queman combustible.	Pueden ser mortales en un tiempo corto en áreas cerradas; reacciona con la hemoglobina de la sangre, evitando la transferencia de oxígeno. Puede afectar las funciones mentales y el estado de alerta, aun en exposición a bajas concentraciones.

(Continuación)

Contaminante	Definición	Ejemplo	Fuente	Efectos
Óxidos de nitrógeno	<p>Siete óxidos de nitrógeno: NO, NO₂, NO₃, N₂O, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅. El trabajo sobre la contaminación del aire se refiere al NO y NO₂, óxido nítrico y dióxido de nitrógeno. Ambos son gases incoloros. Concentraciones excesivas en el aire ocasionan un color pardusco debido a la absorción de la luz en el área azul-verde del espectro.</p>	<p>Bióxido de nitrógeno (NO₂): gas de color café, muy reactivo; es uno de los óxidos de nitrógeno que desempeña un papel importante en la formación de smog fotoquímico y partículas secundarias.</p>	<p>Producidos al quemar combustible a temperaturas muy altas a partir del nitrógeno del aire. También son producidos a partir del nitrógeno del carbón y los aceites pesados: grandes generadores de energía eléctrica, grandes calderas industriales, motores de combustión interna, plantas de ácido nítrico.</p>	<p>Visibilidad reducida; irritación de la nariz y los ojos, edema pulmonar, bronquitis y neumonía; reaccionan con VOC bajo influencia de la luz solar para formar ozono, PAN y smog. El ozono y PAN son oxidantes poderosos que actúan como irritantes severos para los ojos, la nariz, y la garganta y ocasionan ruptura en el caucho, las pinturas, los textiles, etcétera, y dañan la vida de las plantas.</p>
Ozono	<p>Gas muy reactivo, incoloro y con olor penetrante. Es el principal compuesto químico en el smog fotoquímico.</p>		<p>Ocurre naturalmente en la capa de ozono estratosférica (15 a 20 km snm). En la tropósfera, el ozono se forma cuando los COV y NOx, que Vienen principalmente de emisiones vehiculares, reaccionan en presencia de la luz solar.</p>	<p>La exposición al ozono está asociada con reducciones en la función pulmonar, Síntomas respiratorios como tos, flemas, y el agravamiento del asma. El ozono también tiene efectos adversos en la vegetación y en los materiales de los edificios.</p>

(Continuación)

Contaminante	Definición	Ejemplo	Fuente	Efectos
Hidrocarburos VOC	Cualquier compuesto de carbón, excluyendo el monóxido de carbono, el ácido carbónico, los carburos y carbonatos metálicos, el carbonato de amonio y la acetona, el cual precipita en reacciones atmosféricas fotoquímicas.	Propano, tolueno, metilo, etil cetona, di - isocianatos, xileno, gasolina.	Los VOC algunas veces se producen en fuentes que sufren evaporación como recubrimientos superficiales, operaciones de impresión y de limpieza con disolventes: recubrimiento de superficies, artes gráficas, refinerías y tanques de petróleo, almacenaje y transferencia de gasolina, fabricantes de aceites vegetales, producción de neumáticos, limpieza en seco, fabricantes de sustancias químicas orgánicas sintéticas, fabricantes de plástico y fabricantes de componentes de navíos y de producción de aseo.	Contaminantes primarios en la formación de ozono y smog fotoquímico.

(Continuación)

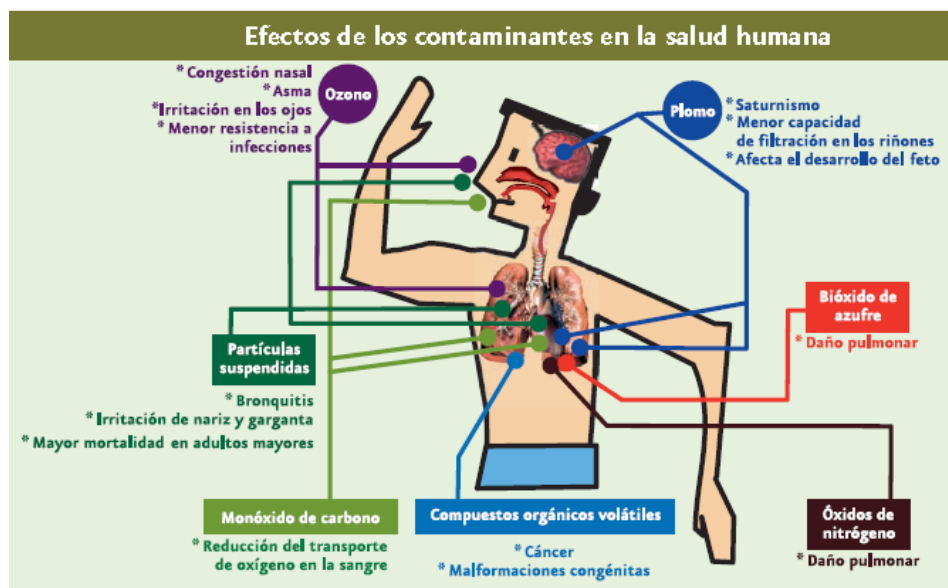
Contaminante	Definición	Ejemplo	Fuente	Efectos
Hidrocarburos No VOC	Todos los compuestos de carbono e hidrogeno, en forma líquida o gaseosa, exentos específicamente como VOC. Están incluidos los CFC y HCFC	Freones (CFC, HCFC), tetracloruro de carbono, cloruro de metileno, metilo cloroformo.	Los sistemas de acondicionamiento de aire, la limpieza y desengrasado con disolventes, el limpiado en seco, los fabricantes de productos de espuma.	La mayor parte son agotadores del ozono estratosférico. La capa de ozono de la estratosfera protege la tierra de la radiación ultravioleta excesiva.
Plomo	Un metal pesado con peso molecular de 207		La combustión del plomo de combustibles, pinturas basadas en plomo, tubería que contiene plomo, acumuladores almacenados.	Ataca el sistema nervioso central con daño neurológico consecuente. No se puede eliminar fácilmente del organismo.

Fuente: Ayers (2001); INE (2007).

La exposición a contaminantes del aire puede causar efectos agudos (corto plazo) y crónicos (largo plazo) en la salud. Usualmente, los efectos agudos son inmediatos y reversibles cuando cesa la exposición al contaminante. Los efectos agudos más comunes son la irritación de los ojos, dolor de cabeza y náuseas. A veces los efectos crónicos tardan en manifestarse, duran indefinidamente y tienden a ser irreversibles.

Los efectos crónicos en la salud incluyen la disminución de la capacidad pulmonar y cáncer a los pulmones debido a un prolongado período de exposición a contaminantes tóxicos del aire, tales como el asbesto y berilio. En el caso de los efectos agudos, es sustancial contar al menos con mediciones horarias de los contaminantes, de tal manera que puedan reflejar concentraciones pico durante el ciclo diario (ver figura 1.4). Por ello es necesario realizar mediciones precisas y exactas en intervalos más cortos de tiempo utilizando métodos automáticos. En cuanto a los efectos crónicos, los promedios anuales de concentración de contaminantes pueden ser suficientes, pero debido a las variaciones estacionales es de mayor utilidad, tomar mediciones sobre períodos mensuales lo que permitiría establecer una base suficientemente descriptiva. (CEPIS, 2009).

Figura 1.4 Efectos de los contaminantes en la salud



Fuente: SEMARNAT (2000).

1.3 Factores ambientales que influyen en la distribución de contaminantes en las ciudades

Todos contaminantes del aire emitidos por fuentes puntuales y distribuidas son transportados, dispersos o concentrados por condiciones meteorológicas y topográficas. El ciclo de estancia aérea se inicia con la emisión de los contaminantes, seguido por su transporte y difusión en la atmósfera. El ciclo se completa cuando los contaminantes se depositan sobre la vegetación, el ganado, las superficies del suelo y del agua, y otros objetos, cuando son arrastrados de la atmósfera por la lluvia, o cuando se escapan al espacio. En algunos casos, los contaminantes se pueden volver a introducir en la atmósfera por la acción del viento (Wark, 2007).

Las relaciones entre el clima y la contaminación atmosférica son intensas, y ambos se influyen mutuamente en múltiples aspectos. Los ecosistemas dependen, entre otras cosas, de los equilibrios de los factores bióticos y abióticos incidentes, como temperatura, humedad, luz, etc., entre estos últimos. Si se alteran estos equilibrios por causas extrañas, como la contaminación atmosférica, se alteraran los ecosistemas (Seoáñez, 2002).

Los agentes contaminantes de origen industrial o urbano y sus mezclas y reacciones químicas y fotoquímicas, tienen así una relación directa con las condiciones meteorológicas y con sus factores incidentes, de modo que unas veces los factores meteorológicos catalizan la evolución de los contaminantes, otras veces provocan sinergismos y transformaciones más completas, se emiten en ciudades e industrias de forma irregular en el tiempo diario y estacionalmente, a causa de los cambios de las condiciones meteorológicas, por las jornadas laborales y de ocio y por las modificaciones en volumen y composición de las propias emisiones (Seoáñez, 2002).

De acuerdo con Wark (2002) en las grandes áreas urbanas, los contaminantes emitidos por numerosas fuentes puntuales, así como de fuentes distribuidas, se dispersan sobre toda el área geográfica. Cualquier sitio dado dentro del área

urbana recibe contaminantes en cantidades variables procedentes de las diversas fuentes, dependiendo de los vientos existentes, la presencia de edificios altos, etc. Afirma también que la dispersión de un contaminante en la atmósfera es resultado de tres mecanismos dominantes: 1) el movimiento medio general del aire que transporta el contaminante en dirección del viento; 2) las fluctuaciones turbulentas de la velocidad que dispersan el contaminante en todas direcciones, y 3) la difusión de masa debido a los gradientes de concentración. Además, las características aerodinámicas generales, como el tamaño, forma y peso, afectan la tasa a la que las partículas de contaminantes no gaseosos se asientan en el terreno o son mantenidas en el aire.

Los factores meteorológicos relacionados con la contaminación atmosférica son los siguientes:

1. Radiación solar

Las radiaciones solares son reflejadas parcialmente por las nubes, por las partículas sólidas presentes y por las nieblas (smog). Cuanta más contaminación de partículas sólidas exista, más reflexión habrá y entrará menos energía a la superficie terrestre, lo que provocará un descenso en las temperaturas (Seoáñez, 2002). Uno de los resultados de la industrialización en todo el mundo lo constituye el aumento en la emisión de partículas. Las partículas en la atmósfera tienden a bloquear el paso de la radiación solar hacia la superficie de la Tierra. Este efecto de bloqueo se opone al causado por el aumento en las concentraciones de CO₂ y vapor de agua en la atmósfera. Esto es, ocurre un descenso en la temperatura atmosférica promedio. Es difícil predecir cuál de estos dos factores tendrá la mayor influencia sobre las temperaturas atmosféricas en las décadas venideras, si las emisiones, obra del hombre, permanecen esencialmente sin control (Wark, 2002).

2. Circulación del viento

El sol, el suelo y su atmósfera forman un sistema dinámico muy grande. El calentamiento diferencial del aire origina gradientes de presión horizontales, los

que a su vez conduce a un movimiento horizontal en la atmósfera. Por tanto, la diferencia de temperatura entre las atmósferas en los polos y en el ecuador, y entre la atmósfera sobre los continentes y sobre los océanos, es causa de los movimientos en gran escala del aire (Wark, 2002).

Esto genera dos tipos de dispersión de los contaminantes (Seoáñez, 2002):

- Dispersión vertical de los contaminantes: A mayor presión atmosférica, más pesado será el aire y menos dispersión habrá y las inversiones térmicas concentran los contaminantes.
- Dispersión horizontal de los contaminantes: influye la velocidad del tiempo, los obstáculos y la temperatura alteran la dispersión, los vientos fuertes y turbulencias dispersan los contaminantes, los contaminantes, si se elevan en vertical, pueden ser transportados a grandes distancias.

Los contaminantes en la parte inferior de la atmósfera serán arrastrados hacia arriba y, por lo general, se dispersarán sobre una amplia área. Además, según se eleva el aire, se enfriará como resultado de la disminución de la presión a mayores elevaciones. A medida que los contaminantes se difunden verticalmente en la capa límite, encontrarán diferentes corrientes principales en la dirección del viento a diversas alturas. Por tanto, el patrón de dispersión en la dirección del viento no será con frecuencia simétrico con respecto al eje de la dirección del viento en la parte superior de la chimenea, sino que mostrara una cierta tendencia a la oblicuidad (Wark, 2002).

3. Transporte y dispersión

Los mecanismos que intervienen en los desplazamientos en la baja atmósfera (aportes y salidas de las masas de aire con contaminantes) según Seoáñez (2002) son:

- Advección: Flujos de entrada y de salida de contaminantes arrastrados por el viento. Dependen de la velocidad y dirección del viento.

- Dilución: para una emisión constante de contaminantes, el caudal de aire que provoca la dilución aumentara en la medida en que aumente la velocidad del viento.
- Flujo turbulento: relación entre el coeficiente de dispersión y el gradiente de concentración de contaminantes.
- Estado térmico de la atmósfera: puede acelerar o frenar la dispersión vertical de los contaminantes. A medida que aumenta la estabilidad térmica atmosférica, los máximos de concentración de contaminantes se alejan de los puntos de emisión. El estado térmico de la atmósfera determina la altitud de la capa de mezcla o altura de mezcla, que se refiere a una capa de aire en la que se distribuyen los contaminantes.
- Efecto fuente-pozo: añadir contaminantes (fuente) o consumirlos (pozo) supone alterar en uno o en otro sentido el contenido en contaminantes (concentración y composición).
- Altura de emisión: este factor determinante de las inmisiones a nivel del suelo, que serán menores en función de la altura de la fuente de emisión.
- Presencia de obstáculos: un obstáculo provoca torbellinos y turbulencias que favorecen la dispersión.
- Reacciones fotoquímicas: en la atmosfera y en presencia de luz, humedad y temperaturas apropiadas, se desarrolla una serie de reacciones entre diversos contaminantes que pueden favorecer o frenar su dispersión.

4. Tasa de cambio

Una de las características más importantes de la atmosfera es su estabilidad, esto es, su tendencia a resistir el movimiento vertical, o suprimir la turbulencia existente. Esta tendencia influye sobre la capacidad de la atmósfera de dispersar los contaminantes que se emiten en ella, procedentes de fuentes naturales o producidas por el hombre. Cuando un pequeño volumen de aire se desplaza hacia arriba dentro de la atmósfera, encontrará una presión menor y experimentara una expansión a una temperatura menor.

5. Precipitaciones

Está claro que una precipitación vertical (lluvia o nieve) arrastra gases y partículas contaminantes presentes en el aire en cantidad que dependerá de: la intensidad, la duración, el tamaño de las gotas, solubilidad de los gases o partículas, el tamaño de las partículas, la velocidad de caída de la precipitación, velocidad de caída de las partículas, la densidad de las partículas y la concentración de los contaminantes en el aire (Seoáñez, 2002).

En principio, el fenómeno es complejo, y se basa en la intercepción de los gases y de las partículas por la precipitación. La intensidad de esa captación decrece con el tamaño de las partículas, siendo muy baja a partir de dimensiones de estas inferiores a las 2μ . Como orientación una lluvia constante de 1 mm/hora durante 15 minutos, arrastra una medida de 25 al 30% de las partículas de más de 10μ (Seoáñez, 2002).

La captación de gases y partículas por las precipitaciones verticales está muy influenciada por la evaporación y por la condensación, estando a su vez todas ellas interrelacionadas tanto en lo que se refiere a la dispersión como a la transformación de los contaminantes. En zona de precipitaciones frecuentes si bien se limpia el aire de contaminantes no quiere decir que sean eliminados, sino que simplemente se trasladan, transformados o no, a otra fase: al suelo, a la vegetación o a las masas de agua (Seoáñez, 2002).

6. Condiciones de estabilidad

Según Wark (2002) es necesario conocer el grado de estabilidad de la atmósfera para estimar su capacidad de dispersar los contaminantes. Se define una atmósfera estable como aquella que no muestra mucho mezclado o movimientos verticales. De aquí resulta que los contaminantes emitidos cerca de la superficie del suelo tienden a permanecer ahí. El hecho de que haya mucho mezclado a una escala significativa en la baja atmósfera, depende de la temperatura y la turbulencia.

7. Turbulencia

Es resultado de dos efectos específicos: a) el calentamiento atmosférico, que es causa de las corrientes de convección naturales y b) la turbulencia mecánica, que es el resultado de los esfuerzos cortantes del viento. A pesar de que ambos efectos están presentes por lo general en cualquier condición atmosférica dada, una de las dos turbulencias, ya sea la mecánica o térmica (convectiva), puede prevalecer sobre la otra. Las turbulencias térmicas prevalecen en los días soleados cuando soplan vientos ligeros y el gradiente de temperatura es altamente negativo. El periodo de estas turbulencias cíclicas será del orden de minutos. Por otra parte, las turbulencias mecánicas predominan junto con la estabilidad neutral en las noches con viento, y las fluctuaciones del viento tienen periodos del orden de segundos. La turbulencia mecánica es resultado del movimiento del aire sobre la superficie terrestre y está influida por la situación de los edificios y la relativa rugosidad del terreno (Wark, 2002).

8. Islas de calor

En la ciudad hace más calor que en el campo, este fenómeno es lo que se conoce como isla de calor urbana. Una isla de calor resulta de una masa de material, natural o antropogénicas, que absorbe e irradia calor en una mayor proporción al área circundante, lo que provoca de moderadas a fuertes corrientes atmosféricas de convección verticales hacia las capas superiores del aire. Debido a su efecto producido la estabilidad atmosférica será menor sobre la ciudad que sus alrededores.

A causa de la contaminación atmosférica, la radiación solar que llega a una ciudad es entre un 10 y 30% menor. Esta disminución está muy compensada por:

- La radiación de onda larga emitida por la superficie de la ciudad.
- La capa de contaminación.
- La gran cantidad de edificios que almacenan el calor recibido y lo emiten.
- El calor generado por el hombre

El origen de contaminación a nivel de suelo como los automóviles en su relación con las islas de calor será positivo ya que la masa inestable de la isla permitirá un mayor volumen de aire para la disolución de contaminantes. Se pueden formar una o varias islas dentro de la ciudad y las plumas de chimeneas en caso de una condición estable de la atmosfera pueden formar células y circulaciones convectivas que crean domos de contaminación que favorece la acumulación en las capas bajas más próximas al suelo.

9. Relieve

La influencia del relieve sobre el clima y sobre la contaminación atmosférica tienen sus bases en: que el relieve modela el clima en muchas circunstancias, la topografía puede condicionar las temperaturas y precipitaciones, por la altitud condiciona la presión atmosférica y la cantidad de radiación solar recibida, la topografía urbana (geográfica y de los edificios y calles) condiciona micrometeorología.

Todos los factores están relacionados y Seoáñez (2002) afirma lo siguiente:

- El tiempo inestable y turbulento favorece la dispersión de los contaminantes.
- Las corrientes verticales favorecen la dispersión de los contaminantes.
- El tiempo de calmas meteorológicas favorecen la concentración de contaminantes.
- Las inversiones térmicas favorecen la concentración de contaminantes
- Ciertos gradientes térmicos en condiciones de humedad específicas, pueden favorecer la estabilidad o la inestabilidad atmosférica.
- Las ciudades modifican la composición del aire urbano.
- Las ciudades modifican el equilibrio térmico.
- Las ciudades modifican la humedad del aire.
- La topografía urbana modifica las condiciones climáticas respecto de su entorno.

- Las industrias emisoras de contaminantes modifica el clima urbano, la penetración de la radiación solar y otros factores climáticos.
- Lo mismo ocurre con las industrias y las zonas industriales.
- En general, los factores meteorológicos agravan o mitigan la contaminación atmosférica.
- En general, la contaminación atmosférica afecta en muchas situaciones al clima urbano.

1.4 Representación de la distribución de contaminantes por interpolación

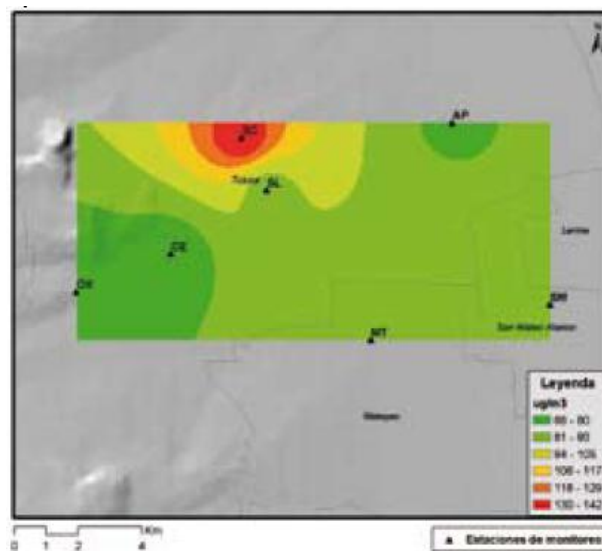
El INE y la SEMARNAT (2007) a partir del tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire realizaron la representación de la distribución espacial de los contaminantes en las ciudades mediante mapas correspondientes al 2005, utilizando los promedios anuales de las concentraciones en cada estación de monitoreo que se calcularon con base en las concentraciones diarias, excepto en el caso del SO₂, para el que se utilizó el promedio anual de las concentraciones horarias y para el O₃ se calculó el promedio anual de los máximos diarios de los promedios móviles de 8 horas, debido a que tiene dos tiempos promedio base para el cálculo de la concentración diaria -máximo horario en el día y máximo diario de los promedios móviles de 8 horas.

Generaron los mapas interpolando los promedios anuales entre estaciones con el software Arc GIS, utilizando el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) (Ver figuras 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9). Dicho método se basa en la suposición de que a medida que nos alejamos del punto de la muestra (las estaciones de monitoreo), la concentración va disminuyendo. Cabe mencionar que sólo se interpolaron las concentraciones entre las estaciones de monitoreo, y no se extrapólo fuera del dominio establecido por la ubicación de las estaciones de monitoreo. El dominio de interpolación de las concentraciones para una ciudad puede cambiar dependiendo del contaminante y

del año, dado que algunas redes no miden todos los contaminantes en todas las estaciones, o bien porque los datos para una estación de monitoreo en un año no eran suficientes para el cálculo.

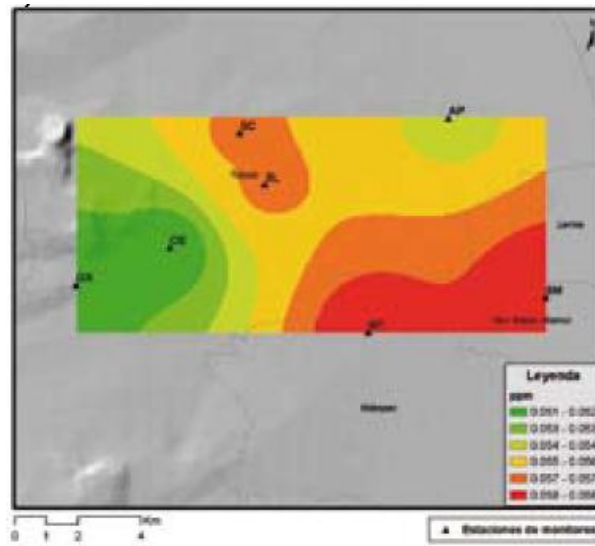
Es importante mencionar también que los dominios de los mapas no necesariamente corresponden a la representatividad espacial de las redes. Por ejemplo, la concentración reportada en una estación podría reflejar las condiciones locales o regionales dependiendo de su entorno, por lo que en este análisis se asumió que la representatividad de la red sólo se extiende a su dominio de cobertura. Cabe aclarar que únicamente la ZMVM reporta la representatividad de sus estaciones.

Figura 1.5 Distribución espacial de las PM_{10} en la ZMVT en el año 2005



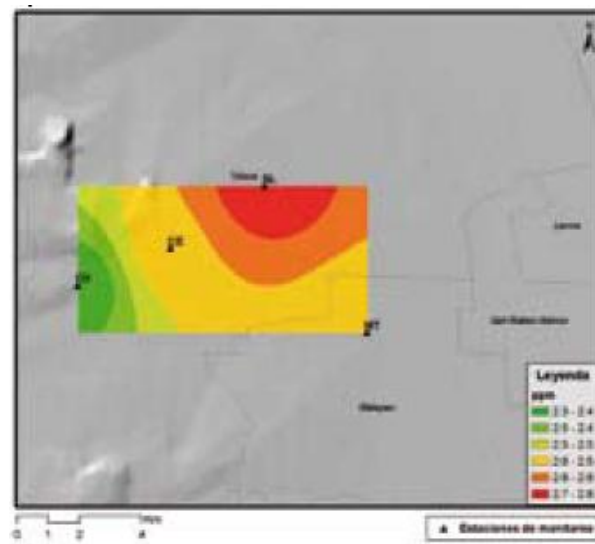
Fuente: INE & SEMARNAT (2007)

Figura 1.6 Distribución espacial de las O₃ en la ZMVT en el año 2005



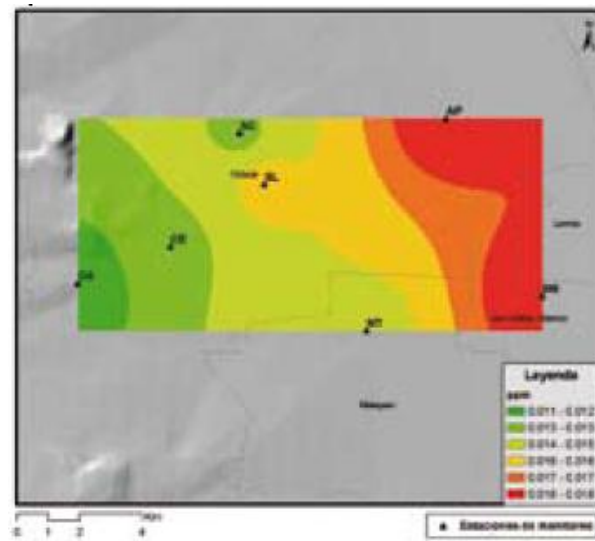
Fuente: INE & SEMARNAT (2007)

Figura 1.7 Distribución espacial de las CO en la ZMVT en el año 2005



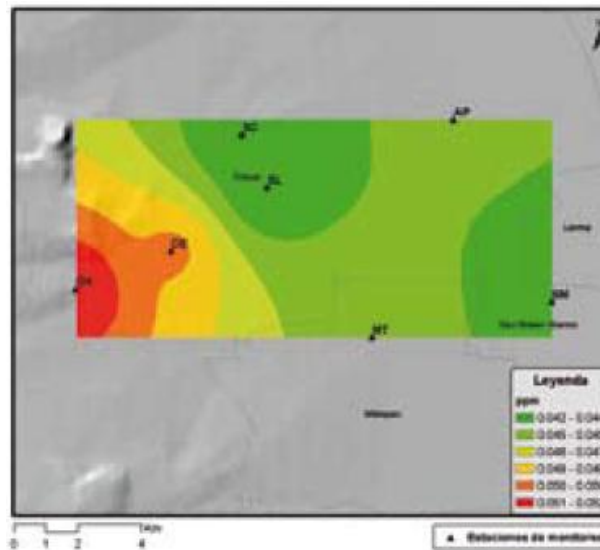
Fuente: INE & SEMARNAT (2007)

Figura 1.8 Distribución espacial de las SO₂ en la ZMVT en el año 2005



Fuente: INE & SEMARNAT (2007)

Figura 1.9 Distribución espacial de las NO₂ en la ZMVT en el año 2005



Fuente: INE & SEMARNAT (2007)

Como se observa en las figuras anteriores y se mencionó anteriormente la interpolación solo se realiza dentro de los puntos de las estaciones con este método (IDW) y programa (Arc GIS), lo cual no permite realizar un análisis que corresponda a las mediciones de las estaciones ya que su programación es radial y el monitoreo se da en todas direcciones del punto de la estación y no se representan los 360° que corresponden al polígono de estudio. Los colores que se utilizan son rojo, amarillo y verde en tonos fuertes y degradados, el tono rojo mas fuerte representa los valores más elevados y el verde los valores de menor concentración simulando los colores del semáforo.

A partir del cuarto almanaque publicado en 2011 la representación espacial de las concentraciones de los contaminantes se muestra mediante mapas con una superficie continua de distintas tonalidades de un mismo color. Las tonalidades más intensas corresponden a las concentraciones más altas, y las de menor intensidad, a las más bajas. Estos mapas se generaron a partir de los promedios de las concentraciones diarias registradas durante el periodo de análisis en cada una de las estaciones que conforman las redes de monitoreo. Los promedios anuales de las concentraciones en cada estación de monitoreo se calcularon considerando un criterio de suficiencia anual de por lo menos el 50% de los datos diarios.

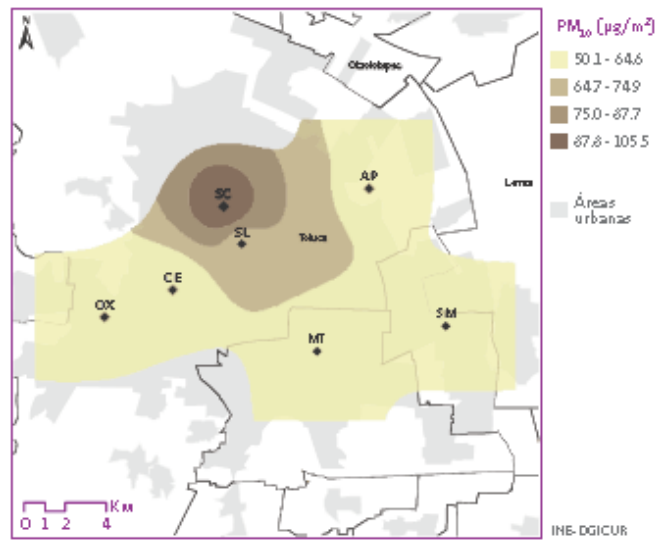
Para estimar las concentraciones en los lugares donde no se cuenta con mediciones (es decir, donde no hay estaciones de monitoreo) se utilizó el método geoestadístico de interpolación kriging, que considera la estructura espacial de los datos (Armstrong, 1998; EPA, 2004). Comúnmente, el área de interpolación para presentar las concentraciones de contaminantes del aire se define a través de un polígono que tiene como vértices las estaciones externas de las redes de monitoreo. Sin embargo, las estaciones de monitoreo tienen una representatividad espacial que va más allá de su ubicación puntual y que depende de la ubicación de la estación, los objetivos del monitoreo, la ubicación relativa de las fuentes cercanas de emisión y su entorno físico, entre otros aspectos. (Ver figuras 1.10, 1.11, 1.12, 1.13, 1.14).

En nuestro país, la ZMVM es la única que reporta la representatividad de sus estaciones, hasta el momento. Por lo anterior, se supuso que en general la escala espacial de las estaciones de las demás ciudades correspondía a una estación urbana de fondo. Por lo tanto, el área de interpolación se amplió más allá de los vértices marcados por las estaciones de monitoreo a 1.5 km de las estaciones externas limítrofes. Es importante señalar que el área de interpolación de las concentraciones para una ciudad puede cambiar dependiendo del contaminante, dado que algunas redes no miden todos los contaminantes en todas las estaciones. Para la mayoría de las ciudades, a excepción de la ZMVM, la interpolación de las concentraciones mediante el método kriging se realizó con el software ArcGIS versión 9.3 en cuatro etapas:

1. Mapeo de la ubicación de las estaciones de monitoreo de las redes: con base en las coordenadas geográficas de las estaciones se generaron los archivos de puntos, para cada red y para cada contaminante, en el formato vectorial shapefile con los promedios anuales de las concentraciones como atributo tabular.
2. Definición del área de interpolación: para ampliar el área se añadieron puntos ficticios a una distancia de 1.5 km de las estaciones externas limítrofes, a los cuales se les asignaron las mismas concentraciones que las calculadas para las estaciones.
3. Interpolación de los datos: se utilizó la herramienta Spatial Analyst Tools, un complemento de ArcGIS que a su vez tiene incorporado el algoritmo de cálculo del método kriging. Este algoritmo requiere como insumo el archivo de puntos del paso anterior, y como resultado se obtienen dos archivos: uno contiene la interpolación de las concentraciones, y el otro los valores respectivos de la varianza, con un formato matricial o raster. En esta etapa se utilizaron los parámetros por defecto para la construcción del semivariograma de los datos analizados, así como la asignación a éste del modelo teórico.
4. Redefinición del dominio interpolado: a partir del archivo raster de la varianza, se recortó el raster de las concentraciones mediante la herramienta raster Calculator, dejando únicamente las superficies de concentraciones que tuvieron un valor de la varianza menor a tres veces su desviación estándar.

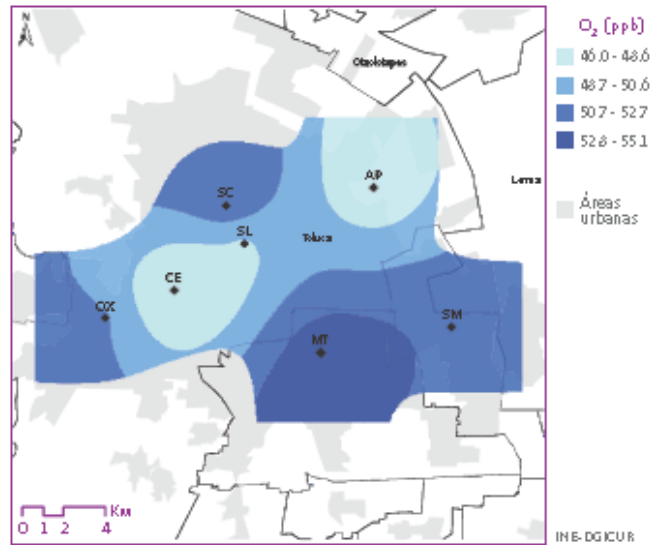
Este proceso de interpolación como se puede observar tiene un alto grado de dificultad y varios pasos a seguir para obtener mapas con una representatividad de 1.5 km alrededor de las estaciones en diferentes colores para cada contaminante. La implementación del método kriging en esta publicación del INE y la SEMARNAT para la representación espacial de los contaminantes lograría dar un panorama de la situación de la ZMVT lamentablemente se ve opacada por la falta de datos y de mediciones de las estaciones y la obtención de polígonos diferentes para cada contaminante, no se puede calcular el grado de error o de acierto de estos mapas.

Figura 1.10 Representación espacial de las concentraciones en base al promedio de los promedios diarios de 24 horas de PM_{10} de la ZMVT 2000 – 2009



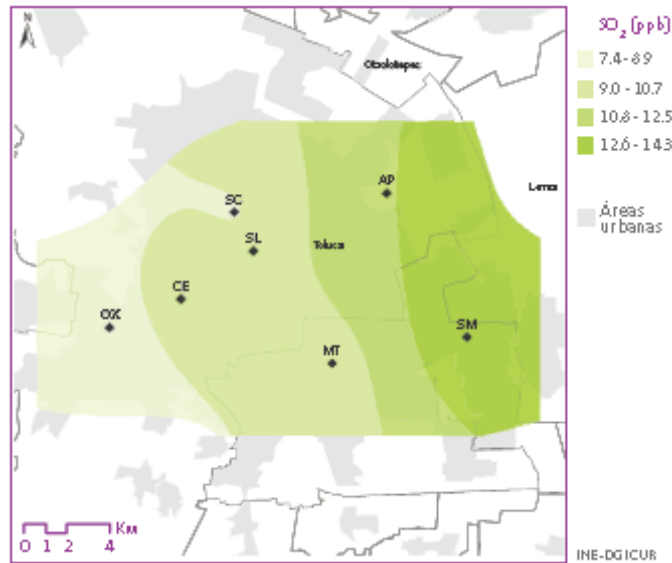
Fuente: INE & SEMARNAT (2011)

Figura 1.11 Representación espacial de las concentraciones utilizando el promedio de los promedios anuales de los máximos diarios de los promedios móviles de 8 h de O₃ en la ZMVT 2000 - 2009



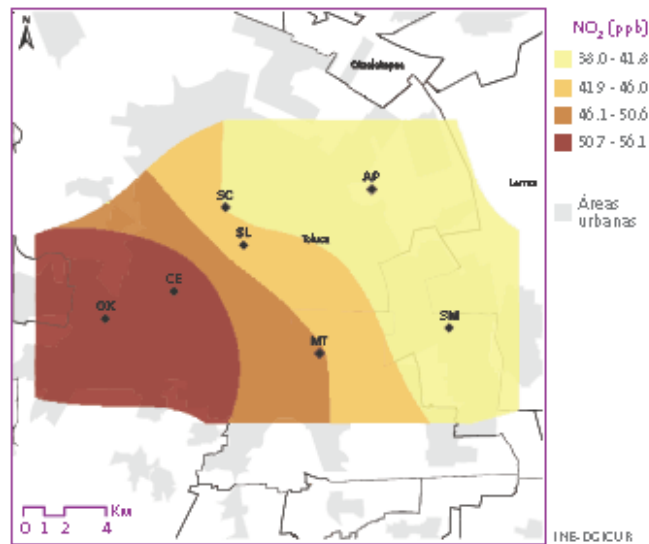
Fuente: INE & SEMARNAT (2011)

Figura 1.12 Representación espacial de las concentraciones utilizando el promedio de los promedios diarios de 24 h de SO₂ en la ZMVT 2000 – 2009



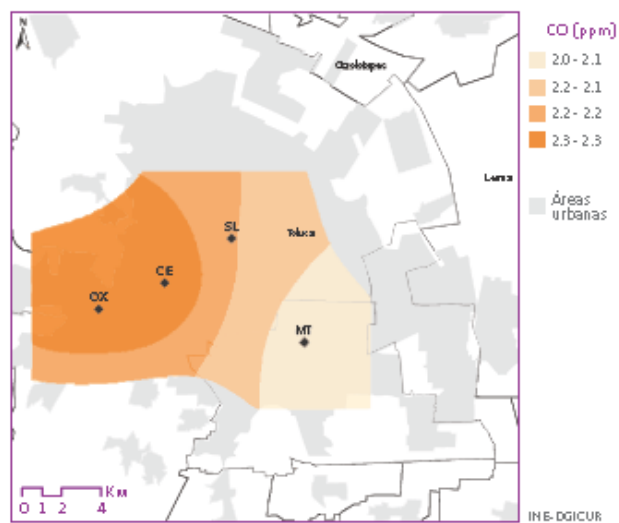
Fuente: INE&SEMARNAT (2011)

Figura 1.13 Representación espacial de las concentraciones utilizando el promedio de los máximos diarios de NO₂ en la ZMVT 2000 – 2009



Fuente: INE & SEMARNAT (2011)

Figura 1.14 Representación espacial de las concentraciones utilizando el promedio de los promedios anuales de los máximos diarios de los promedios móviles de 8 h de CO en la ZMVT 2000 – 2009



Fuente: INE & SEMARNAT (2011)

Cañada et al. (2012) realizó el trabajo *“Modelado de la calidad del aire urbano. Un experimento metodológico con técnicas de interpolación espacial”* en el cual se realiza una línea de investigación sobre la calidad del aire en las ciudades y las injusticias socio-ambientales derivadas, en cuyo marco se abordan cuestiones de tipo metodológico, como es comparar los resultados de los métodos de interpolación, analizar las diferencias y similitudes que emergen en los patrones espaciales obtenidos con las distintas técnicas, valorar su grado de confianza y dirimir cuáles son los más adecuados, teniendo en cuenta criterios estadísticos y geográficos.

Para el caso específico de las inequidades ambientales en la ciudad de Madrid, por ejemplo, Moreno y Cañada (2007) y Cañada et al. (2011) generaron estimaciones espaciales de contaminantes como el dióxido de azufre y las partículas en suspensión respectivamente y la exposición potencial a ellos de distintos grupos de renta. Con ese mismo fin Moreno (2013) ha evaluado la exposición de la población de Madrid al dióxido de nitrógeno, usando superficies estimadas de dicho contaminante dentro de la ciudad. Obviamente, la credibilidad y el rigor de tales estudios depende de la capacidad de las técnicas de predicción para generar resultados continuos espacialmente y confiables. Cañada (2012) describe y valora la situación y los cambios producidos en los niveles de NO₂ en Madrid, en el periodo comprendido entre 2001-2011, contemplando si el cambio en la ubicación y en la reducción del número de estaciones que se produce durante ese periodo afecta decisivamente a los resultados de los valores estimados de NO₂ mediante interpolación.

Según Cañada (2012) son muchos los autores que comparan los diferentes métodos de interpolación y estimación espacial (Hengl, 2009; Babak y Deutsch, 2009; Mueller et al., 2004; Wong et al., 2004; Diem y Comrie, 2002). Que realizan una revisión de estos métodos y señalan los factores que más les afectan: la densidad del muestreo, la distribución espacial de la muestra, el agrupamiento, el tipo de superficie, la varianza de los datos, la normalidad, la resolución espacial buscada, etc.

De Mesnard (2013) reseña abundantes estudios metodológicos sobre el problema de la interpolación espacial con la técnica IDW, recogiendo la diversidad de radios de distancia que se han adoptado para generar estimaciones en puntos nuevos a partir de los datos de las estaciones de medición, desde unas decenas de metros hasta más de 100 km, así como el variable número de estaciones incluidas en la fórmula de cálculo (desde tres o cuatro hasta diez).

Babak y Deutsch (2009) realizan una nueva aportación al método IDW para encontrar el óptimo valor de p y el óptimo número de vecinos usados en la estimación. Consiste en tener en cuenta la estacionariedad de la media y de la varianza y en aplicar un modelo de variograma. Luego realizan un estudio comparativo del Kriging frente al IDW.

Una diferencia crucial en los métodos de interpolación es el modo de determinar los pesos para los puntos muestrales. Si se utilizan métodos deterministas, como la media ponderada por el inverso de la distancia (IDW), los pesos dependen de la distancia entre las estaciones, elevándose esa distancia a un exponente arbitrario e independiente con respecto a los datos, aunque en la realidad no hay tal indefinición, pues su valor depende de factores como la orografía, los vientos dominantes, etc. que condicionan la concentración del contaminante.

Por el contrario, el Kriging, denominado interpolador óptimo, utiliza el semivariograma para determinar los pesos, que dependen de la autocorrelación espacial de los datos medidos en las estaciones utilizadas, por lo tanto los pesos son dependientes del valor de los propios datos (De Mesnard, 2013).

En resumen, no se cuenta con demasiadas orientaciones o reglas para operacionalizar los modelos en casos concretos (lugares y tipo de fenómeno), pues a la multiplicidad y variedad de condicionantes de éstos, se añaden, como hemos señalado antes, las limitaciones de la información disponible y, en particular, la representatividad del muestreo espacial.

Capítulo 2

La Contaminación Atmosférica en el Mundo

2.1 Calidad del aire y estudios principales

2.1.1 Contaminación Atmosférica y Salud Pública en Europa

De acuerdo con un estudio publicado en The Lancet (Künzll et al., 2000) se ha demostrado que, sólo en tres países europeos, entre 19.000 y 44.000 personas fallecen cada año por causa de los efectos de la contaminación atmosférica, lo que supone un coste de alrededor de 50.000 millones de euros al año (Sommer et al., 2000). La contaminación atmosférica, por tanto, sigue siendo una amenaza para la salud pública en Europa a pesar de las normativas cada vez más severas en materia de emisiones, el mayor control de los niveles de contaminación atmosférica y los niveles decrecientes de determinados contaminantes atmosféricos.

Dada esta situación, el programa APHEIS ha sido diseñado para proporcionar a los responsables de la toma de decisiones, a los profesionales de la salud ambiental y, en general, a todos los ciudadanos europeos información más completa, actualizada y sencilla sobre contaminación atmosférica y su impacto en la salud pública. Esto ayudará a que las decisiones que adopten cada uno de estos colectivos en este ámbito estén fundamentadas. El Instituto Nacional de Salud Pública de Francia (InVS), junto con el Instituto Municipal de Salud Pública de Barcelona (IMSP), el Centro Europeo para Medioambiente y Salud de la OMS y otras organizaciones han colaborado para desarrollar el programa.

El programa APHEA (Efectos a Corto Plazo de la Contaminación atmosférica y la Salud: Un enfoque Europeo) pretende establecer un sistema de vigilancia epidemiológica cuyo objetivo es proporcionar información continuada y útil sobre

los efectos de la contaminación atmosférica en la salud pública a los tres colectivos a los que se dirige. Más concretamente, APHEIS analizará los efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica sobre la salud en Europa y se irá actualizando con los resultados que se obtengan de futuras investigaciones.

El programa que se puso en marcha, ERPURS, (Medina et al., 1997) lleva estudiando los efectos de la contaminación atmosférica en la salud pública en el área metropolitana de París desde 1994. En 1997, se incorporaron otras nueve ciudades en cumplimiento de la nueva legislación francesa para el control de la contaminación atmosférica y sus efectos sobre la salud.

Durante su segundo año (2001) el programa APHEIS estuvo valorando la implantación y el funcionamiento del sistema de vigilancia epidemiológica en 26 ciudades de 12 países europeos: España: Barcelona, Bilbao, Madrid, Sevilla, Valencia, Francia: Burdeos,, El Havre, Estrasburgo, Lille, Lyon, Marsella, Paris, Ruán, Toulouse, Grecia: Atenas, Hungría: Budapest, Irlanda: Dublin, Israel: Tel-Aviv, Italia: Roma, Polonia: Cracovia, Reino Unido: Londres, República de Eslovenia: Celje, Liubliana, Suecia: Estocolmo, Göteborg.

2.1.2 Londres

La existencia de contaminación del aire y la necesidad de una legislación para proteger la salud y el bienestar de la población en general, no son fenómenos modernos. En la Inglaterra del siglo trece, la combustión del carbón bituminoso contaminaba la atmosfera de las áreas urbanas, en un grado tal que en 1273, el gobierno inglés promulgó una ley a fin de reducir la contaminación del aire procedente de dicha fuente. En Londres, capital del Reino Unido, del viernes 5 al martes 9 de diciembre de 1952 murieron cerca de 4 mil personas al cubrirse la ciudad con una intensa niebla que se estacionó y atrapó los contaminantes emitidos por las chimeneas y los automóviles de la ciudad. A lo largo de esos días, las concentraciones de partículas suspendidas en la niebla alcanzaron en algunas

zonas 40 veces los niveles normales, mientras que el bióxido de azufre (SO₂) aumentó su concentración cerca de 7 veces. (SEMARNAT, 2000).

Figura 2.1. Niebla londinense de 1952



Fuente: SEMARNAT (2000)

A partir de esta situación se promulgaron en el Reino Unido las Leyes del Aire Limpio –en 1956 y 1968- que prohibieron a los residentes de las áreas urbanas y a los operadores de fábricas el empleo de combustibles generadores de humos que pudieran poner de nuevo en riesgo la salud de la población ante un nuevo fenómeno climatológico de este tipo.

En los sesenta años que han transcurrido desde la Gran Niebla, la calidad del aire en Europa ha mejorado de forma sustancial, en gran medida gracias a una legislación nacional, europea e internacional eficaz.

En algunos casos se puso de manifiesto que el problema de contaminación atmosférica solo podía resolverse a través de la cooperación internacional. En la década de 1960, los estudios demostraron que la lluvia ácida que provocaba la acidificación de los ríos y lagos escandinavos estaba causada por contaminantes emitidos a la atmósfera en la Europa continental. El resultado fue el primer instrumento internacional jurídicamente vinculante para abordar los problemas de

contaminación atmosférica sobre una base regional amplia, a saber, el Convenio sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (LRTAP) de 1979.

Los desarrollos tecnológicos, algunos de ellos impulsados por la legislación, también han contribuido a mejorar el aire de Europa. Por ejemplo, los motores de los automóviles hacen un uso más eficiente del carburante; los nuevos automóviles de gasóleo incorporan filtros de partículas; y las instalaciones industriales emplean equipos de control de la contaminación cada vez más eficaces. También han tenido bastante éxito medidas como las tasas de congestión o los incentivos fiscales a los coches más limpios.

Se han reducido mucho las emisiones de algunos contaminantes atmosféricos, como el dióxido de azufre, el monóxido de carbono y el benceno. Gracias a ello se han logrado claras mejoras de la calidad del aire y por consiguiente también de la salud pública. Por ejemplo, el cambio de carbón a gas natural contribuyó a reducir las concentraciones de dióxido de azufre: en el período 2001-2010, las concentraciones de dióxido de azufre se redujeron a la mitad en la UE.

2.1.3 El caso de Estados Unidos de América

Se ha prestado mucha atención a diversos desastres de contaminación que se han producido durante estos últimos 50 años. El episodio americano más notable el martes 26 de octubre de 1948 en Donora, Pennsylvania. Esta ciudad, situada en una curva del río Monongahela, contaba con una fábrica de ácido sulfúrico, una fábrica de producción de cine y una fundición de acero, además de otras industrias. La niebla pareció acumularse rápidamente, de las 14 000 personas que viven en el valle, unas 600 enfermaron. Los síntomas de tos e irritación de los ojos, nariz y garganta, sin embargo, no se dio señal alguna de alarma, y las fábricas siguieron funcionando al ritmo normal, el tercer día, la niebla negra se

había hecho tan espesa, que resultaba difícil ver a través de la calle, y todo lo que podía verse de las fábricas eran las cimas de sus chimeneas, que seguían descargando contaminantes en el aire. La mayoría de las 20 defunciones que en definitiva resultaron de este episodio tuvieron lugar en el tercer día. Este acontecimiento desastroso y el gran smog de Londres de diciembre de 1952, que causó de 3 000 a 4 000 defunciones, despertaron en muchas personas la conciencia de los peligros que la contaminación del aire representaba para la salud y dio lugar a muchos estudios sobre el tema (Turk, 2004).

En la década de los 40 en Estados Unidos de Norteamérica se iniciaron los esfuerzos para controlar el grado de contaminación del aire. Históricamente, las primeras medidas en contra de la contaminación del aire se tomaron en el estado de California, en vista de las condiciones cada vez peores dentro del estado y en especial en la cuenca atmosférica de Los Ángeles. Pronto se observó que otras áreas urbanas del país experimentaban una disminución en la calidad del aire, a pesar de que se debía a menudo a razones diferentes de aquellas que condujeron específicamente al neblumo del tipo que predominaba en Los Ángeles. Esto dio como resultado que se considerara necesaria la intervención federal en el área global de la contaminación del aire. El más importante desarrollo de leyes legislativas y reglamentarias tuvo lugar durante el periodo de 1955 a 1970. Las reglamentaciones presentes están en continuo proceso de cambio ante la evidencia de los nuevos avances tecnológicos (Wark, 2007).

En Estados Unidos, por ejemplo, en 1970 se publicó el Acta del Aire Limpio, cuyo principal objetivo era lograr el cumplimiento de las normas de la calidad del aire establecidas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) mediante la regulación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes fijas y móviles. Esta acta ha sido reformada en varias ocasiones y sigue vigente. En 1999, casi treinta años después de que fuera publicada y como respuesta a una solicitud del Congreso de ese país, la EPA realizó un estudio retrospectivo que demostró que “la inversión del país en el aire limpio estaba más que justificada por los grandes beneficios que se obtuvieron en

términos de la salud de la población, la calidad del medio ambiente y la productividad”. Las reducciones en las concentraciones de contaminantes atmosféricos registradas en las redes de monitoreo de ese país trajeron beneficios netos acumulados –resultado de la diferencia entre los beneficios y los costos derivados de la aplicación del Acta del Aire Limpio durante veinte años– calculados en 22 billones (millones de millones) de dólares (EPA, 1999; EPA, 2011).

Los resultados de estudios como éstos son extremadamente valiosos para los encargados de mejorar la calidad del aire en Estados Unidos, pues justifican la intervención gubernamental con elementos difíciles de refutar. Se basaron en los datos registrados en las estaciones de monitoreo de todo el país que, junto con los inventarios de emisiones, constituyen el diagnóstico presente e histórico de la calidad del aire y son el punto de partida para estimar su comportamiento en el futuro. Estos datos son utilizados con confianza, pues han sido obtenidos, actualizados y revisados sistemáticamente mediante el esfuerzo conjunto de las autoridades locales y federales comprometidas con el cumplimiento de los objetivos del Acta del Aire Limpio. Los resultados de los estudios mencionados representan, entonces, la culminación de los esfuerzos para obtener, generar y preservar la información de la calidad del aire en un país.

La American Lung Association (Asociación Americana del Pulmón) publicó en su estudio anual sobre la calidad del aire en los Estados Unidos. El informe del 2011 muestra que la calidad del aire es la mejor desde que se la organización empezó a realizar estos informes hace 13 años. El estudio demuestra que los límites fijados por la ley sobre la limpieza del aire (Clean Air Act) para reducir las mayores fuentes de contaminación del aire están funcionando. Sin embargo, la asociación alerta de que los niveles de contaminación todavía son alarmantes en determinadas partes del país.

“El informe State of the Air muestra que se está realizando un progreso real en cuanto a eliminar la contaminación del aire que respiramos”, declaró Charles D.

Connor, presidente y CEO de la American Lung Association. “A pesar de estas mejoras, la calidad del aire de América no es buena, y en muchos lugares de la nación todavía hay niveles peligrosos de contaminación”.

Según informa la propia asociación, más del 40% de los estadounidenses viven en zonas en las que la contaminación del aire amenaza su salud. Es decir, alrededor de 127 millones de personas pueden padecer ataques de asma y de corazón, tos, dificultades respiratorias y hasta muerte prematura. Aquellos que tienen más posibilidades de verse afectados por la contaminación son los niños, las personas con enfermedades respiratorias o de corazón y aquellos que trabajan en el exterior.

El informe “State of the Air 2011” muestra que cuatro de cada diez estadounidenses viven en lugares en los que los niveles de ozono pueden provocar irritación pulmonar, tos, asma y dificultades respiratorias en general. En cuanto a la contaminación de partículas del aire (residuos de diésel, químicos, aerosoles o metales), la más peligrosa de todas, sólo ocho estados han reducido sus niveles.

Las mayores mejoras en calidad del aire las han experimentado 18 de la 25 ciudades más contaminadas de ozono, como Los Ángeles, que en 2012 ha tenido el “smog” más reducido desde 2000. Cuatro ciudades (Pittsburg, San Diego, Philadelphia y Visalia) han tenido este año su nivel más bajo de contaminación, y algunas como Detroit o Birmingham han salido de la lista de las 25 ciudades más contaminadas de Estados Unidos. Por su parte, Santa Fe, en el estado de Nuevo México, se establece como la ciudad más limpia del país.

Aunque la mejora de la calidad del aire es una clara consecuencia de la aplicación de la ley sobre la limpieza del aire (Clean Air Act), algunas empresas muy contaminantes y determinados miembros del Congreso proponen desmantelarla. Desde la American Lung Association afirman que “la promesa de aire limpio y

sano para todos sólo se podrá realizar a través de la implementación completa de la ley sobre limpieza del aire. Nuestra asociación se opone a cualquier intento de debilitarla, retrasarla o aplicarla sólo parcialmente”.

2.1.4 Latinoamérica

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2000) realiza varias publicaciones anuales sobre la situación económica de Latinoamérica entre estas publicaciones se consideran los gastos relacionados con la falta de tecnología limpia, gastos por contaminación atmosférica y gastos en la salud pública a consecuencia de la mala calidad del aire, a continuación se retoman los datos principales publicados y se sintetizan para mejor comprensión.

Uno de los factores que contribuyen al aumento de los índices de contaminación atmosférica en grandes conglomerados urbanos es el crecimiento incremental en el número de vehículos motorizados. En São Paulo, entre 1990 y 1996, la población creció en un 3.4% y la flota de vehículos en 36.5%. El mismo fenómeno ocurre en casi toda América Latina. Santiago de Chile expande su parque automotor al punto de duplicarlo cada cinco años (Simioni, 2003).

El uso de vehículos motorizados, en gran parte de uso privado, constituye uno de los elementos más contaminantes en las ciudades. Esta alta tasa de motorización no causaría necesariamente graves problemas de congestión si los vehículos no fueran usados diariamente por sus propietarios, para llegar a su lugar de trabajo, implicando su circulación por vías ya muy congestionadas. Este comportamiento es propiciado por un transporte público deficiente, así como por la gran extensión y segregación funcional de las ciudades, factores que contribuyen al incremento de las emisiones de fuentes móviles e influyen directamente en los niveles de contaminación atmosférica.

Es claro que la medición de la calidad del aire es un elemento clave para el control ciudadano. Existe un grupo reducido de ciudades que disponen de un sistema de monitoreo de la calidad del aire adecuado y sistemático, pero también es cierto que la gran mayoría de las ciudades de la región no lo tienen. En el primer grupo se incluye Buenos Aires, México, D.F., Rio de Janeiro, Santiago de Chile y São Paulo, que figuran dentro de las 21 ciudades más contaminadas del mundo. En el segundo grupo aparecen el resto de las ciudades de la región, respecto de las cuales no existe información regular, confiable y sistemática sobre los diversos parámetros que se utilizan internacionalmente para medir la calidad del aire. En los 10 últimos años, las ciudades pertenecientes al primer grupo han avanzado de manera significativa en cuanto a la introducción de nuevas tecnologías, no solamente para medir la calidad del aire, sino también para ampliar su capacidad de prevención de episodios críticos, al anticipar el deterioro de la calidad del aire y así tomar medidas oportunas de emergencia y prevención (CEPAL, 2000).

Otros avances en la gestión de la calidad del aire se observan en la elaboración de normas adecuadas, que orientan las políticas y medidas tomadas por los gobiernos. Ciudades como Santiago de Chile, São Paulo o México, D.F., han establecido normas aunque no se acercan a las planteadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), y en los casos del carbono y el dióxido de azufre, respecto de los cuales las normas de las metrópolis latinoamericanas son más permisivas (CEPAL, 2000). En muchos casos, por lo menos se cuenta con mecanismos para actuar cuando se superan los umbrales permitidos, denominados emergencias ambientales. Los países que han avanzado en la lucha contra la contaminación acompañan a los programas de largo plazo —cambios en los procedimientos productivos, mejoramiento del tipo de combustible utilizado y otros— con medidas coyunturales destinadas a los episodios de emergencia: paralización de parte de la actividad industrial, y restricción vehicular, entre otras. En algunas grandes ciudades de la región, las acciones emprendidas para reducir la contaminación atmosférica han tenido un efecto positivo.

En la ciudad de Santiago de Chile, en donde el número de episodios críticos ha ido disminuyendo cada año durante 5 años consecutivos. En São Paulo, la aplicación de medidas como la eliminación del plomo de la gasolina y el control de las emisiones industriales contribuyó también a bajar los niveles de algunos contaminantes atmosféricos en los años recientes. Sin embargo, en general la calidad del aire de las ciudades de la región todavía no puede ser considerada satisfactoria. Para poder lograr mejores resultados, los países deberían elevar en primer lugar la eficiencia de la institucionalidad pública existente. La multisectorialidad que caracteriza a la gestión ambiental, en general, y a la de la calidad del aire, en particular, requiere el involucramiento de sectores muy diversos que cumplen objetivos sociales a veces contradictorios, tales como transporte, industria o salud. Además, las grandes ciudades generalmente están conformadas por áreas conurbadas pertenecientes a jurisdicciones geopolíticas diferentes, que requieren de una coordinación entre entidades locales y federales a veces sumamente complicada. Por lo tanto, uno de los desafíos más importantes que enfrentan las grandes metrópolis es el de articular políticas públicas sectoriales y regionales, a fin de lograr un trabajo coordinado intersectorial y entre diferentes jurisdicciones locales y federales (Simioni, 2003).

Las condiciones meteorológicas y topográficas influyen en la dispersión y el movimiento de estos contaminantes, así como en la magnitud de las concentraciones que afectan al medio ambiente y sus habitantes. Generalmente, los efectos en la población son mucho más intensos en ciudades grandes con emisiones significativas, características adversas de dispersión de contaminantes y altas densidades urbanas. En São Paulo, Santiago de Chile y México, D.F., por ejemplo, los factores meteorológicos, como la inversión térmica, reducen la dispersión de contaminantes, en tanto que las condiciones topográficas y las direcciones de los vientos en México, D.F. y Santiago contribuyen al empeoramiento de las condiciones de calidad del aire. Esto significa que, en dos décadas, ha sucedido un cambio en las principales fuentes de contaminación, desde los procesos de producción a los de consumo. En el período 1970-1990, el

crecimiento del parque de vehículos; éste aumentó en cerca del 250%, alcanzando los 37 millones de automotores. Si no se toman rápidamente medidas apropiadas, hay señales de que la contaminación del aire en América Latina y el Caribe aumentara, amenazando la calidad de la vida y la salud humana (Simioni, 2003).

2.2 México

Además de la zona metropolitana del valle de México, las ciudades más contaminadas del país son: Monterrey, Guadalajara, Minatitlán, Coahuila de Zaragoza, Puebla, Saltillo, Monclova, Lázaro Cárdenas, Ciudad Juárez, Tijuana y la zona Lerma-Toluca (Jiménez, 2001).

Como medida para el control de la contaminación en las grandes zonas urbanas del país, en los últimos años se ha venido consolidando la instalación y operación de redes de monitoreo. Así, la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey, Toluca y Ciudad Juárez cuentan desde hace algunos años con sistemas modernos de medición continua que registran parámetros primarios de la calidad del aire:

- Ozono
- Bióxido de azufre
- Bióxido de nitrógeno
- Monóxido de carbono
- Partículas suspendidas totales
- Partículas menores a 10 micrómetros de diámetro
- Partículas menores a 2.5 micrómetros de diámetro

De igual manera, Tijuana y Mexicali ya empezaron a generar información continua y útil para conocer la calidad del aire que prevalece en esas ciudades. Por otra parte, las redes de Aguascalientes, Manzanillo, Querétaro, Coahuila de Zaragoza, Cananea, Nacozari y San Luis Potosí, que aún no se encuentran totalmente

conformadas, solo generan datos sobre mediciones de algunos contaminantes primarios (INE, 2000).

En México actualmente hay más de ochenta localidades que cuentan con redes o estaciones de monitoreo. Sin embargo, únicamente en las tres grandes zonas metropolitanas (Guadalajara, Monterrey y el valle de México) los datos se han generado de manera constante desde que comenzaron sus operaciones (ver cuadro 2.1). Esto quiere decir que solamente el 40% de la población mexicana puede conocer la calidad del aire que respira, y que las autoridades en las demás ciudades no cuentan con información completa para dimensionar el problema, proponer soluciones y evaluar estrategias. Además, las normas mexicanas para evaluar la calidad del aire son menos estrictas que lo que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS) y, por tanto, el cumplimiento con los límites máximos permisibles que establecen no significa, para algunos contaminantes, que la población esté protegida contra los impactos negativos de esos contaminantes (INE, 2011).

Cuadro 2.1. Resumen por contaminante de los resultados de la evaluación del desempeño de las redes y de la clasificación de las ciudades y zonas metropolitanas con respecto a su grado de contaminación (2009).

Grupo	Zona metropolitana / ciudad	Desempeño de la red de monitoreo	PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	SO ₂	NO ₂	CO
Grupo 1 Zonas metropolitanas grandes	Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)	Muy bueno	4°	S.C.	1°	4°	1°	3°
	Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)	Requiere atención	8°		2°	6°		1°
	Área metropolitana de Monterrey (AMM)	Bueno	3°		4°	5°	2°	4°
Grupo 2 Zonas metropolitanas y ciudades medianas	Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)	Mínimo aceptable	2°					
	Puebla	Mínimo aceptable						
	Tijuana	Bueno						
	León	Bueno	5°		3°	3°		
	Zona Metropolitana de Juárez (ZM Juárez)	Muy bueno	1°					
Grupo 3 Zonas metropolitanas y ciudades pequeñas	San Luis Potosí, SLP	Requiere atención			S.C.		S.C.	S.C.
	Zona Metropolitana de Mexicali (ZM Mexicali)	Bueno						
	Durango	Requiere atención						
Grupo 4 Ciudades con menos de 550 mil habitantes	Irapuato	Mínimo aceptable	9°			2°		
	Gómez Palacio y Lerdo	Requiere atención						
	Celaya	Mínimo aceptable						
	Salamanca	Bueno	6°			1°		2°
	Silao	Mínimo aceptable	7°		5°	7°		
	Tecate	Bueno						
	Rosario	Bueno						
	Tabasco	Requiere atención						
	ZM de Tula-Tepeji	Requiere atención						

Fuente: INE (2011)

Ciudades con avances prometedores para algunos contaminantes atmosféricos: PM_{10} en Monterrey y Guadalajara, O_3 en el valle de México y San Luis Potosí, SO_2 en Salamanca, y CO en Mexicali, Tijuana y Celaya.

En estas localidades se observan reducciones muy alentadoras en las concentraciones de ciertos contaminantes entre 2000 y 2009, aunque todavía no se resuelve la problemática de la calidad del aire.

a. En el Área Metropolitana de Monterrey se cumple con las normas de la calidad del aire para el SO_2 y el CO ; las concentraciones de estos contaminantes se han reducido en los últimos años y muestran una tendencia decreciente. Asimismo, para las PM_{10} el número de días en los que se rebasa la norma se redujo casi el 50% desde 2005, y a partir de ese año disminuyó en 12% la exposición promedio anual; sin embargo, esta ciudad es la tercera ciudad más contaminada con PM_{10} , pues aún no se cumple con la norma de este contaminante.

b. En la Zona Metropolitana de Guadalajara la norma del CO se cumplió en todo el periodo y las concentraciones siguen disminuyendo. Además, el número de días en los que se rebasa la norma de las PM_{10} decreció el 80%, por lo que la exposición promedio anual a este contaminante disminuyó el 13%. Sin embargo, todavía no se cumple la norma de las PM_{10} .

c. En el valle de México las normas del SO_2 y del CO se cumplen, y se observa una clara tendencia decreciente en sus concentraciones. Por otra parte, la exposición promedio anual al ozono se redujo el 27%, el número de días en los que se rebasa la norma disminuyó más del 45%, y se observa una trayectoria decreciente en las concentraciones de este contaminante. No obstante, aún no se cumplen los límites de la norma y continúa siendo la ciudad más contaminada con ozono.

d. En San Luis Potosí se han cumplido los límites normados para el ozono desde que comenzaron a operar las tres estaciones de monitoreo con que cuenta, y la tendencia en las concentraciones es claramente decreciente.

e. En Salamanca las concentraciones de SO_2 disminuyeron tanto que la exposición promedio anual de la población se redujo el 70%, y desde 2009 se cumple con los dos límites de la norma. Sin embargo, aún es la ciudad con más contaminación por bióxido de azufre en el país.

f. En Mexicali la concentración de CO se redujo en 2008 a un tercio respecto a la registrada en 2001, por lo que desde 2007 ya se cumple con la norma, y se observa que las concentraciones continúan reduciéndose.

g. En Tijuana se cumplió con la norma para el CO en todo el periodo, y se observa una tendencia descendente en las concentraciones de los últimos años.

h. En Celaya las concentraciones registradas de CO cumplen holgadamente la norma desde que la red inició operaciones.

Mala situación sobre las PM_{10} en Juárez, Toluca, el valle de México y Mexicali, el O_3 en Guadalajara y León, el NO_2 en Salamanca y el CO en Irapuato.

Entre 2000 y 2009, el ozono y las PM_{10} siguieron siendo los principales problemas de la calidad del aire en varias zonas del país. En algunos casos se evidenciaron por primera vez, y en otros persistieron o se agravaron los que ya se habían documentado en almanaques anteriores.

a. Juárez fue la ciudad más contaminada con PM_{10} en 2009, pues la exposición promedio anual aumentó casi un 10% con respecto a 2005. En los últimos tres años, casi el 45% de los muestreos que se registran anualmente no cumplen con el límite de 24 horas y, por lo tanto, tampoco se cumple con el límite anual.

b. Toluca fue clasificada como la segunda ciudad más contaminada con PM_{10} en 2009. Durante ese año se rebasó la norma en el 42% de los días del año, más que en cualquier otra localidad, y el límite anual se superó con concentraciones que son el doble de dicho límite.

c. El valle de México figura ahora como la cuarta ciudad más contaminada con PM_{10} , pues no se cumple con ninguno de los límites de la norma, y el número de

días en los que se excedió la norma diaria aumentó en los últimos dos años, especialmente en las estaciones del noreste, hasta llegar a 48 en 2009.

d. Mexicali, que figuraba como el primer lugar en el país por contaminación con PM_{10} en el tercer almanaque, no pudo ser clasificada en 2009 por falta de datos. Durante 2008, sin embargo, en el 65% de los muestreos efectuados se rebasó el límite diario, y los registros de años anteriores corresponden a valores que son el doble o el triple de los dos límites de la norma.

e. Guadalajara continúa siendo la segunda ciudad más contaminada con ozono, después del valle de México. La exposición promedio anual a este contaminante aumentó el 27%. Los indicadores de la norma de 2009 sobrepasaron los niveles registrados en el valle de México y muestran una tendencia creciente.

f. León se convirtió en la tercera ciudad más contaminada con ozono en México. En los últimos cuatro años el indicador del límite anual aumentó el 80%, y el número de días en los que se rebasó la norma aumentó de 0 a 23. En esta ciudad tampoco se cumplen los límites de la norma para las PM_{10} desde que la red de monitoreo inició operaciones, y las concentraciones de CO de los últimos dos años excedieron la norma.

g. En Salamanca casi se triplicó la concentración de NO_2 en los últimos tres años, y la concentración de 2009 se encuentra muy cerca del valor de la norma.

h. En Irapuato las concentraciones de CO aumentaron desde que comenzó a operar la red de monitoreo; los dos últimos años muestran un incremento muy notable de dichas concentraciones, con valores muy próximos al límite normado.

Insuficiencia de información de las ciudades y zonas metropolitanas medianas y pequeñas

La calidad y la cantidad de los datos reportados por las distintas redes de monitoreo son muy heterogéneas. Solamente en el valle de México los datos reportados fueron adecuados y suficientes para evaluar la calidad del aire con respecto a todos los contaminantes durante todo el periodo 2000 a 2009. En

general, los datos que reportan la mayoría de las redes de monitoreo son insuficientes para realizar un diagnóstico completo de la calidad del aire entre 2000 y 2009.

- En Toluca, Puebla, Juárez, Tijuana, Mexicali, Tecate y Rosarito no se generó información suficiente para evaluar el cumplimiento de las normas de la calidad del aire o, inclusive, se dejaron de realizar mediciones de uno o varios contaminantes durante uno o varios años.

- Las redes de monitoreo que recientemente iniciaron operaciones enviaron, en su mayoría, información incompleta o insuficiente para el diagnóstico. Destacan las ciudades de Durango, Gómez Palacio y Lerdo, Celaya, y la redes de Tabasco y Tula-Tepeji, para las cuales no fue posible hacer un diagnóstico de la calidad del aire para ninguno de los contaminantes en 2009. De León, San Luis Potosí, Irapuato, Salamanca y Silao la información fue incompleta, aunque suficiente para evaluar uno, dos o tres contaminantes.

a. Limitaciones en la medición de las $PM_{2.5}$

A pesar de ser un contaminante de primera relevancia por sus impactos negativos en la salud (seguramente el más relevante en términos de mortalidad prematura), la medición de las $PM_{2.5}$ todavía no se consolida en las redes de monitoreo que cuentan con equipo para tal efecto. Únicamente fue posible evaluar el cumplimiento de las normas en el valle de México para todos los años, y en Mexicali para tres años. En Monterrey, a pesar de que se realizaron mediciones, la información recopilada solamente fue suficiente para evaluar el número de días en los que se rebasa la norma diaria, y en Guadalajara los datos fueron declarados inválidos por los responsables de la red.

Casos de desempeño favorable fueron las redes de monitoreo del valle de México, Juárez, Monterrey, León, Rosarito, Salamanca, Tecate, Tijuana y Mexicali

Las actividades de mantenimiento de las redes, su operación y los procedimientos de aseguramiento y control de la calidad que se implementaron entre los años

2000 y 2009 en las redes del valle de México y Juárez redundaron en un desempeño muy bueno, mientras que en Monterrey, León, Rosarito, Salamanca, Tecate, Tijuana y Mexicali el desempeño se calificó como bueno.

En estas redes persisten, empero, áreas de oportunidad importantes, como la frecuencia de auditorías en el valle de México, Monterrey y León. El porcentaje de datos válidos (en particular de ozono y PM_{10}) y la oportunidad de la validación son los aspectos más importantes a mejorar en las cuatro redes del estado de Baja California.

Capítulo 3

Zona Metropolitana del Valle de Toluca

3.1 Antecedentes del monitoreo de la calidad del aire en la ZMVT en el periodo 1994 a 2009.

En México el monitoreo sistemático de la calidad del aire comenzó en el Distrito Federal en el año 1984, después de varios intentos fallidos por generar datos confiables a finales de la década de los sesenta y durante la década de los setenta. En 1986 la Red Automática de Monitoreo Atmosférico comenzó la difusión pública de la información obtenida en las 25 estaciones que la conformaban. En ese mismo año se declararon las primeras contingencias atmosféricas y se implementaron medidas para reducir la contaminación en la ciudad, que se complementaron y se fusionaron en el Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica, publicado en 1990. Para 1995 se habían instalado redes de monitoreo y publicado PROAIRES (programas para mejorar la calidad del aire) en Ciudad Juárez, Guadalajara, Monterrey y Toluca y, desde entonces y hasta el año 2000, el gobierno federal, el Banco Mundial y la EPA apoyaron a los gobiernos de las entidades federativas con más de dos y medio millones de dólares para la compra, la instalación y la operación de equipos de monitoreo atmosférico en 25 entidades del país (INE, 2000).

En la actualidad más de ochenta localidades disponen de redes o estaciones de monitoreo operadas por gobiernos municipales o estatales y empresas privadas, y quince cuentan con PROAIRES (INE, 2011). Desde 2003 y hasta la fecha, una tercera parte de estas redes se han incorporado al SINAICA (Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire).

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos de los datos históricos generados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, en diferentes periodos de tiempo correspondientes a los años de estudio de los

cuatro almanaques de datos y tendencias de la calidad del aire, publicados por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales en colaboración con el Instituto Nacional de Ecología desde 1994 hasta el 2009 (ver cuadro 3.1). Lo que permitirá conocer el estado de la calidad del aire de este periodo.

Cuadro 3.1. Cronología de eventos importantes de la ZMVT con respecto a la gestión de la calidad del aire.

Año	Acontecimiento
1975	Las actividades de monitoreo atmosférico en la ciudad de Toluca inician mediante una red manual para Partículas Suspendidas Totales (PST).
1987	Con ayuda de la Facultad de Química de la UAEM, se incorporan las mediciones de óxidos de nitrógeno y bióxido de azufre por vía húmeda en 3 de las 5 estaciones que se tenían establecidas.
1988	A partir de la publicación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente se fue conformando el marco jurídico e institucional que da sustento a la política ambiental en el Estado de México. Se creó la Comisión Estatal de Ecología del Estado de México.
1991	Se promulgó la Ley de Protección al Ambiente del Estado de México, la cual fundamentó la transformación de la Comisión Estatal en la actual Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México.
1992	El Gobierno del Estado de México adquiere los componentes para la instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de Toluca (RAMA)
1993	Instalación de la Red Automática de Monitoreo, integrada por siete estaciones de monitoreo fijas, tres ubicadas en la zona norte, dos en la zona sur y dos en la zona centro de la ZMVT. Inicia operaciones administrada por la Secretaría de Medio Ambiente del gobierno del estado. El Instituto Nacional de Ecología elaboró el primer inventario de emisiones a nivel nacional, que en el caso de la ZMVT sólo consideró a las fuentes fijas del corredor industrial Toluca-Lerma.

Fuente: GEM (2007)

Con base en esta información se distinguen tres periodos importantes para el monitoreo de los contaminantes en la ZMVT las cuales son:

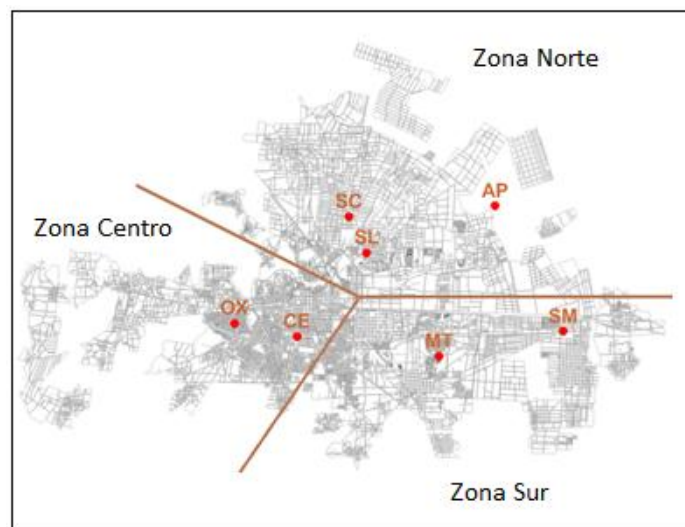
- 1994 – 1999
- 1997 – 2005
- 2000 – 2009

A continuación se describen las características de cada periodo en los cuales se sintetiza el contenido de los cuatro almanaques mencionados anteriormente.

3.1.1 Periodo 1994 – 1999

La red de monitoreo de la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) inició sus operaciones en 1994 y constaba de 7 estaciones de monitoreo continuo (ver figura 3.1) en donde se medían los contaminantes criterio: ozono (O_3), bióxido de nitrógeno (NO_2), bióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y partículas con diámetro menor a 10 micrómetros (PM_{10}). Contaba además con equipo meteorológico que reporta la humedad relativa (HR), la temperatura (TMP), la dirección del viento (DV) y la velocidad del viento (VV).

Figura 3.1. Distribución de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT en 1994.



Fuente: RAMA ZMVT (1994)

Cuadro 3.2 Acontecimientos importantes en el periodo 1994-1997

1994	<p>Con base en la Ley General de Salud, la Secretaría de Salud emitió en diciembre de 1994 las Normas Oficiales Mexicanas en las que se establecen los criterios de calidad del aire en materia de salud.</p> <p>Se rebaso tres días la norma de ozono</p> <p>Se rebaso tres días la norma de dióxido de nitrógeno</p>
1995	<p>Se rebaso cinco días la norma de ozono</p> <p>Se rebaso dos días la norma de dióxido de nitrógeno</p> <p>Se rebaso tres días la norma de partículas suspendidas totales en siete meses</p>
1996	<p>La Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México, realizó un segundo inventario que incluyó fuentes móviles, puntuales, de área y la emisión proveniente de la erosión del suelo</p> <p>Se rebaso cuarenta y nueve días la norma de ozono además de alcanzar los 190 puntos IMECA en el mes de diciembre con un máximo histórico para este contaminante.</p> <p>Se rebaso diez días la norma de dióxido de nitrógeno además de alcanzar los 122 puntos IMECA en el mes de enero con un máximo histórico para este contaminante.</p> <p>Se rebaso diez días la norma de partículas suspendidas totales</p> <p>El monóxido de carbono no rebaso la norma pero alcanzo un valor de 93 puntos IMECA en el mes de enero.</p>
1997	<p>Primer programa “Aire Limpio Programa para el Valle de Toluca 1997-2000” que surge como respuesta a la necesidad planteada por la sociedad de vivir en un ambiente limpio en la ZMVT. Iniciativa del gobierno del estado para cumplir con las normas de calidad del aire establecidas por la federación.</p> <p>Aun cuando no se habían presentado episodios de contingencia ambiental, si se rebasaba las normas de calidad del aire durante algunos días en los tres años anteriores. Este instrumento consta de seis subprogramas integrados por 45 proyectos que incluyen acciones específicas.</p> <p>La Secretaría de Ecología en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología y otras autoridades federales, estatales y municipales, han desarrollado este Programa como un instrumento de planeación estratégica que permita el mejoramiento sustancial de la calidad del aire en la ZMVT.</p>

Fuente: elaboración propia en base a información del Pro Aire GEM, (2000).

Cuadro 3.3. Situación de los contaminantes atmosféricos en la ZMVT de 1994 a 1999

	Periodo	1994	1995	1996	1997	1998	1999
O₃	Concentración horaria más elevada durante el día	De 12 a 16 horas en todas las estaciones					
	Las concentraciones mensuales más elevadas	Mayo y Junio					
	Estaciones con concentraciones máximas de los promedios anuales	Meteppec y Aeropuerto					
	Máximos y segundos máximos más elevados en todo el periodo			★			
	Número de días con concentraciones superiores a la norma	Noviembre		Enero		Mayo	Enero
PM₁₀	Concentraciones promedio más elevadas durante el día	SIN MEDICIÓN				De las 9 a las 11 de la mañana (mayores) y a las 17 en la tarde	
	Concentraciones mensuales más altas					De Enero a Abril	
	Estaciones con promedios mensuales más elevados					Centro y San Cristóbal	
	Concentraciones máximas diarias en promedios de 24 h						★
	Meses con mayor número de días superiores a la norma					Diciembre	Enero
NO₂	Año con mayor número de horas de excedencias a la norma	I N S U F I C I E N T E		★			
	Estación con promedios más altos en todos los meses del periodo		Centro				
	Periodos del día con concentraciones elevadas		De las 8 a las 11 horas (mayores) De las 20 a las 24 horas				
	Menores concentraciones mensuales		De junio a Septiembre				
	Tendencia a la alza en concentraciones en todas las estaciones					★	★

(Continuación)

	Periodo	1994	1995	1996	1997	1998	1999
CO	Periodos del día con concentraciones elevadas	De las 8 a las 10 horas (mayores) De las 19 a las 23 horas					
	Meses con las concentraciones más elevadas	Enero y Febrero De Octubre a Diciembre					
	Estación con promedios más elevados todos los meses del año	Centro					
	Valor Máximo más elevado				★		
	Tendencia a la baja de concentraciones					★	★
	Situación del periodo con respecto a la norma	Dentro de la norma de 11 ppm en promedio móvil de 8 horas					
SO ₂	Periodos del día con concentraciones elevadas	I N S U F I C I E N T E	De las 9 a las 11 horas Más un ligero incremento en las últimas horas del día				
	Estación que registro los valores más elevados		San Mateo Atenco				
	Tendencia histórica de los valores más elevados				★		
	Situación del periodo con respecto a la norma		Dentro de la norma de 11 ppm en promedio móvil de 8 horas				

Fuente: Elaboración propia en base a la información del segundo almanaque publicado por el INE (2000).

3.1.2 Periodo 1997-2005

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT comprendía siete municipios: Lerma, Metepec, Ocoyoacac, San Mateo Atenco, Toluca, Xonacatlan y Zinacantepec; con una extensión municipal de 1209km² y habitada por alrededor de 1.6 millones de personas (INE, 2007).

En la ZMVT se encontraban ubicadas 3326 industrias manufactureras, de las cuales 2297 se ubican en el municipio de Toluca (INE, 2007). La cercanía con la capital del país convirtió a Toluca en un lugar propicio para el establecimiento de este tipo de industrias.

El inventario de emisiones 2000 de la ZMVT muestra la elevada contribución del sector industrial a las emisiones de SO₂, y la gran cantidad de partículas PM₁₀ generadas por la erosión de suelos. Así mismo, se observa que las fuentes

móviles eran responsables mayoritarias de las emisiones de los demás contaminantes.

Cuadro 3.4. Inventario de emisiones de la ZMVT para el año 2000.

Tipo de fuente de emisión	Contaminante (%)				
	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO _x	HC
Fuentes puntuales	15	86	0.06	10	3
Fuentes de area	4	5	0.1	3	24
Fuentes moviles	21	9	99.84	81	69
Erosivas	60	N/A	N/A	N/A	N/A
Vegetation y suelos	N/A	N/A	N/A	6	4

N/A: no se aplica

Fuente: GEM (2000).

A partir de este periodo se manejaron indicadores para presentar de mejor manera los resultados del análisis y se incluyó por primera vez la exposición a la población de la ZMVT. Los indicadores son los siguientes:

- Comportamiento durante el tiempo
- Distribución espacial
- Exposición a la población (ver cuadro 3.6)
- Evaluación del cumplimiento de la norma (ver cuadro 3.7)

Los principales resultados de este periodo se presentan en el cuadro 3.5

Cuadro 3.5 Observaciones de los contaminantes en el periodo 1997 - 2005

Indicadores	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂
Comportamiento durante el tiempo	Valores más altos en la mañana de 6 a 11 y por la tarde entre 18 y 23 En los meses más fríos de noviembre, diciembre y enero igualmente	Valores más altos se aprecian por la mañana y por la noche a las horas de más tráfico vehicular Y en los meses de noviembre, diciembre y enero	Las concentraciones incrementan gradualmente de las 11 a las 17 En el mes de mayo se presentan las concentraciones más altas	Concentraciones más elevadas por la mañana entre 7 y 11 Y en la tarde noche de 18 a 22 En los meses fríos de noviembre, diciembre y enero	Niveles más elevados por la mañana de 8 a 11 Y en los meses de noviembre a enero
Distribución espacial	Los valores más elevados en la estación de monitoreo de San Lorenzo Tepaltitlán	Las mayores concentraciones se presentan en la estación Oxtotitlán	Los valores más altos se presentan al este en Metepec y San Mateo Atenco disminuyendo al oeste	Las concentraciones más elevadas se presentan en la estación de monitoreo de San Cristóbal	Los niveles más elevados se presentan en aeropuerto y van disminuyendo o hacia el suroeste
Exposición a la población		Presenta los valores más altos de las ciudades estudiadas	Se presentan concentraciones anuales elevadas	El promedio anual ha incrementado siendo la segunda ciudad con valores más elevados	Se dio un notorio incremento de cerca del 50% de 2004 a 2005
Evaluación del cumplimiento de la norma	No se rebasa la norma	De manera general a cumplido con la norma	No cumplía con la norma horaria en ningún año	No cumplía con la norma en todos los años y presenta una tendencia creciente	Cumple con la norma
Conclusiones		Se encuentra en cuarto lugar nacional	4 nivel nacional y múltiples concentraciones por encima de la norma.		Ocupa el tercer lugar a nivel nacional aunque cumple con la norma

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados publicados en el tercer almanaque INE (2007).

El indicador que permite estimar la exposición de la población de la ciudad a la contaminación atmosférica es la concentración promedio anual ponderada por población que se realizó posicionando los mapas de concentración sobre el mapa

de población desagregado a nivel de las áreas geoestadísticas básicas (AGEBS). El INE (2007) utilizó el procedimiento geográfico de INTERSECT (intersección), con el que se obtuvo la concentración de los contaminantes asociada a cada AGEB en el área de cobertura. Con esta información se calcularon las concentraciones ponderadas por población mediante la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{\sum C_i \times N_i}{N}$$

en donde:

C_p = concentración ponderada

C_i = concentración en la AGEB i

N_i = número de personas en la AGEB i

N = población total en toda el área de cobertura

Los resultados obtenidos para la ZMVT se muestran en el cuadro 3.6

Cuadro 3.6 Exposición a la población por año (1997 – 2005).

AÑO	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂
1997	2.52	0.045	0.048	SM	0.0091
1998	2.56	0.052	0.053	63	0.0096
1999	2.49	0.051	0.053	62	0.0103
2000	2.27	0.048	0.055	42	0.0091
2001	2.15	0.046	0.046	41	0.0093
2002	1.85	0.047	0.048	48	0.0089
2003	1.91	0.048	0.048	72	0.0082
2004	1.74	0.047	0.047	76	0.0090
2005	2.50	0.046	0.054	85	0.0139

Fuente: Elaboración propia con base en el tercer almanaque del INE (2007).

Cuadro 3.7 Número de días en los que se rebasa la norma (1997 – 2005).

AÑO	NO ₂ 0.21 ppm	O ₃ 0.11 ppm	PM ₁₀ 120 µg/m ³
1997	0	22	SM
1998	1	32	57
1999	0	32	101
2000	2	39	18
2001	0	15	18
2002	1	20	81
2003	0	14	136
2004	1	8	138
2005	0	22	173

Fuente: Elaboración propia con base en el tercer almanaque del INE (2007).

3.1.3 Periodo 2000-2009

A partir de este año fue posible construir indicadores de la calidad del aire que permiten tener información más certera de la calidad del aire (ver cuadros 3.8 y 3.9), lamentable la falta de datos es notoria y afecta los valores estimados por cada contaminante. Se incluyen tres indicadores, a saber:

- 1) **Indicadores relacionados con el cumplimiento de las normas correspondientes a cada contaminante:** se muestran gráficos del cumplimiento a través del tiempo y con respecto a los niveles especificados en las normas para cada año y por estación de monitoreo.
- 2) **Distribución de los días con calidad del aire buena, regular y mala:** se presenta esta información para todos los años del periodo analizado, por cada estación de monitoreo. Cada barra representa un año, y los colores indican el número de días en los que las concentraciones registradas en cada año cumplen con alguna de las siguientes condiciones:
 - a) No excedieron el valor diario normado (verde),
 - b) No excedieron el valor diario normado, pero se encuentran cercanas a este valor (amarillo),
 - c) Excedieron el valor diario normado (rojo), o

d) No se contó con información suficiente para determinar si se excedió el valor normado (blanco).

Los espacios sin barra de color indican que no se realizaron mediciones durante ese año en esa estación.

3) Mapa con la representación espacial de las concentraciones promedio en el periodo 2000-2009 para PM_{10} y 2000 - 2008 para el resto de los contaminantes: resultado de la interpolación espacial de los datos registrados puntualmente en las estaciones de monitoreo. El mapa muestra una superficie continua de concentraciones representadas mediante tonalidades de color. Los colores de mayor intensidad representan las concentraciones más altas, y los de menor intensidad, las más bajas. En cada caso se indica qué dato se utiliza como base para el cálculo.

Para mayor detalle ver anexo 3 de la representación gráfica de los indicadores.

Cuadro 3.8 Síntesis de resultados obtenidos de los indicadores del periodo 2000 – 2009.

Indicadores	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂
Límite anual			Quinto máximo de las concentraciones diarias promedios móviles de 8 horas No fue posible calcular por falta de datos desde 2007 La norma se incumple con frecuencia en los demás años	Promedio anual de los promedios de 24 horas No se cumplió con lo norma La estación Oxtotitlán presenta los valores más bajos	Promedio anual de las concentraciones horarias Se cumplió con la norma
Límite horario de la norma	Segundo máximo del promedio móvil de 8 horas	Segundo máximo horario	Límites fuera de la norma	Percentil 98 de los promedios de 24 horas	Segundo máximo de los promedios de 24 horas
24 horas		Se cumplió en todo el periodo	Concentraciones más altas en la estación Metepec	Incumpliendo de la norma en todas las estaciones y todos los años	Se cumplió con la norma siendo los datos 75% menores respecto al valor de norma
8 horas	Se mantiene por debajo de la norma por más de la mitad del valor			San Cristóbal registra los valores más altos	
Máximo horario					
Calidad del aire Buena Mala Regular	Buena calidad El contaminante no presenta un problema para la calidad del aire	Presento una buena calidad en todos los años No se realizó medición en 2009	Se confirma el problema de este contaminantes con la mayor parte de los días en calidad mala y regular	La mayoría de los años presenta mala calidad o bien no hay medición	Presento una buena calidad en todos los años
Representación espacial de las concentraciones	Los valores más altos se registraron en el centro en las estaciones Centro y Oxtotitlán con una disminución hacia el este	Los valores más altos se registraron en el centro en las estaciones Centro y Oxtotitlán con una disminución hacia el este	Valores más altos al sur de la ciudad en Metepec y disminuye hacia el centro y se incrementa de nuevo al norte en San Cristóbal y Oxtotitlán	Las concentraciones más elevadas se situaron en la estación de San Cristóbal	Las concentraciones más elevadas se registraron al este en San Mateo y disminuye hacia el oeste hasta alcanzar las concentraciones más bajas en Oxtotitlán

Fuente: Elaboración propia con base en el cuarto almanaque INE (2011)

Cuadro 3.9 Comportamiento de los contaminantes durante el año, semana y día 2000-2009

Contaminante	Año	Semana	Hora del día
CO	Mayores concentraciones	Invierno (noviembre, diciembre, enero, febrero)	Lunes a viernes 7 – 11 Menor de 20 – 24
	Menores Concentraciones	Verano (mayo, junio, julio, agosto, septiembre)	Sábado y domingo
NO ₂	Mayores concentraciones	Invierno (noviembre, diciembre, enero, febrero)	Lunes a sábado 8 – 12 Menor de 20 – 24
	Menores Concentraciones	Verano (junio, julio, agosto, septiembre)	Domingo
O ₃	Mayores concentraciones	Verano (abril, mayo, junio, julio)	Lunes a viernes 12 – 16
	Menores Concentraciones	Invierno (octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero)	Sábado y domingo
PM ₁₀	Mayores concentraciones	Invierno (diciembre, enero, febrero, marzo)	Lunes a viernes 9 – 12
	Menores Concentraciones	Verano (junio, julio, agosto, septiembre)	Sábado y domingo
PM _{2.5}	Mayores concentraciones	Invierno y primavera (diciembre, enero, febrero, marzo, abril, mayo)	Lunes a sábado 8 – 14
	Menores Concentraciones	Verano y otoño (junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre)	Domingo
SO ₂	Concentraciones muy similares todo el año	Poco mayores en invierno (enero, febrero, noviembre, diciembre)	Lunes a sábado 8 – 12 Leve de 20 – 24
		Poco menores en verano (junio, julio, agosto, septiembre)	Domingo

Fuente: Elaboración propia con base en el cuarto almanaque INE (2011)

3.1.4 Estudio más reciente 2008 – 2009

Los principales problemas con la calidad del aire en la ZMVT se relacionan con altas concentraciones de PM_{10} y O_3 . La figura 3.2 muestra las estaciones que presentaron algún problema con la calidad del aire durante 2008 o 2009, indicando el o los contaminantes involucrados. En la misma figura también se indica, a través de un círculo con una equis, que la estación Aeropuerto (AP) no midió ningún contaminante en dichos años. Asimismo, en la figura se presenta la distribución de la población en la zona; la población cubierta por las mediciones de PM_{10} equivale a un 41%. Como complemento, el cuadro contiene, para cada uno de los contaminantes normados, el diagnóstico de la calidad del aire elaborado con la información disponible de los dos años más recientes, e incluye las estaciones de monitoreo donde no se cumplió con la norma y un indicador para toda la zona metropolitana, así como el número de días en los que se rebasó el valor de la norma. En este caso, el año más reciente con información disponible es 2008 para O_3 , CO , NO_2 y SO_2 (solo del primer semestre), debido a que no se reportaron mediciones de la RAMA-ZMVT en 2009. Durante 2009 únicamente se cuenta con información de PM_{10} .

Figura 3.2 Principales problemas con la calidad el aire en 2008 o 2009 y distribución de la población.



Fuente: INE (2011).

Del análisis de los últimos años, se observa que las PM_{10} y el O_3 siguen siendo los problemas a resolver, ya que tanto la norma diaria como la anual se incumplen en el último año con información disponible. Por otro lado, el CO , el NO_2 y el SO_2 no representan un problema para la calidad del aire en el valle de Toluca. En la siguiente sección se presentan más detalles sobre la evaluación del cumplimiento de las diferentes normas de la calidad del aire en la zona a lo largo del periodo de análisis.

Toluca fue clasificada como la segunda ciudad más contaminada con PM_{10} en 2009. Durante ese año se rebasó la norma en el 42% de los días del año, más que

en cualquier otra localidad, y el límite anual se superó con concentraciones que son el doble de dicho límite (ver cuadro 3.10).

Cuadro 3.10 Evaluación del cumplimiento de la norma 2009

Año	Contaminante	Norma	Evaluación del cumplimiento de la NOM			Número de días con los que se rebasó el valor de la norma
			Estaciones que no cumplieron con el criterio de suficiencia de información	Estaciones donde no se cumplió con la NOM	Diagnóstico para la ZMVT ^a	
2009	PM ₁₀	24 h		OX, SC	No se cumplió	154
		Anual		OX, SC Y SL	No se cumplió	
2008	O ₃	1 hora		CE, MT, SC Y SL	No se cumplió	4 ^b
		Anual	CE, MT, SC Y SL		D.I.	
2008	CO ^c	8 h			Se cumplió	0
2008	NO ₂ ^c	1 hora			Se cumplió	0
2008	SO ₂ ^c	24 h			Se cumplió	
		Anual			Se cumplió	0

Notas: D.I. = Datos insuficientes. No fue posible evaluar el cumplimiento de la ZMVT por falta de datos. a. La evaluación del cumplimiento de la zona metropolitana se determina con el valor más alto de los valores del indicador (percentil 98, quinto máximo, promedio anual, etc.) que se obtuvieron para cada una de las estaciones de monitoreo. b. El número de días en los que se rebasa la norma horaria de O₃ se encuentra subestimado debido a que solo se reportaron mediciones el primer semestre del año. c. Los indicadores de CO, NO₂ y SO₂ se calcularon con la información que se reportó del primer semestre del año, por los que los resultados podrían estar subestimados.

Fuente: INE (2011).

3.2 Caracterización de la zona de estudio en el año 2011

Ubicada en la porción central del Estado de México, la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se sitúa como la segunda concentración poblacional en importancia de la entidad y la quinta a nivel nacional (ver cuadro 3.11) (GEM, 2007).

Cuadro 3.11 Información general de la ZMVT

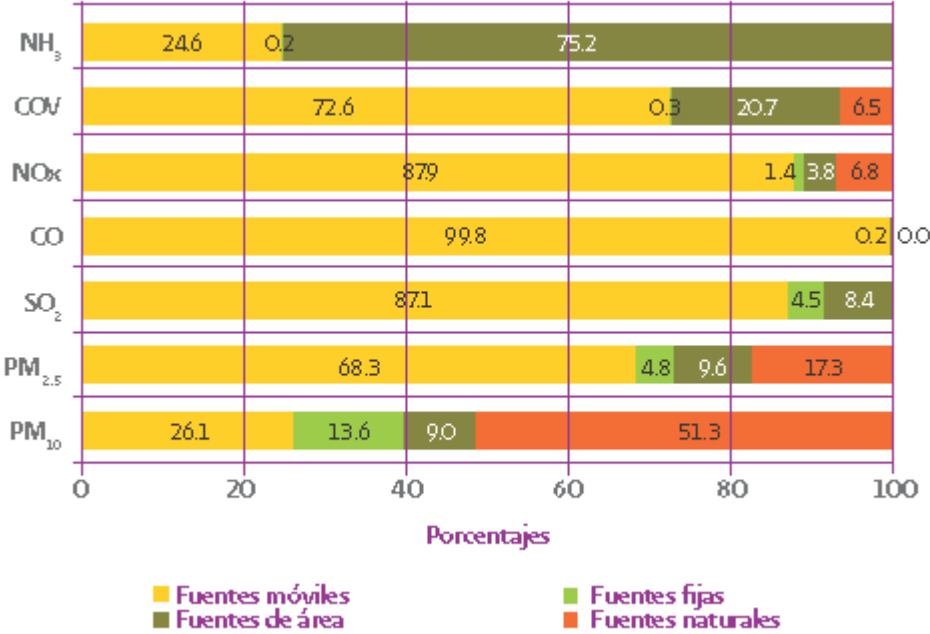
Municipios	Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Toluca, Xonacatlan y Zinacantepec. (SEDESOL et al, 2007)	Flota vehicular en 2009	430 mil vehículos (INEGI, 2010)
		Índice de motorización	233 vehículos por cada mil habitantes (INEGI, 2010)
Superficie	2038 km ² (SEDESOL et al, 2007)	Actividad económica dominante	La ZMVT ha presentado una transformación en sus actividades económicas paso de ser una economía rural a una industrial y de servicios, y cuenta con importantes parques industriales (GEM, 2007).
Altitud	2660 msnm (GEM, 2007)		
Población en 2010	1.85 millones de habitantes (INEGI, 2010)		

De acuerdo con el Programa de Aire Limpio del Valle de Toluca 2007 – 2011 la evolución de la ZMVT es similar a la de otras ciudades del país, al pasar de una economía rural a una industrial y de servicios, aunada a un continuo proceso de urbanización con la consiguiente demanda de servicios y satisfactores, provocando como consecuencia diversos problemas ambientales, tales como: cambios de los usos del suelo que han reducido la frontera agrícola y forestal, invasión de áreas naturales protegidas, deforestación, procesos de erosión, incendios forestales, quemas de residuos a cielo abierto, así como las emisiones de contaminantes provenientes de industrias que carecen de sistemas de control y de vehículos automotores con condiciones mecánicas en mal estado, entre otros. Una tercera parte de su territorio tiene uso urbano; en ella se asientan 4,291 unidades manufactureras, 26,525 comercios, 14,665 establecimientos de servicio y posee un parque vehicular mayor a 260 mil vehículos.

Todo lo anterior se refleja en la intensidad con que los distintos sectores productivos contribuyen en las emisiones contaminantes, es así que en la ZMVT se estima la generación de 608,140 toneladas de contaminantes al año de las cuales el 93% proviene del sector transporte, el 6% de los sectores industrial y comercial y el 1% de los suelos y su vegetación. Por contaminante, los suelos con procesos de erosión y campos agrícolas aportan el 60% de partículas menores a 10 micras, o PM₁₀, el sector industrial aporta 85% de las emisiones de bióxido de azufre, los vehículos automotores aportan 99% del monóxido de carbono, 81% de los óxidos de nitrógeno y 69% de los hidrocarburos (GEM, 2007).

La ZMVT cuenta con un inventario de emisiones que se actualiza periódicamente. En el más reciente, del año 2004, (ver figura 3.3) resalta que los vehículos automotores aportan un gran porcentaje de las emisiones de COV, NOx y CO, y que contribuyen significativamente a las emisiones de SO₂ y PM_{2.5}, de manera similar a otras grandes zonas metropolitanas. Por otra parte, los suelos desprovistos de vegetación son la principal fuente de emisión de PM₁₀, y las fuentes de área son las que aportan más a las emisiones de NH₃ (GEM, 2007).

Figura 3.3 Inventario de emisiones de la ZMVT 2004



Fuente: GEM (2004).

3.2.1 Orografía

Es importante considerar la estructura del sistema orográfico que rige sobre el Valle de Toluca, porque como se ha mencionado con anterioridad, ésta moldea las condiciones de la dinámica del viento a lo largo del año, además de participar en la alteración del viento en función del comportamiento de los centros tanto de alta como de baja presión que suceden sobre elementos orográficos singulares por su altitud y volumen.

El Valle de Toluca está rodeado por grandes sierras y aparatos volcánicos individuales, entre estos están: al suroeste, la Sierra Nevada de Toluca; al este, la Sierra de las Cruces; al noreste, la Sierra de Monte Alto y al sur, la Sierra Matlazinca, además se encuentran en forma aislada algunas elevaciones entre las que destaca el volcán Molcajete en la Sierra Morelos, al noreste del municipio Toluca.

Particularmente, el volcán Nevado de Toluca funciona de manera determinante en la dinámica del viento del valle a partir de los sistemas de baja y alta presión que se generan sobre esta región a lo largo del año. En el área de su pie de monte, dentro del municipio Zinacantepec existen elevaciones menores como el cerro La Calera y el volcán Gordo, que son elementos determinantes en la dirección del viento que sopla del sur.

En la parte que corresponde a la Sierra de Monte Alto, entre las principales elevaciones está el cerro Xeshadi, y en la Sierra de las Cruces destacan el cerro El Gavilán, y los volcanes cerros La Palma y La Campana, los cuales conforman una obstrucción considerable para los vientos alisios a su arribo sobre este valle.

En el cuadro 3.12 se presentan las elevaciones que por su altitud son consideradas primordiales y determinantes en las modificaciones que sufre la dinámica de los vientos que predominan en la ZMVT.

Cuadro 3.12 Principales elevaciones de la ZMVT

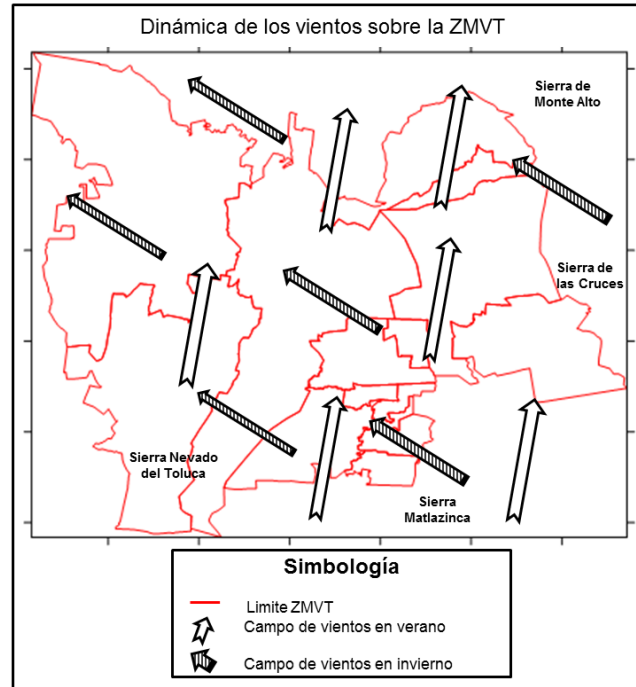
Elevación	Ubicación	Altitud (msnm)	Municipio
La Campana	Sierra de Monte Alto	3,300	Lerma
El Xeshadi	Sierra de Monte Alto	3,400	Lerma
El Gavilán	Sierra de las Cruces	3,300	Ocoyoacac
Molcajete	Sierra Morelos	2,900	Toluca
El Ombligo	Nevado de Toluca	4,600	Toluca
Pico del Fraile	Nevado de Toluca	4,660	Toluca
Volcán Gordo	Nevado de Toluca	3,700	Zinacantepec
La Calera	Nevado de Toluca	3,740	Zinacantepec

Fuente: GEM (2007)

3.2.2 Dinámica de vientos

En esta zona la circulación del viento en dirección y frecuencia es muy compleja y variada en gran medida en función del relieve, pero en general, el Valle de Toluca se encuentra en la zona de influencia de los vientos alisios, cuya intensidad se expresa más bien débil e incluso estable en el período que comprende la época fría (finales de noviembre a finales de febrero) predominando los vientos provenientes del sur y con dirección norte, todo esto en función del relieve, es el caso del volcán “Nevado de Toluca” que no permite que circulen libres los vientos que llegan por el sur provocando el cambio de su trayectoria y haciendo que se deslicen hacia el valle por su flanco sureste (ver figura 3.4).

Figura 3.4 Dinámica de los vientos sobre la ZMVT



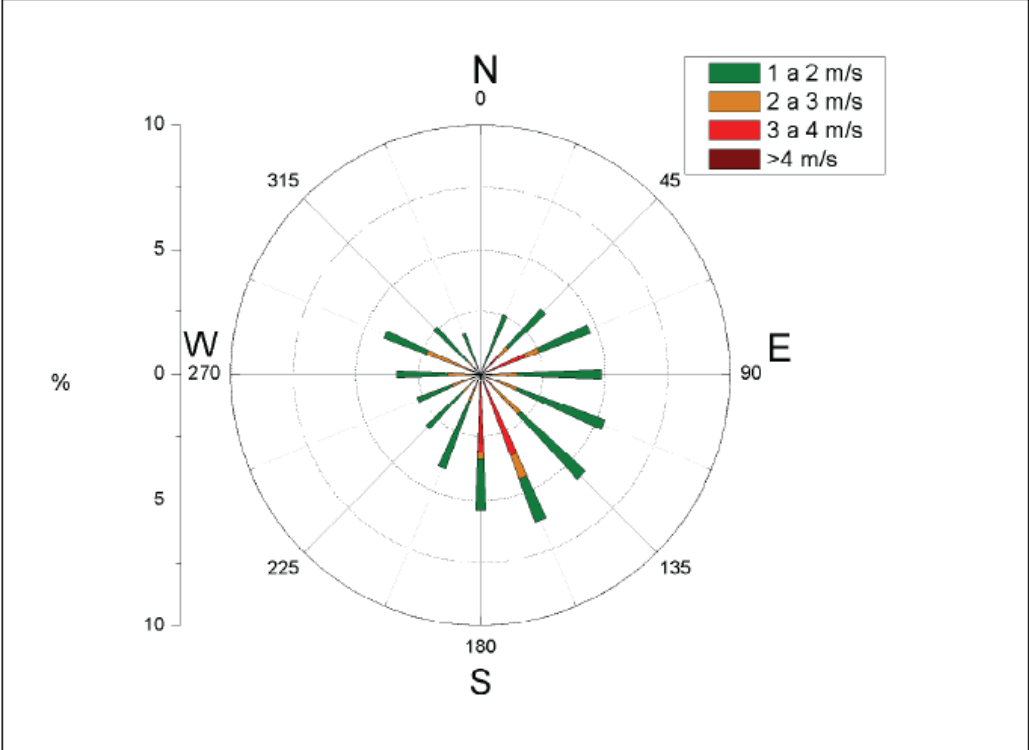
Fuente: Elaboración propia a partir del mapa del Proaire 2007 (GEM, 2007)

En el período que comprende la época seca-cálida, (meses de marzo a mayo), los vientos se intensifican más y modifican su curso por la aceleración de los alisios; sin embargo, aquí influye el sistema de relieve que presenta la Sierra de las Cruces orientada de norte a sur, la cual obstruye de manera determinante el paso libre de los vientos alisios hacia este valle; así pues se encuentran estos vientos del este con los del sur para rotar hacia el noroeste describiendo una prominente curvatura en sentido de las manecillas del reloj.

Para cerrar el ciclo anual, se muestra la máxima expresión de los alisios durante la época de lluvia, cuya dinámica se expresa del este y sureste con dirección noroeste y norte favoreciendo la transportación de contaminantes generados en lugares como la zona industrial del municipio de Lerma para depositarse y ser afectada la porción extrema noroeste de Toluca.

El registro del comportamiento del viento a través de los años se refleja en la rosa anual de los vientos (ver anexo 2 rosa de los vientos por estación), que hace de manifiesto para el caso de la ZMVT una marcada dominancia de los vientos del sur y sureste (ver figura 3.5), situación que refleja las concentraciones de partículas suspendidas fracción respirable PM_{10} y las totales PST más elevadas, en época seca.

Figura 3.5 Rosa anual de los vientos



Fuente: RAMA ZMVT (2011)

3.3 Diseño de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Para que una red de monitoreo proporcione datos confiables y representativos se consideran los siguientes aspectos:

a. Zona de estudio.

Lugar geográfico donde se desarrollará el estudio. Debe estar de acuerdo a los objetivos del programa y debe tomar en consideración la topografía del sitio junto con las variables del clima.

b. Clima.

El clima es un factor que va a determinar la selección del sitio de muestreo. Los factores del clima más significativos son: presión, temperatura, precipitación pluvial, velocidad y dirección del viento.

c. Selección del sitio de muestreo.

De acuerdo a lo especificado por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA), los sitios de muestreo deben:

- Ser representativos del área donde se ubican.
- Proporcionar datos comparables con el resto de los equipos de monitoreo.
- Tener un tiempo de vida útil largo.
- Ser accesibles permanentemente.
- Contar con suministros de energía eléctrica seguros.
- Ser capaces de resistir condiciones extremas.
- Estar protegidos contra actos de vandalismo.

d. Inventario de emisiones.

El inventario de emisiones enumera todas las fuentes de emisión que existen en la zona de estudio y define el tipo de contaminante, número y tamaño de cada una de ellas.

e. Manejo y reporte de datos.

Los datos deberán ser validados y se debe contar con un número mínimo de ellos por periodo de tiempo para que la información se considere veraz.

f. Métodos de análisis para los contaminantes.

Se cuenta con metodologías oficiales establecidas como estándares para la medición y análisis de los contaminantes considerados como criterio a nivel internacional. Estos contaminantes son: Bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, hidrocarburos no metano y material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Las metodologías para el caso de México se encuentran como Normas Oficiales Mexicanas.

g. Aspectos contables.

Debe considerar el costo de los equipos de monitoreo, la construcción física de los sitios, el equipo de oficina, el personal y los medios de transporte. (No debe olvidar considerar los consumibles y los gases de calibración).

h. Número mínimo de estaciones.

El número promedio de estaciones de monitoreo que deben considerarse para los programas de vigilancia de la calidad del aire en zonas urbanas e industriales de acuerdo a la Organización Panamericana de la Salud va de 2 a 10, dependiendo del tamaño de la población. Para el Valle de Toluca, que cuenta con una población de 1, 846, 116 habitantes, el número mínimo de estaciones es 5. La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del valle de Toluca cuenta con 7 estaciones.

3.3.1 Operación de la RAMA

De forma general, la medición de la contaminación del aire, se inicia con la obtención de la muestra de aire ambiente en la caseta, la cual pasa a los analizadores y se procesa, para generar datos los cuales posteriormente se envían al Centro de Control, vía Internet (TCP/IP), donde se almacenan y se validan, para integrar los diferentes reportes de calidad del aire.

La Red opera las 24 horas del día, los 365 días del año, por lo que la generación de datos es constante y en tiempo real.

La Red Automática mide 6 contaminantes:

- Bióxido de Azufre
- Bióxido de Nitrógeno
- Monóxido de Carbono
- Ozono
- Partículas Suspendidas Menores a 10 micras
- Partículas Suspendidas Menores a 2.5 micras

Dada la relación entre la contaminación atmosférica y las condiciones del clima, se miden parámetros meteorológicos, como: Temperatura Ambiente, Humedad Relativa, Velocidad y Dirección del Viento, Presión Atmosférica, Radiación Solar Total y Precipitación Pluvial.

3.3.2 Estaciones de Monitoreo Atmosférico

Una estación de monitoreo consiste en una caseta que contiene analizadores automáticos, monitores, sensores meteorológicos, entre otros, destinados a monitorear las concentraciones de uno o más contaminantes del aire y, por lo general, algunos parámetros meteorológicos; con la finalidad de evaluar la calidad del aire en un área determinada. Es necesario que el lugar cuente con una fuente adecuada de energía, con seguridad y que esté debidamente protegido de los

elementos climáticos. El Valle de Toluca se encuentra dividido para su estudio en 3 regiones. En cada una de ellas se encuentran distribuidas las estaciones de monitoreo que se muestra en el cuadro 3.13. Estas estaciones han tenido una evolución desde su instalación y se resume en el cuadro 3.14.

Cuadro 3.13 Distribución de las estaciones de monitoreo en la ZMVT

Zonas	Estación	Clasificación
Centro	Toluca centro	Urbana
	Oxtotitlán	Urbana
	Aeropuerto	Industrial - Vehicular
Norte	San Cristóbal Huichochitlán	Sub urbana
	Meteppec	Urbana
Sur	Ceboruco	Urbana
	San Mateo Atenco	Sub urbana

Fuente: Jorge Martínez Castillejos (2007).

Cuadro 3.14 Evolución de la medición de los contaminantes criterio

Estaciones		Clave	Año	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2010	2011	
Z O N A N O R T E	San Lorenzo	SL	O ₃	★	★	★	★	★	★	★	★	R E U B I C A D A	C E B O R U C O	
			CO	★	★	★	★	★	★	★	★			
			SO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★			
			NO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★			
			PM ₁₀					★	★	★	★			
	Aeropuerto	AP	O ₃	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			CO											★
			SO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			NO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			PM ₁₀					★	★	★	★	★	★	★
	San Cristóbal	SC	O ₃									★	★	★
			CO											★
			SO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			NO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			PM ₁₀					★	★	★	★	★	★	★
Z O N A C E N T R O	Oxtotitlán	OX	O ₃									★	★	★
			CO	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			SO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			NO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			PM ₁₀					★	★	★	★	★	★	★
	Toluca Centro	CE	O ₃	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			CO	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			SO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			NO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			PM ₁₀					★	★	★	★	★	★	★
Z O N A S U R	Metepéc	MT	O ₃	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			CO	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			SO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			NO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			PM ₁₀					★	★	★	★	★	★	★
	San Mateo Atenco	SM	O ₃							★	★	★	★	★
			CO											★
			SO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			NO ₂	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
			PM ₁₀					★	★	★	★	★	★	★

Nota: Las celdas en blanco indican que no se medían contaminantes en ese año. El cambio de la estación San Lorenzo también implicó un cambio de zona pasando del norte al sur en Ceboruco. En los años no mencionados (2002-2009) no hubieron cambios.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por la RAMA ZMVT (2011).

a. Escala Urbana

Las mediciones a escala urbana caracterizan las condiciones sobre un área metropolitana entera. Para alcanzar una cobertura de escala urbana se requiere más de un sitio de medición. Las áreas donde se ubiquen las estaciones deben representar condiciones homogéneas, a fin de abarcar un radio amplio. Tales mediciones son útiles para calcular las tendencias de la calidad del aire en toda una ciudad y, por ende, para la eficacia de las estrategias de control de contaminación a gran escala. Las mediciones que representan áreas que abarcan toda una ciudad también sirven como base válida para hacer comparaciones entre diferentes ciudades.

Las siguientes figuras (3.6 a 3.16) corresponden a una visita de campo realizada a la estación Centro en el Gimnasio "Profr. Guillermo Ortega Vargas" de la UAEM, Calle Venustiano Carranza esq. Mariano Matamoros, Toluca, Méx. En donde me explicaron el proceso de tomas de muestras y análisis de las mediciones de contaminantes y como son procesadas por cada máquina y transmitidas cada minuto a una computadora central y de ahí a la RAMA en donde son validados y almacenados. Esta visita me permitió observar cada proceso y reforzar el trabajo de investigación.

Figura 3.6 Estación Centro



Figura 3.7 Tubos de entrada de muestras de aire y distribución a los diferentes analizadores de contaminantes.



Figura 3.8 Analizador de partículas.



Figura 3.9 Analizador de ozono
Pantalla externa en tiempo real.

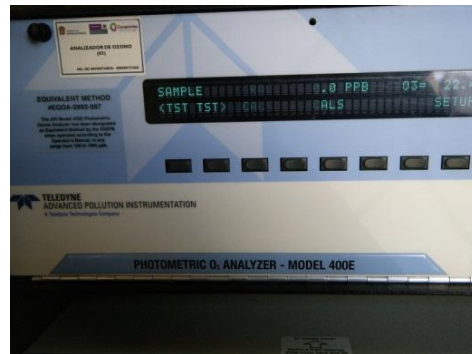


Figura 3.10 Analizador de ozono
Vista interna del proceso que permite obtener el valor a reportar.

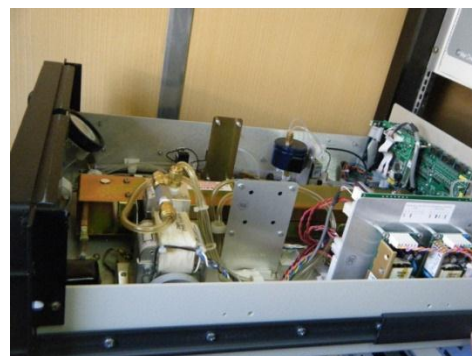


Figura 3.11 Analizador de óxidos de nitrógeno
Pantalla externa en tiempo real.

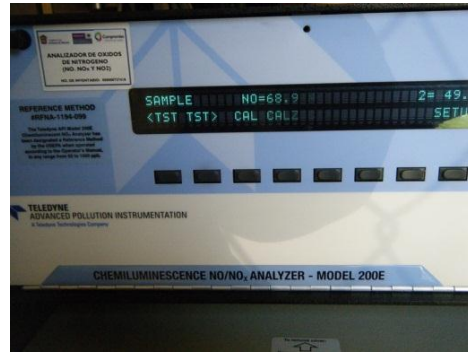


Figura 3.12 Analizador de óxido de azufre
Pantalla externa en tiempo real.

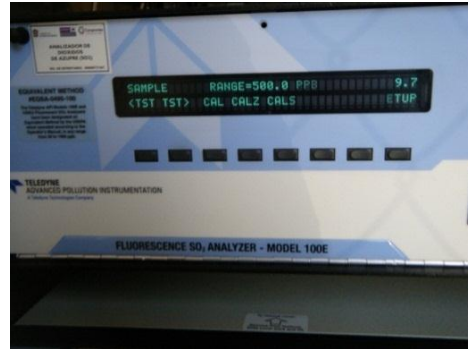


Figura 3.13 Analizador de monóxido de carbono
Pantalla externa en tiempo real.

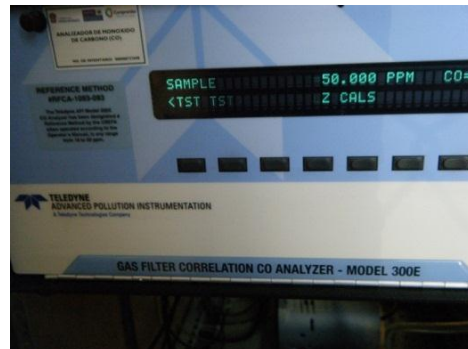


Figura 3.14 En este procesador se guardan los datos y se transforman para poder ser leídos y almacenados en una computadora convencional.



Figura 3.15 Esta computadora manda en tiempo real a través de internet todos los valores obtenidos por los analizadores al centro de control ubicado en Ex Rancho San Lorenzo, Conjunto SEDAGRO, Edificio "C", planta baja S/N San Lorenzo Coacalco para ser revisados.



Figura 3.16 Centro de control de la RAMA de la ZMVT.

Aquí se analizan los datos obtenidos y se transforman para q puedan ser consultados, se guardan todas la bases de datos en tablas de Excel, se eliminan valores y se elaboran los reportes correspondientes.



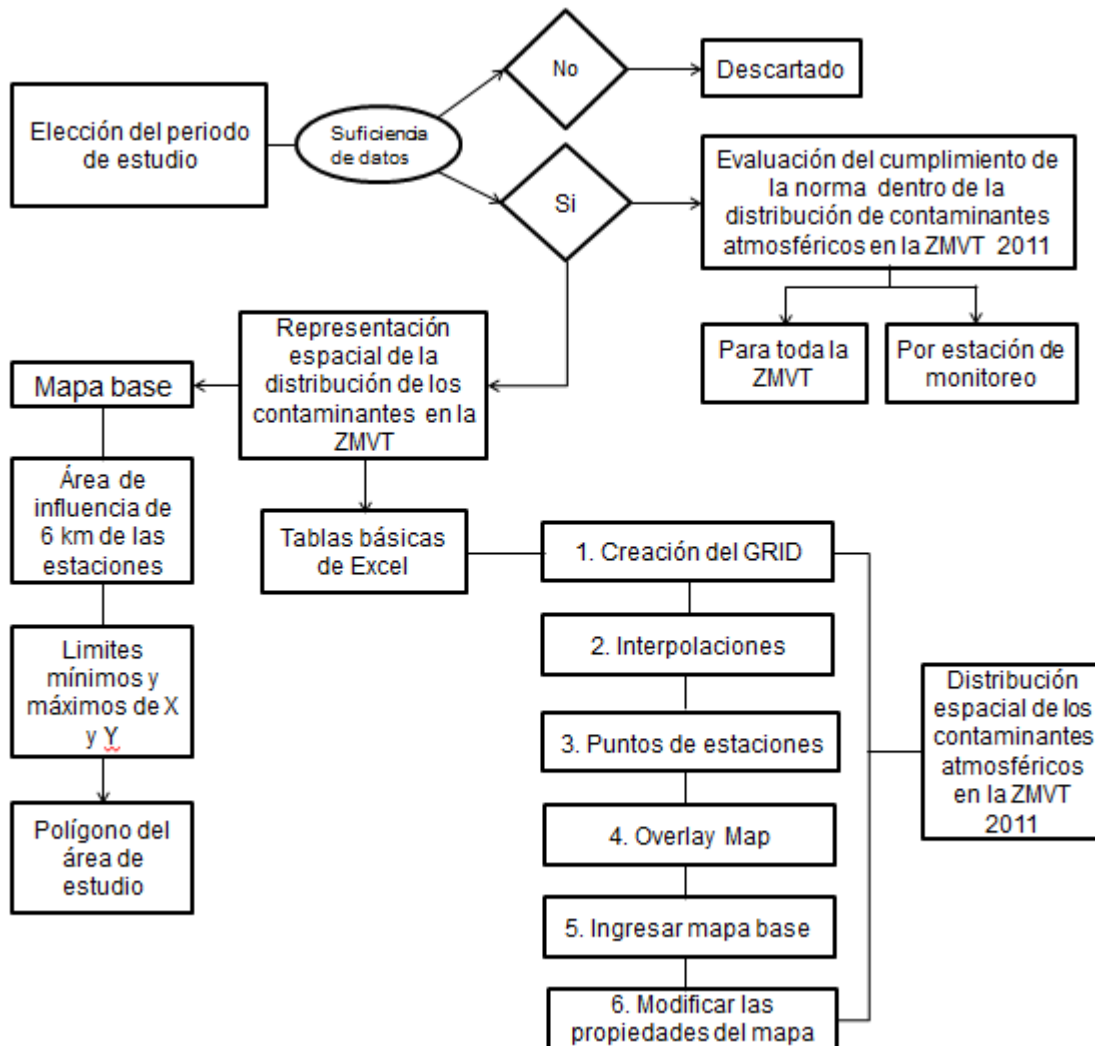
Capítulo 4

Metodología

A continuación se describe la metodología utilizada en este trabajo para el procesamiento de las bases de datos de contaminantes atmosféricos y para la generación de mapas que permiten analizar e ilustrar de manera sencilla la calidad del aire.

En la figura 4.1 se resume a grandes rasgos toda la metodología empleada:

Figura 4.1 Metodología para la representación de la distribución espacial de los contaminantes atmosféricos de la ZMVT 2011.



Fuente: Elaboración propia con base en la metodología empleada en el cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad el aire en veinte ciudades mexicanas (2000 – 2009).

4.1 Elección del periodo de estudio

La decisión del periodo de estudio para realizar el análisis de distribución de contaminantes se basó en dos factores: el primero es que se cuente con información para todos los contaminantes y el segundo factor que la información recopilada cumpla con al menos el 25% de las mediciones en un periodo de un año. Para ello se utilizaron los datos históricos de las bases de datos horarios de todas las estaciones que conforman la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT desde 1994 hasta los datos más recientes del 2013, ya que se necesitan los datos completos del año, es por esto que no se incluye 2014. Para poder obtener una tendencia datos se necesitan al menos tres años consecutivos de información es por esto que no se incluyen las tendencias.

Los datos proporcionados por la red de monitoreo fueron sometidos a un proceso de revisión y depuración en la RAMA en donde se eliminaron los valores etiquetados con banderas considerados como no válidos, pues la mayoría de los equipos de monitoreo cuentan con límites inferiores de detección que son mayores que cero; al igual que aquellos negativos o nulos o que están fuera del patrón típico de los contaminantes.

El siguiente paso fue calcular la suficiencia de datos para cada contaminante de acuerdo con los estándares internacionales, la evaluación del cumplimiento con los estándares de la calidad del aire debe realizarse únicamente cuando se cumpla con el criterio de suficiencia del 75% de datos diarios y anuales (Ministry for the Environment, 2009). Es decir asegurarnos de elegir un año en el que se contara con al menos el 75 % de los datos en todas las estaciones y todos los contaminantes. Para ello en primer término se calculó la sumatoria, de ese resultado se dividió entre 8760 para los años regulares (que se obtiene de multiplicar los 365 días del año por las 24 horas del día) y 8784 para los años bisiestos (que se obtiene de multiplicar los 366 días del año por las 24 horas del día); el resultado de esta división se multiplico por 100 y se redondeó para obtener números cerrados en los porcentajes.

Estos resultados se presentan en el cuadro 4.1, el compilado integra los porcentajes por estación y año; asignando colores representativos: rojo para los años con menos del 50% de los datos, amarillo para los valores de 51% a 74% y verde para los valores de 75% a 100%.

Cuadro 4.1 Compilado de porcentaje de datos de la RAMA en la ZMVT por estación y año.

ZONA	CENTRO	AÑO	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
			OX	CO	60	90	68	77	93	90	98	85	86	98	97	95	85	13	28			73
	SO ₂		72	73	85	95	92	97	92	91	96	¹⁰⁰	96	93	79	61			73	24	98	
	NO ₂	18	94	84	84	91	92	96	94	92	96	95	95	93	97				75	24	97	
	O ₃								57	93	98	98	96	97	97	16			75	64	96	
	PM ₁₀								77	39	90	93	93	91	91	96	98	97	35	74	24	90
	PM _{2.5}																		74	24	96	
	CE	CO	69	89	82	80	92	90	98	93	99	97	89	93	71	42	32			88	98	93
		SO ₂		64	70	68	93	91	98	98	99	96	¹⁰⁰	92	66	35	39			88	98	89
		NO ₂	24	90	83	68	96	93	98	99	99	97	97	87	49	88				90	99	90
		O ₃	70	90	90	96	95	93	99	99	99	93	98	92	94	94	16			90	98	93
		PM ₁₀							76	54	59	93	96	88	91	98	40			87	98	84
		PM _{2.5}																		88	98	93
	MT	CO	37	80	79	78	91	8	98	95	97	97	97	96	25		24			98	94	95
		SO ₂		82	80	82	92	8	97	95	99	98	¹⁰⁰	99	25		14			96	93	95
		NO ₂	19	91	90	89	93	86	92	88	97	97	98	96	20					99	95	96
		O ₃	79	89	88	98	94	87	98	97	98	98	99	99	24					99	94	95
		PM ₁₀							73	59	81	95	97	95	23		54	62	29	98	94	95
		PM _{2.5}																		96	95	94
	CB	CO	1		88	88	91	88	93	90	97	97	95	94	80	40	54			97	47	68
		SO ₂			86	65	94	92	95	93	97	98	¹⁰⁰	95	88	39	47			95	48	69
		NO ₂			78	60	84	95	97	93	94	94	97	96	73	16				97	48	65
		O ₃	19		87	98	86	89	94	64	94	98	97	95	84	48				94	79	70
		PM ₁₀							90	67	89	95	96	94	88	18	85	98	37	94	49	60
		PM _{2.5}																		95	48	60
	SM	CO																		95	49	97
		SO ₂		74	74	85	87	82	85	91	96	97	¹⁰⁰	90	92	59				94	49	94
		NO ₂	30	89	78	56	92	92	86	89	96	95	92	82	93	29				95	48	95
		O ₃						46	90	90	97	95	98	89	92	72				94	96	98
		PM ₁₀							66	53	88	89	96	86	88	35		62	36	93	54	97
		PM _{2.5}																		93	54	97
	AP	CO																		91	99	92
		SO ₂		71	64	91	91	90	97	83	94	99	¹⁰⁰	99	43					88	99	93
		NO ₂	15	92	67	91	82	82	90	85	99	99	88	91	37					93	94	95
		O ₃	77	86	67	87	91	92	98	85	99	99	94	99	43					93	96	95
		PM ₁₀							78	57	87	94	87	93	40					92	99	98
		PM _{2.5}																		93	99	98
	SC	CO																		96	49	76
		SO ₂		70	22	35	89	78	91	86	94	93	¹⁰⁰	94	74	72	25			99	49	76
		NO ₂	6	80	22	22	92	88	92	89	95	90	84	93	85	49				91	49	74
		O ₃								52	96	93	94	92	94	81	16			97	83	73
		PM ₁₀							51	36	92	87	72	92	85	82	96	96	37	94	49	77
		PM _{2.5}																		94	57	75

Fuente: Elaboración propia a partir de las bases de datos horarias del periodo 1994 a 2013.

Al concluir el cuadro se destacó la falta de datos en prácticamente todos los años a excepción del 2011 y 2013 y a pesar de q el año más reciente sería el ideal para analizar el estado actual de la contaminación del aire en la ZMVT; el 2011 cuenta con la mayor cantidad de datos lo que nos permite tener mayor exactitud en los resultados de las interpolaciones y es por esto que se trabajó con las bases de datos del 2011.

4.2 Evaluación del cumplimiento de la norma por contaminante

Para realizar este análisis se trabajaron las bases de datos diarias debido a que estas bases de datos ya están procesadas de acuerdo a la normatividad necesaria para cada contaminante.

Se evaluó el cumplimiento de las NOM de la salud (ver cuadro 4.3) en relación con el tiempo especificado para calcular el promedio de la concentración (1 hora, 8 horas y 24 horas) y la frecuencia tolerada de cada límite (por ejemplo, no se permite, una vez, o cuatro veces, o en el 2% de las mediciones). El cuadro 4.2 resume los indicadores con los que se evalúa el cumplimiento de las NOM de la salud con respecto a cada contaminante, y los criterios de suficiencia de información para calcular el indicador anual.

Si bien las únicas normas que especifican que el cumplimiento debe evaluarse por estación de monitoreo son las que corresponden al O_3 y las PM_{10} , para efectos de guardar la consistencia en todo el tratamiento de los datos, en los demás contaminantes se evaluó el cumplimiento de las normas también por estación de monitoreo.

Cuadro 4.2 Indicadores para evaluar el cumplimiento de las NOM con respecto a cada contaminante.

Contaminante	Tipo de dato utilizado	Indicador	Criterio de suficiencia anual
PM_{10} y $PM_{2.5}$	Dato diario (promedio de 24h)	Promedio anual	75% de las concentraciones
O_3	Dato horario	Máximo	75% de las concentraciones
CO	Promedio móvil de 8h	Segundo máximo	75% de las concentraciones
SO_2	Dato diario (promedio de 24 h)	Segundo máximo	75% de las concentraciones
NO_2	Dato horario	Segundo máximo	75% de las concentraciones

Fuente: INE (2011).

En este caso se utilizaron todos los datos validados disponibles de cada estación de monitoreo, y se obtuvo cada uno de los indicadores que establece la normatividad correspondiente a cada contaminante, para cada estación de

monitoreo, en todos los meses del año. Los resultados de este cálculo se muestran en gráficas de series de tiempo.

4.2.1 Evaluación del cumplimiento de los límites de la NOM por ciudad o zona metropolitana.

Debido a que en las NOM (ver cuadro 4.3) de la calidad del aire no se especifica cómo evaluar el cumplimiento de los límites especificados a escala metropolitana o ciudad, se siguieron los lineamientos y recomendaciones que utiliza la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) para evaluar el cumplimiento de sus normas de la calidad del aire en regiones o específicas (CFR, 2011; EPA, 1998). De acuerdo con esta autoridad, la evaluación del cumplimiento de las normas a escala metropolitana o de ciudad se lleva a cabo calculando un dato representativo, a partir de los datos calculados en cada estación de monitoreo. Se considera que el dato que representa las condiciones de la calidad del aire en esta escala es el valor más alto de los indicadores calculados para cada una de las estaciones de monitoreo. Esto es, si en una estación de monitoreo no se cumple con la norma, se considera que en la ciudad o ZM tampoco se cumple, y el valor representativo del incumplimiento corresponde a las peores condiciones registradas en la ciudad.

Cuadro 4.3 Normas de calidad del aire vigentes publicadas por la Secretaria de Salud en el Diario Oficial de la Federación.

Norma	Contaminante	Concentración y tiempo promedio de exposición	Para protección de la salud de la población susceptible
NOM-036-2012	Ozono	0.11 ppm 1 hora, una vez al año	0.080 ppm Promedio móvil de 8 h tomando como el quinto máximo en un periodo de 1 año
NOM-034-1993	Monóxido de carbono	11 ppm Promedio móvil de 8 h	1 vez al año
NOM-035-1993	Partículas suspendidas totales	210 µg/m ³ Percentil 98 promedios de 24h	75 µg/m ³ Media aritmética anual
NOM-035-1993	Partículas suspendidas de fracción respirable PM ₁₀	120 µg/m ³ Promedio de 24 h 1 vez al año	50 µg/m ³ Media aritmética anual
NOM-035-1993	Partículas suspendidas de fracción respirable PM _{2.5}	65 µg/m ³ Percentil 98 promedios de 24 h	15 µg/m ³ Media aritmética anual
NOM-038-1993	Bióxido de azufre	0.11 ppm Promedio de 24 h 1 vez al año	0.025 ppm Media aritmética anual
NOM-037-1993	Bióxido de nitrógeno	0.21 ppm Promedio de 1 hora	1 vez al año

Fuente: SEMARNAT & GEM (2011).

4.3 Representación espacial de las concentraciones de los contaminantes.

La representación espacial de las concentraciones de los contaminantes se muestra mediante mapas con una superficie continua de distintas tonalidades de un mismo color. Las tonalidades más intensas corresponden a las concentraciones más altas, y las de menor intensidad, a las más bajas. Estos mapas se generaron a partir de los promedios de las concentraciones diarias registradas durante el periodo de análisis en cada una de las estaciones que conforman las redes de monitoreo. Los promedios anuales de las concentraciones en cada estación de monitoreo se calcularon considerando un criterio de suficiencia anual de por lo menos el 75% de los datos diarios (en la estación Oxtotitlán no se alcanzó la suficiencia de datos en algunos contaminantes ya que se encuentra entre el 73% y 74% aun así se incluyen ya que es un valor muy cercano a lo esperado).

4.3.1 Estimación de concentraciones en ausencia de estaciones de monitoreo.

La interpolación es un procedimiento matemático de ajuste de una función a puntos no muestreados, basándose en valores obtenidos en puntos muestreados. En la práctica los procesos de interpolación parten de la definición de una malla, su separación y sus dimensiones. Esta malla es útil para estimar el valor de cada punto, con la selección de los puntos con valores conocidos próximos. Los valores de los puntos se restauran por filtrado y funciones matemáticas que pueden ser similares a los valores base (interpoladores exactos) o aproximar los valores de los puntos de partida. Diferentes métodos de interpolación espacial han sido utilizados con frecuencia para la estimación de diferentes variables (ver cuadro 4.4). Aun no existe en la literatura un método que tenga un mejor desempeño frente a los demás. Diferentes métodos ofrecen distintos desempeños, de acuerdo a las características iniciales, es así que se debe determinar el mejor método apropiado para cada situación espacial y/o temporal (UNESP, 2011).

Cuadro 4.4 Comparativo de diferentes métodos geoestadísticos para crear isolíneas.

Método Trend Surface	Método Moving average	Método Kriging
Global e inexacto	Método directo, local, a partir de puntos	La función de interpolación depende de la autocorrelación espacial de la variable
Se utiliza para separar y describir determinados componentes de variación presentes en los datos	Puede ser exacto o no según el factor de ponderación.	Utiliza datos tabulares y su posición geográfica para el cálculo de las interpolaciones
Facilita su interpretación	Se aplica para un gran conjunto de datos	Está basado en optimizar funciones usando autocorrelación espacial
Suma un componente regional o tendencia con un componente local	Extrae tendencias intermedias de un número mínimo de puntos definidos, asociando a cada uno de los puntos del grid.	Utiliza el principio de la primera ley geográfica de Tobler, que dice que las unidades de análisis más próximas entre si son más similares que las unidades más lejanas
Autocorrelación de la variable	Si dentro de la elipse no hay un número mínimo de puntos definidos para el cálculo, el área estará en blanco	Utiliza funciones matemáticas para añadir más peso en las posiciones más cercanas a los puntos de muestreo y menores pesos en posiciones más distantes
Proporciona una descripción sintética de la superficie ondulada	El valor final de cada uno de los puntos del grid es igual a la media aritmética de todos los puntos vecinos identificados.	Crea nuevos puntos interpolados basados en estas combinaciones lineales de datos
Autor: Racca, 1982	Autor: Moreno, 2007	Autor: Ayuga, 2008

Fuente: Elaboración propia en base al "Análisis comparativo de métodos de interpolación espacial" de la UNESP, (2011).

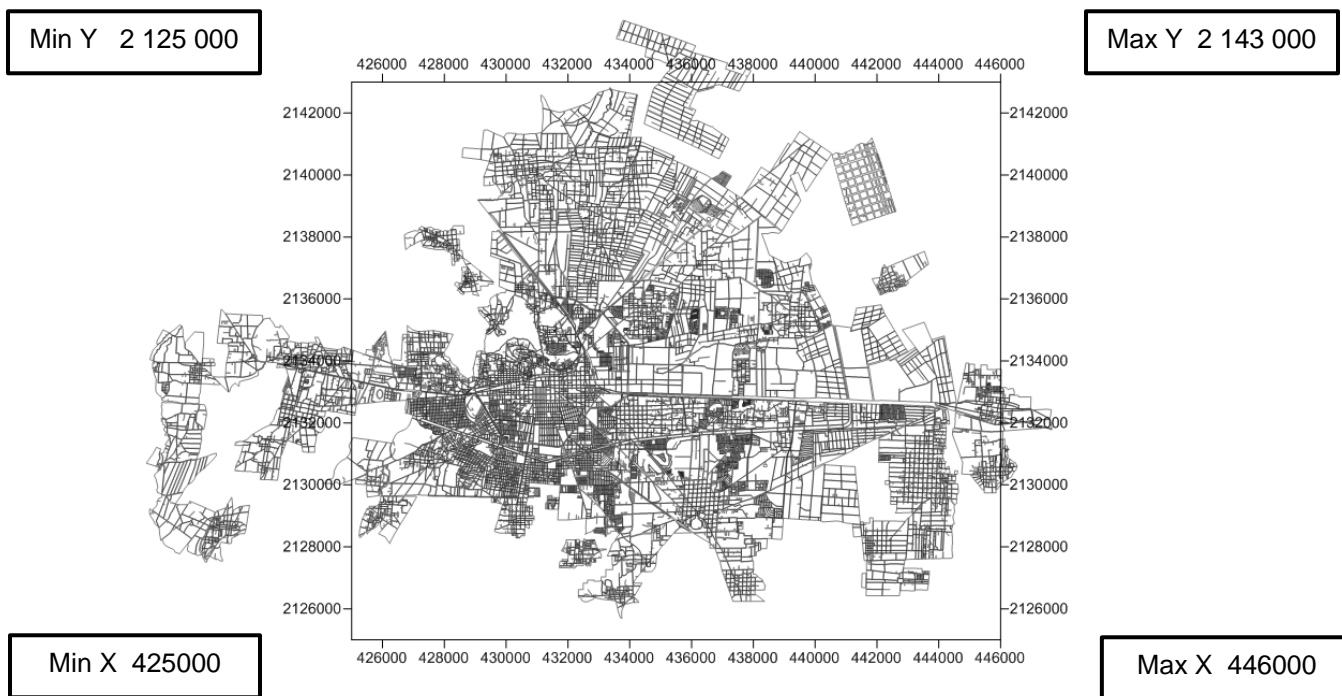
Tomando en cuenta las características de cada método se decide trabajar con el programa Surfer 10 y el método geoestadístico de interpolación kriging, ya que es un método de estimación de puntos que utiliza una tabla básica para la obtención de datos y parte del principio: puntos próximos en el espacio tienden a tener valores más parecidos que los puntos más distantes, además de que la técnica de kriging asume que los datos recogidos de una determinada población se encuentran correlacionados en el espacio.

Surfer es un paquete de modelado, se utiliza ampliamente para el modelado del terreno, modelado batimétrico, la visualización del paisaje, análisis de superficies, cartografía para el contorno, las cuencas hidrográficas y la cartografía de superficie 3D, grillado, volumetría, y mucho más. Cuenta con un motor de interpolación sofisticada que transforma sus datos XYZ en mapas con calidad de publicación. Surfer ofrece más métodos de grillado y más control sobre los parámetros de grillado, además de añadir mapas de base y combinar tipos de mapas para crear la pantalla más informativo posible. Prácticamente todos los aspectos de sus mapas se pueden personalizar para producir exactamente la presentación que desea (Manual del usuario, 2014).

4.4 Polígono del área de estudio

Comúnmente, el área de interpolación para presentar las concentraciones de contaminantes del aire se define a través de un polígono que tiene como vértices las estaciones externas de las redes de monitoreo. Sin embargo, las estaciones de monitoreo tienen una representatividad espacial que va más allá de su ubicación puntual en el caso de la ZMVT es de hasta 6 km de acuerdo con el coordinador de operación de la RAMA, ante esta situación se realizó un buffer a 6 km a la redonda de cada estación y manualmente se ubicaron los puntos límites del polígono con el que se diseñaron todas las interpolaciones (dentro de los límites de los 6 km de las estaciones), y son los siguientes (ver figura 4.2):

Figura 4.2 Polígono con base a las coordenadas UTM y mapa base



4.5 Tablas básicas en Excel para la generación del grid

Cuadro 4.5 Ejemplo de tabla básica utilizada para el monóxido de carbono en el mes de enero

Clave	X	Y	Promedio
OX	428184.10	2132331.55	2.23
CE	431025.76	2131729.98	1.96
MT	437455.45	2130830.86	2.26
CB	432079.34	2129762.56	2.09
SM	443079.34	2131944.94	2.43
AP	439998	2137628	2.35
SC	433375.83	2137154.54	2.17

Nota: si algún valor es 0 se omite de la tabla ya que la interpolación se encarga de darle el valor que correspondería.

Fuente: Elaboración propia

Estas tablas están construidas con la clave de la estación (OX, CE, MT, CB, SM, AP Y SC), las coordenadas UTM X y Y de cada estación y el dato a interpolar calculado por los promedios mensuales de cada contaminante obtenidos de las Bases de Datos Diarios de la RAMA de la ZMVT. Se muestra como ejemplo el mes de enero del CO.

4.6 Proceso metodológico para la interpolación de los contaminantes

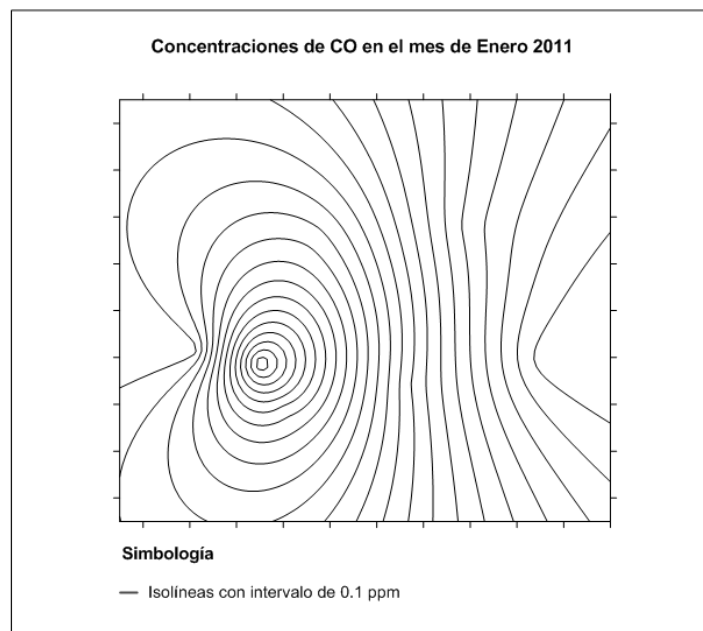
La geoestadística de modo general desarrolla y aplica modelos en representaciones de fenómenos naturales cuyas propiedades varían conforme a la posición espacial de los puntos observados, ya que la red de monitoreo consta de 7 puntos de muestreo y este método nos permite obtener valores en toda el área de influencia de las estaciones y no solo es los puntos de las mismas. Actualmente se utilizan diferentes métodos para analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en espacio o tiempo, tales valores no se consideran independientes por el contrario están correlacionados unos con otros (dependencia espacial) (Moreno, 2007). Bajo esta premisa se analizaron los datos obtenidos de la RAMA de la ZMVT y se generaron las interpolaciones correspondientes a cada contaminante por mes utilizando la siguiente metodología.

4.6.1 Creación del GRID

A partir de estas tablas se crearon los GRID, que es la base de la interpolación, para obtenerlo se importan las tablas de Excel, se selecciona el método kriging para analizar los datos y se modifican los valores de los límites del polígono ya mencionados y se guarda en un directorio.

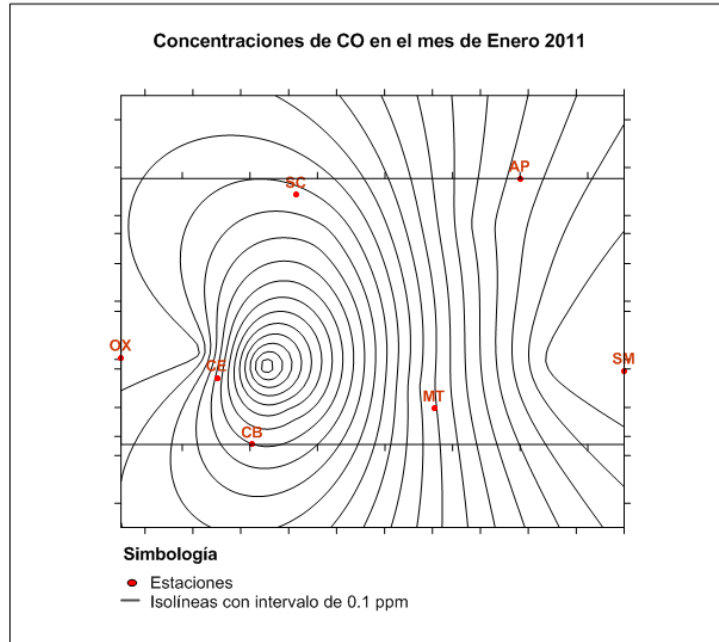
4.6.2 Interpolaciones

El grid elaborado se abre con la opción de Contour Map que genera las isolíneas.



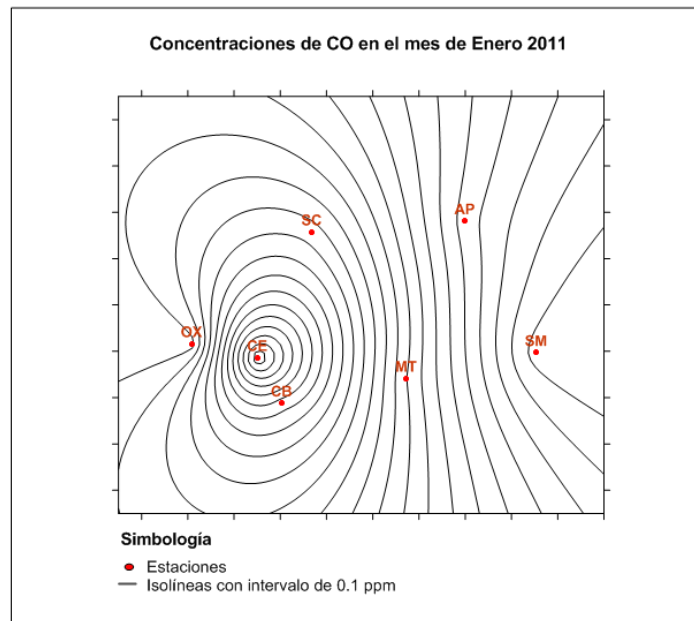
4.6.3 Puntos de estaciones

Se insertan con la misma tabla base con la opción Post Map y se cambian las características para dar la presentación deseada al mapa.



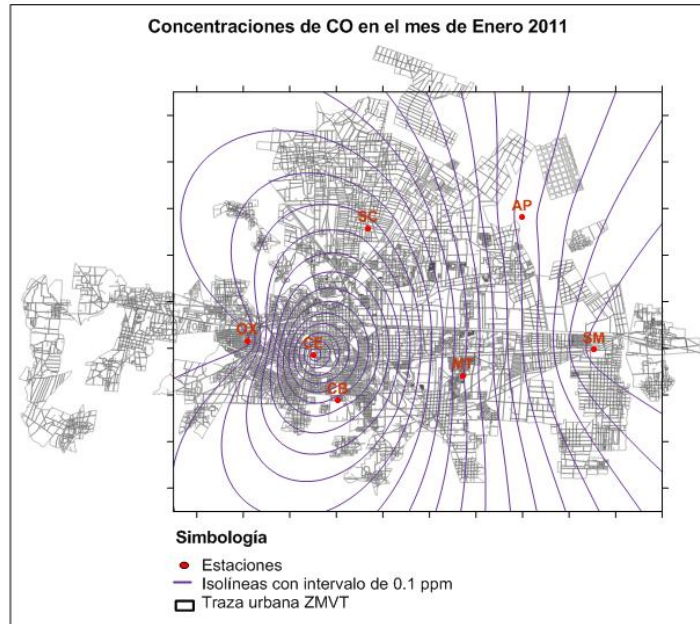
4.6.4 Overlay maps

Se unen ambos mapas para crear uno solo con los puntos e isólinas.



4.6.5 Ingresar mapa base

El mapa base que se selecciono fue el de manzanas de la zona urbana que nos permite la ubicación física de los puntos de las estaciones y de los valores de las isolíneas sin saturar el mapa.



4.6.6 Modificar las propiedades del mapa

Lo primero fue elegir el tamaño del intervalo de las isolíneas para que la imagen de los mapas no se vea saturada y a la vez sea suficiente para la representación de los valores ya que en algunos casos como las partículas los valores se encuentran muy sesgados y tomando en cuenta el valor menor y el valor mayor de cada contaminante se les dio el siguiente valor:

CO	0.1
NO ₂	0.003
O ₃	0.003
PM _{2.5}	4
PM ₁₀	8
SO ₂	0.0015

Se seleccionó la gama de colores BLUES 1 ya q es el único con la misma gama de tonos de un color que además corresponde adecuadamente a la representación del aire. Los colores más fuertes corresponden a los valores más altos de contaminación y opuestamente los colores más claros a los niveles más bajos de contaminación utilizando una opacidad de 85% que nos permita ver el mapa base de ubicación.

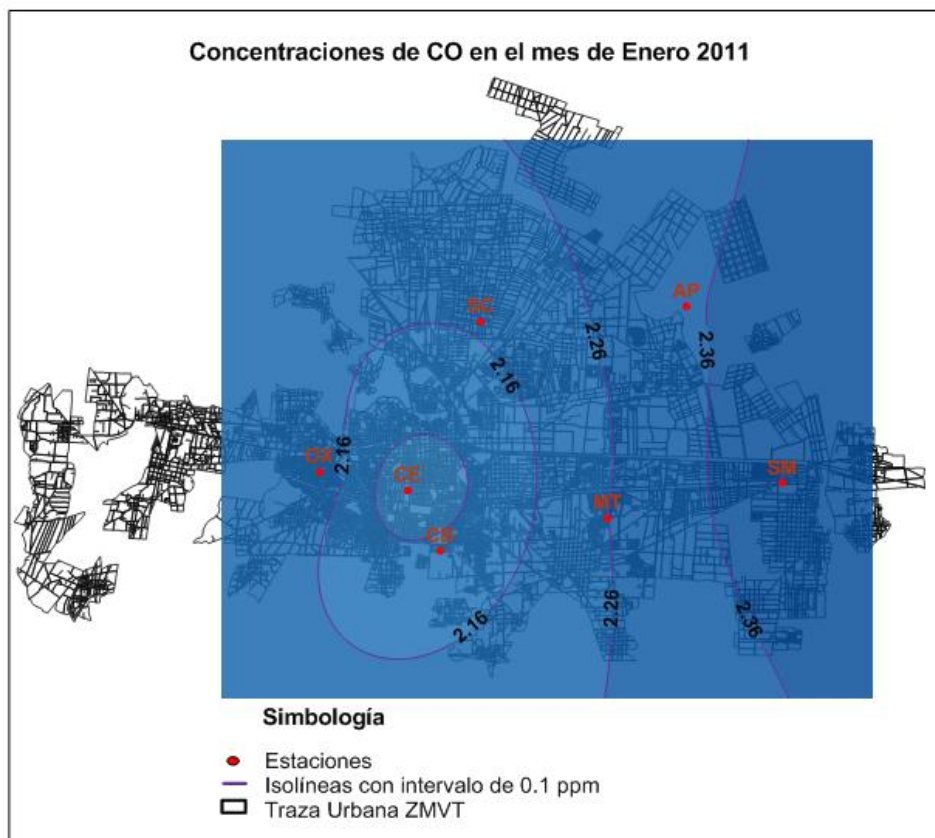
Para cada contaminante se manejó una escala diferente en la gama de colores (propiedad que nos permite modificar el programa surfer). Esto se realizó para poder hacer una comparación visual rápida del nivel de contaminación en cada contaminante. Y su muestra a continuación:

Contaminante	Mínimo	Máximo
CO	0.70	2.6
NO2	0.029	0.073
O3	0.040	0.091
PM 2.5	16	85
PM 10	28	221
S02	0.003	0.019

En todos los casos se muestran los valores de las isóneas para que se muestren los valores calculados por la herramienta kriging para ver los valores correspondientes en las zonas donde no hay estación de monitoreo.

Cada mapa cuenta con simbología que fue insertada directamente en surfer.

Figura 4.3 Ejemplo de distribución espacial de las concentraciones de CO en el mes de Enero 2011.



Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5

Análisis de resultados

5.1 Distribución y comportamiento de los contaminantes criterio en la ZMVT en el año 2011.

En el cuadro 5.1 se puede observar de manera sintetizada el comportamiento de cada contaminante, se destaca que los meses de invierno son los predominantes en las mayores concentraciones; al mismo tiempo son los meses en los que se rebasa la norma en cuestión de partículas tanto de PM_{10} como de $PM_{2.5}$. En el caso del ozono es en verano cuando las concentraciones aumentan y se incumple con la norma (ver cuadro 5.2 y 5.3).

Se puede observar claramente que estos patrones ya no son tan estrictos ya que las concentraciones han aumentado en otros meses que solían ser atípicos. Esto aplica para todos los contaminantes aunque el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre cumplen con los límites de la norma y están por debajo de ella (ver cuadro 5.3).

La estación de San Cristóbal es la que presenta los valores más altos en casi todos los casos, esto se debe a la ubicación de esta estación y la dinámica de los vientos que hace que grandes cantidades de contaminantes se dirijan al norte; también se relaciona con su cercanía a la zona industrial y principales vías de comunicación.

Conocer la distribución de los contaminantes no es suficiente para emitir una conclusión se deben tomar en cuenta el comportamiento durante el año, semana y día, al igual que el cumplimiento de la norma para dar información a la población que realmente genere un cambio social enfocado a la mejora de la calidad del aire que respiramos.

Cuadro 5.1 Comportamiento de los contaminantes durante el 2011

CONTAMINANTE POR ESTACION		PRIMAVERA			VERANO			OTOÑO			INVIERNO		
		MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
CO	OX			-	-	-					DSM	+	+
	CE			DSM	-	-	-					+	+
	MT	-			-	-	-					+	+
	CB				-	-	-		DSM			+	+
	SM	-	-	-	-	-			DSM			+	+
	AP		-		-		DSM		+	+		+	+
	SC		-	-	-	-	-					+	+
NO ₂	OX	+		-	-		-			DSM	DSM	+	+
	CE			DSM	DSM	-	-					+	+
	MT				-	-	-		-			+	
	CB				-	-	-		DSM				+
	SM	-	-	-	-	-	-		DSM			+	
	AP				-	-	DSM					+	+
	SC		DSM	-	-	-	-		-	-		+	+
O ₃	OX	-		+	+					DSM	DSM		-
	CE	+	+	DSM	-	-							
	MT		+	+		-							
	CB	+	+	+								-	-
	SM		+	+								-	-
	AP		+	+								-	-
	SC		+	+								-	-
PM _{2.5}	OX		+	+			-			DSM	DSM		
	CE		+	+		DSM	DSM	DSM	-	DSM	DSM	-	
	MT			+		-	-					+	
	CB		+	+		-	-		-			+	
	SM				-	-	-		DSM			+	
	AP				-	-	DSM			+		+	
	SC				-	-	-					+	
PM ₁₀	OX	+			-	-	-	DSM	DSM	DSM	DSM	+	+
	CE	+		DSM	-	-	-					+	+
	MT	+	+	+	-	-	-					+	+
	CB	+			-	-	-	-				+	+
	SM	+	+		-	-	-	-	DSM			+	+
	AP	+	DSM			-	DSM					+	+
	SC	+	+	+	-	-	-			+	+	+	+
SO ₂	OX				-	-	-	-				+	+
	CE				-	-	-			+	+	+	+
	MT				-	-	-	-		+	+	+	
	CB				-		-	-		+	+	+	+
	SM				-	-	-	-			+	+	+
	AP				-	-		-			+	+	+
	SC				-	-	-	-		+	+	+	+

Fuente: Elaboración propia con base en observaciones de las bases de datos diarias de cada contaminante

-	Menores concentraciones
+	Mayores concentraciones
DSM	Meses con más de 15 días sin medición
	Celdas con valores estándares

En el cuadro 5.2 se muestran los resultados de análisis del cumplimiento de la norma por estación de monitoreo, como se explicó en la metodología, se calculó el promedio anual, máximo o segundo máximo según corresponda especificándose en cada contaminante y comparándolo con el límite de la norma y resaltando en tono rojo los que están por encima de la norma.

Cuadro 5.2 Cumplimiento de norma por estación en el año 2011

PM₁₀

Estaciones	OX	CE	MT	CB	SM	AP	SC
NORMA	120µg/m ³	120µg/m ³	120µg/m ³	120µg/m ³	120µg/m ³	120µg/m ³	120µg/m ³
PROMEDIO ANUAL	69 µg/m ³	60 µg/m ³	71 µg/m ³	69 µg/m ³	79 µg/m ³	85 µg/m ³	123µg/m ³

PM_{2.5}

Estaciones	OX	CE	MT	CB	SM	AP	SC
NORMA	65 µg/m ³	65 µg/m ³	65 µg/m ³	65 µg/m ³	65 µg/m ³	65 µg/m ³	65 µg/m ³
PROMEDIO ANUAL	25 µg/m ³	25 µg/m ³	30 µg/m ³	25 µg/m ³	34 µg/m ³	40 µg/m ³	44 µg/m ³

O₃

Estaciones	OX	CE	MT	CB	SM	AP	SC
NORMA	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm
MÁXIMO	0.094ppm	0.114ppm	0.121ppm	0.114ppm	0.106ppm	0.102ppm	0.128ppm

CO

Estaciones	OX	CE	MT	CB	SM	AP	SC
NORMA	11 ppm	11 ppm	11 ppm	11 ppm	11 ppm	11 ppm	11 ppm
SEGUNDO MÁXIMO	7.5ppm	6.02ppm	6.5ppm	6.5ppm	4.7ppm	7.3ppm	8.3ppm

SO₂

Estaciones	OX	CE	MT	CB	SM	AP	SC
NORMA	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm	0.11 ppm
SEGUNDO MÁXIMO	0.020ppm	0.013ppm	0.015ppm	0.018ppm	0.019ppm	0.031ppm	0.018ppm

NO₂

Estaciones	OX	CE	MT	CB	SM	AP	SC
NORMA	0.21ppm	0.21ppm	0.21ppm	0.21ppm	0.21ppm	0.21ppm	0.21ppm
SEGUNDO MÁXIMO	0.112ppm	0.132ppm	0.087ppm	0.114ppm	0.074ppm	0.105ppm	0.103ppm

En el cuadro 5.3 se integran los datos del cuadro 5.2 realizando un análisis general de la ZMVT, recordando que las normas indican que si una estación presenta valores fuera del límite permitido toda la zona metropolitana incumple.

Cuadro 5.3 Cumplimiento de la norma de la ZMVT en el año 2011

CONTAMINANTE	ESTACIÓN	VALOR MÁXIMO REPRESENTATIVO	INDICADOR	CUMPLIMIENTO O NO DE LA NORMA
PM ₁₀	SC	123µg/m ³	Promedio anual	No se cumple con la norma de 120µg/m ³ Promedio de 24 h una vez al año
PM _{2.5}	SC	44 µg/m ³	Promedio anual	Se cumple con la norma de 65µg/m ³ Promedio de 24h una vez al año
O ₃	SC	0.128ppm	Máximo	No se cumple con la norma de 0.11 ppm Promedio de 24 h una vez al año
CO	SC	8.3ppm	Segundo máximo	Se cumple con la norma de 11 ppm promedio móvil de 8 h una vez al año
SO ₂	AP	0.031ppm	Segundo máximo	Se cumple con la norma de 0.11 ppm Promedio de 24 h una vez al año
NO ₂	CE	0.132ppm	Segundo máximo	Se cumple con la norma de 0.21 ppm Promedio de 1 hora una vez al año

Fuente: Elaboración propia

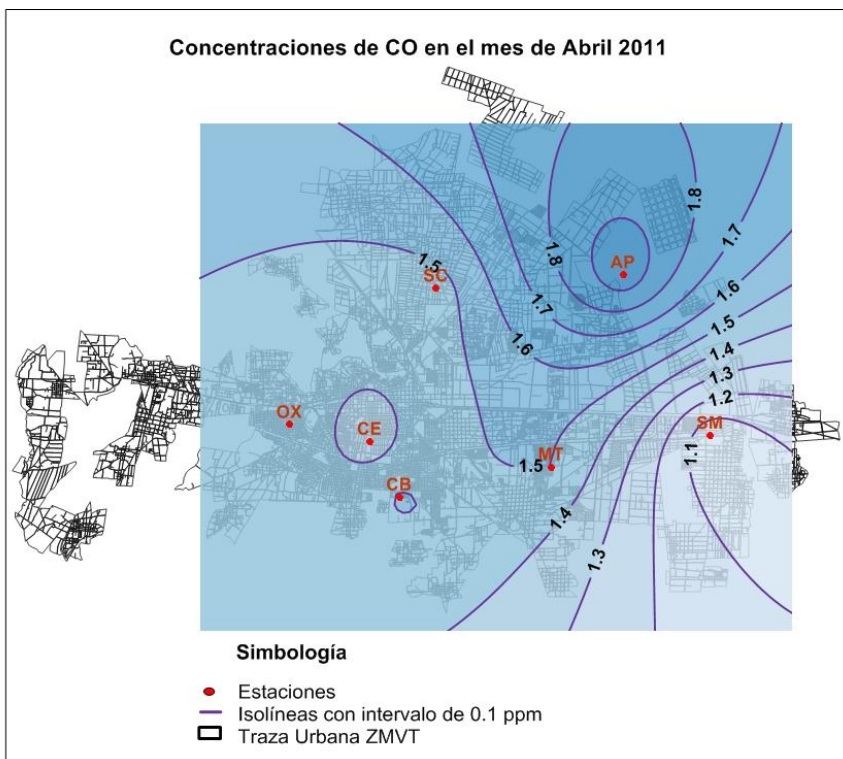
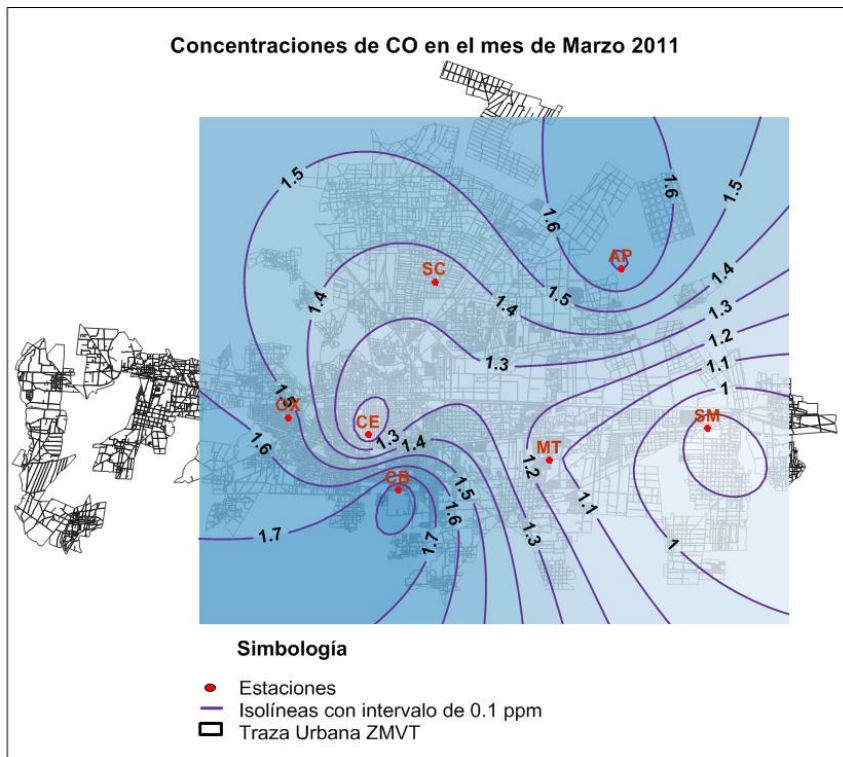
5.2 Distribución de los CO en la ZMVT en el año 2011

Las concentraciones de CO en la atmósfera de las zonas urbanas presenta variaciones horarias y mensuales que se relacionan en gran medida con los patrones de tránsito vehicular; así, en la mañana y por la tarde se presentan los niveles más altos (sin rebasar la norma), coincidiendo con los horarios de mayor tráfico y en días hábiles. Por la mañana entre las 6:00 y las 11:00 horas, y por la tarde noche entre las 18:00 y las 23:00 horas.

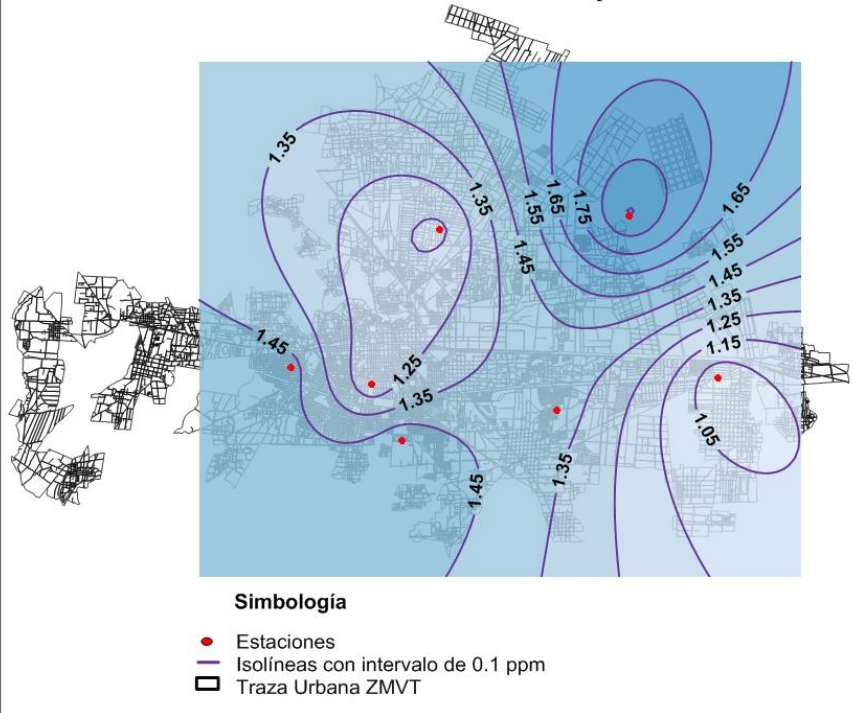
El comportamiento de CO en la atmósfera también presenta variaciones estacionales que dependen de las condiciones meteorológicas y de la actividad vehicular. Las concentraciones más elevadas se registran en los meses más fríos (noviembre, diciembre, enero y febrero), lo que podría relacionarse con las inversiones térmicas. Por otra parte las concentraciones más bajas se registran entre mayo y septiembre, lo que se pudiera asociar parcialmente con la temporada de vacaciones escolares de verano, y con temperaturas más elevadas, lo que lleva a una mayor mezcla vertical de contaminantes.

En la ZMVT las concentraciones más elevadas se generan alrededor de las estaciones de Ceboruco y Aeropuerto en la mayoría de los meses, en las cuales se encuentran ubicadas grandes zonas urbanas con tráfico vehicular intenso, especialmente de carga y transporte público. Se observa también como en el mes de diciembre y enero e incluso en febrero todas las estaciones presentan altos valores de CO.

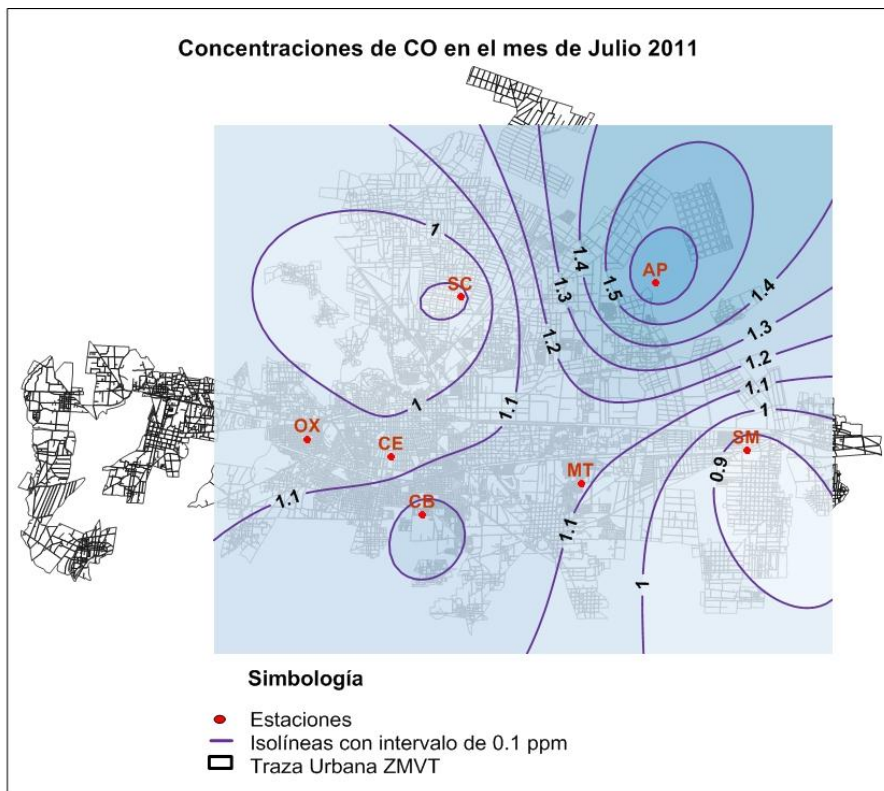
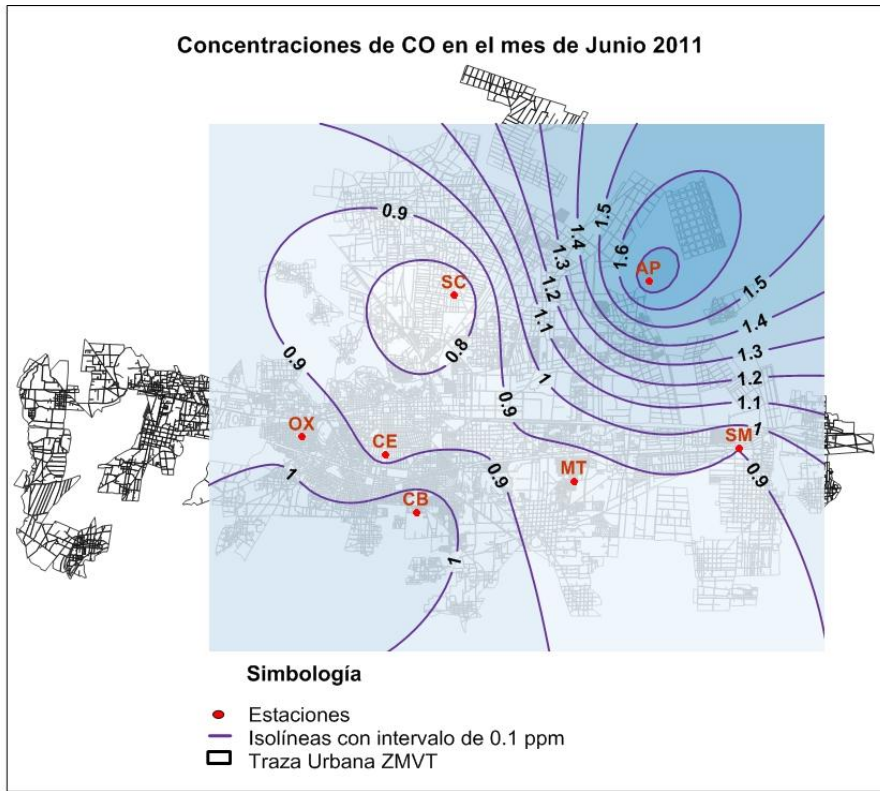
a. Primavera



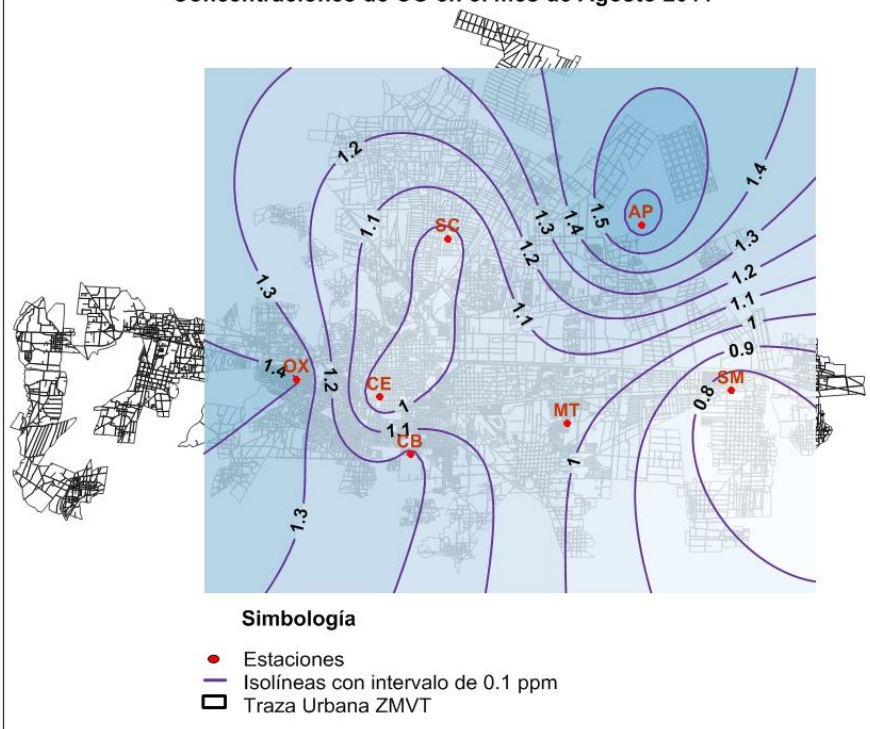
Concentraciones de CO en el mes de Mayo 2011



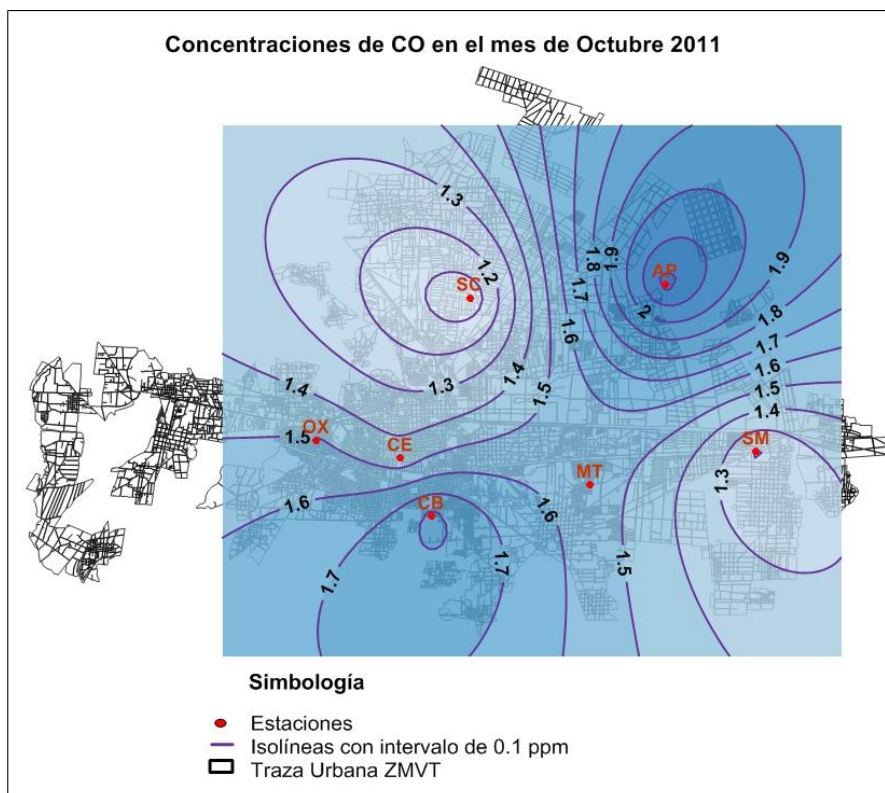
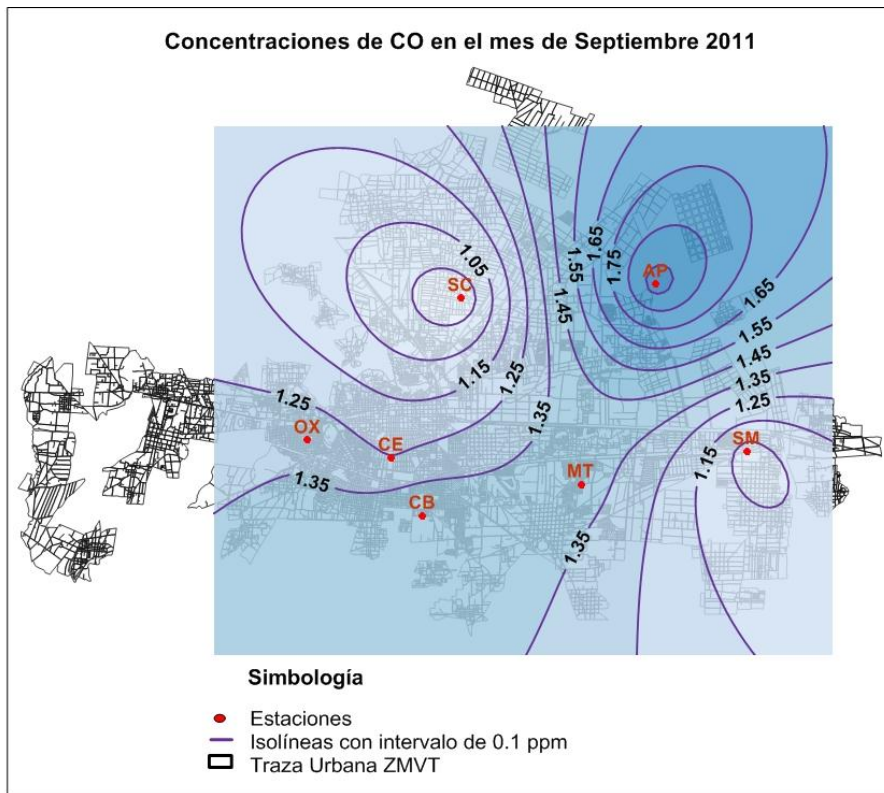
b. Verano



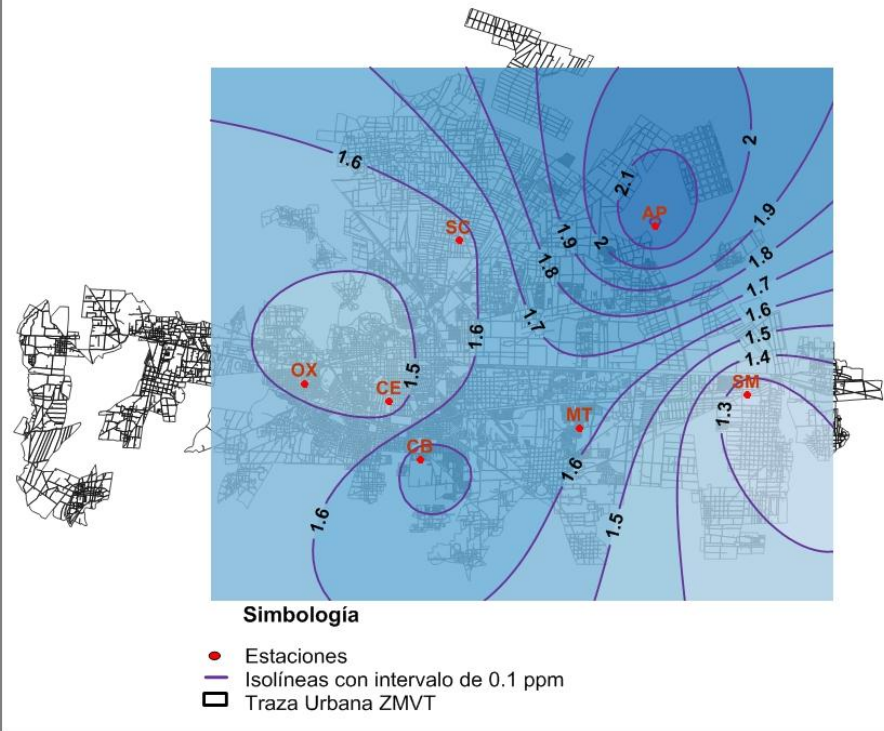
Concentraciones de CO en el mes de Agosto 2011



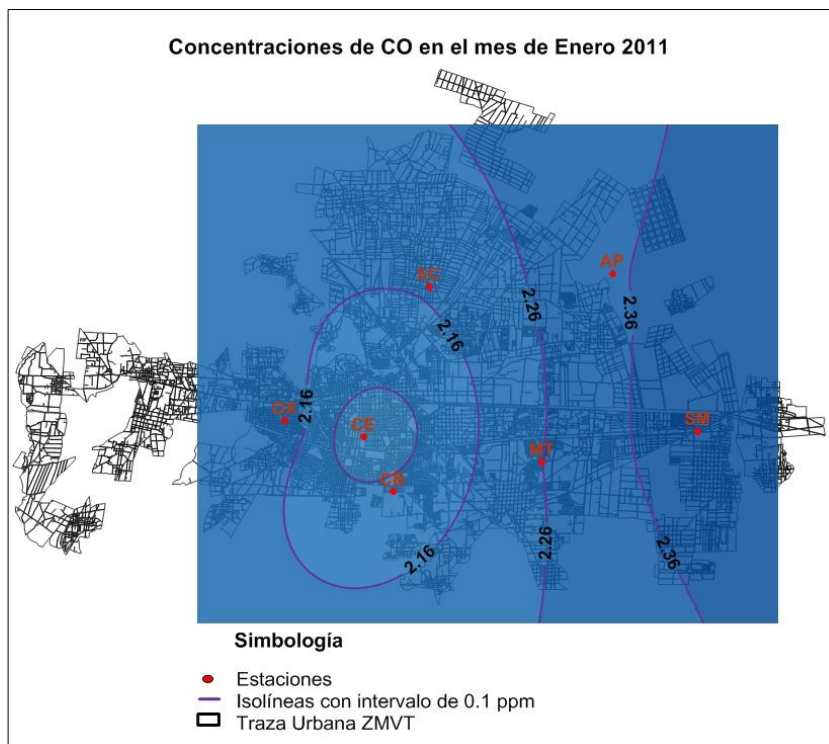
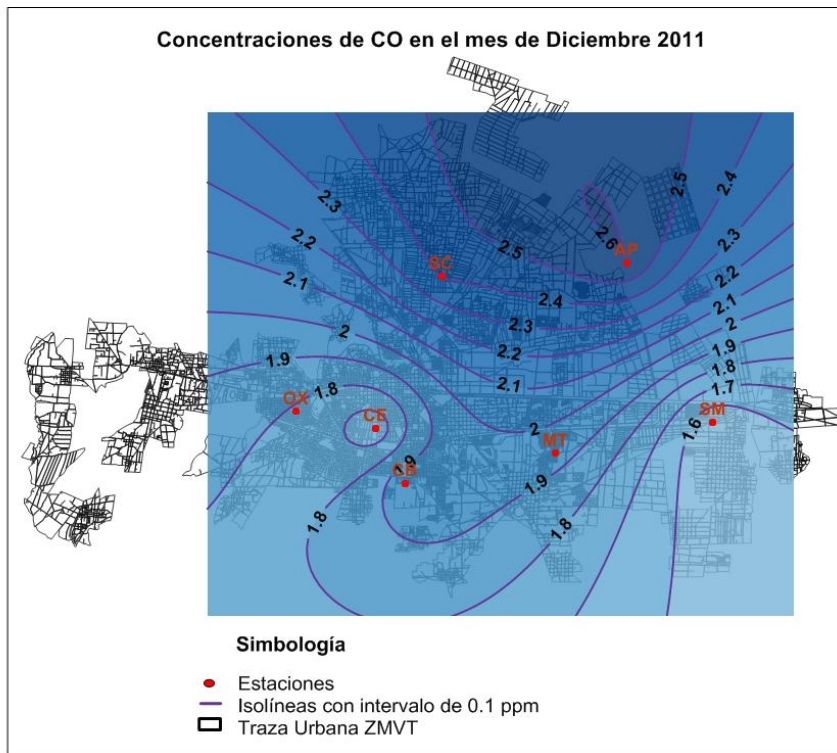
c. Otoño



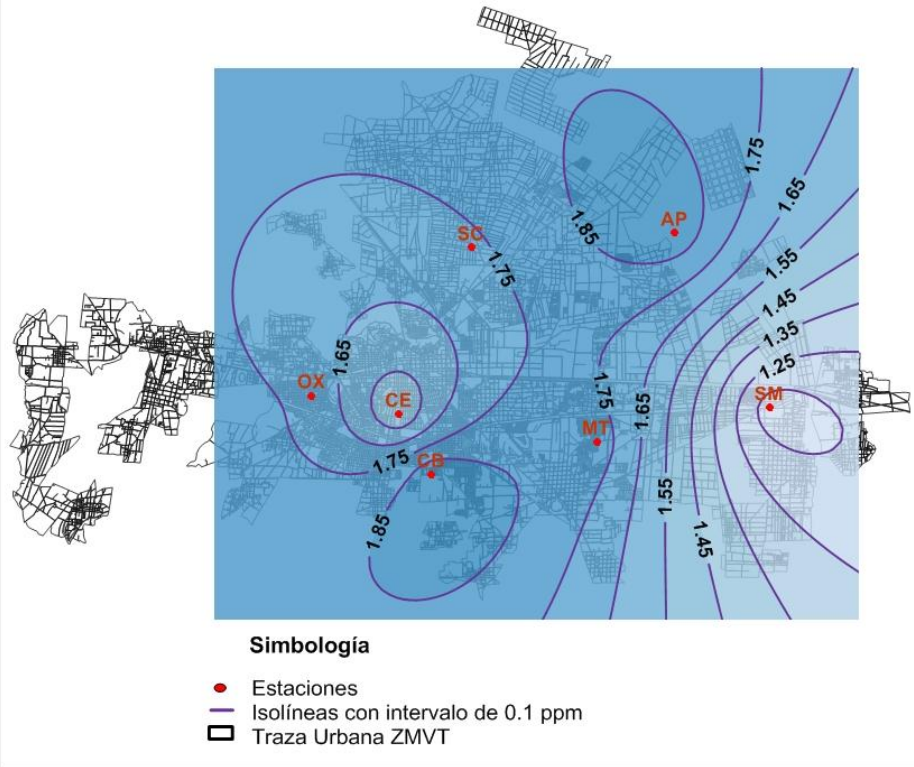
Concentraciones de CO en el mes de Noviembre 2011



d. Invierno



Concentraciones de CO en el mes de Febrero 2011



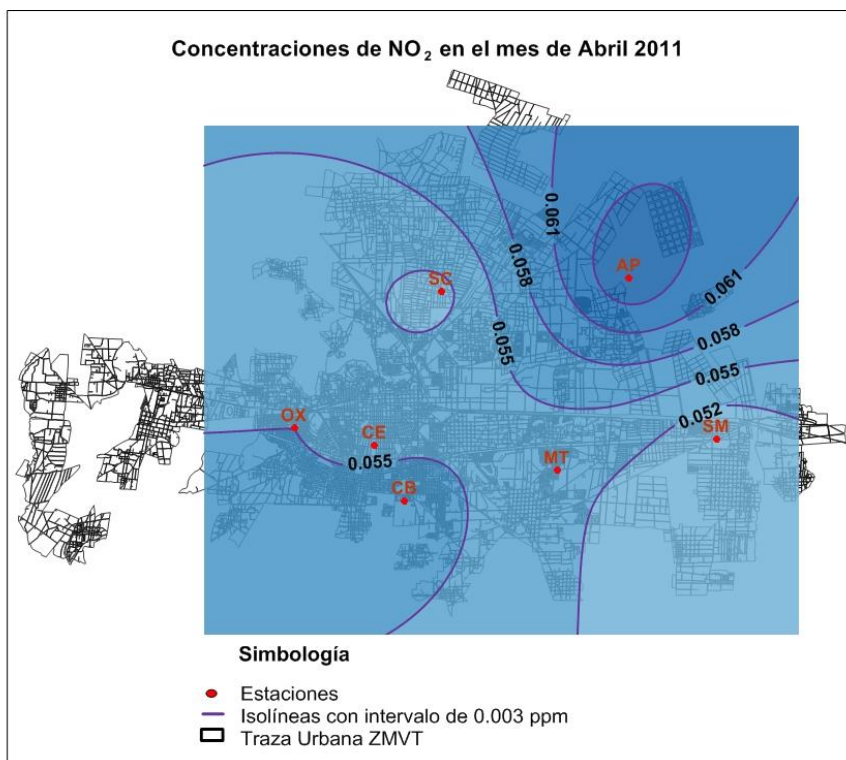
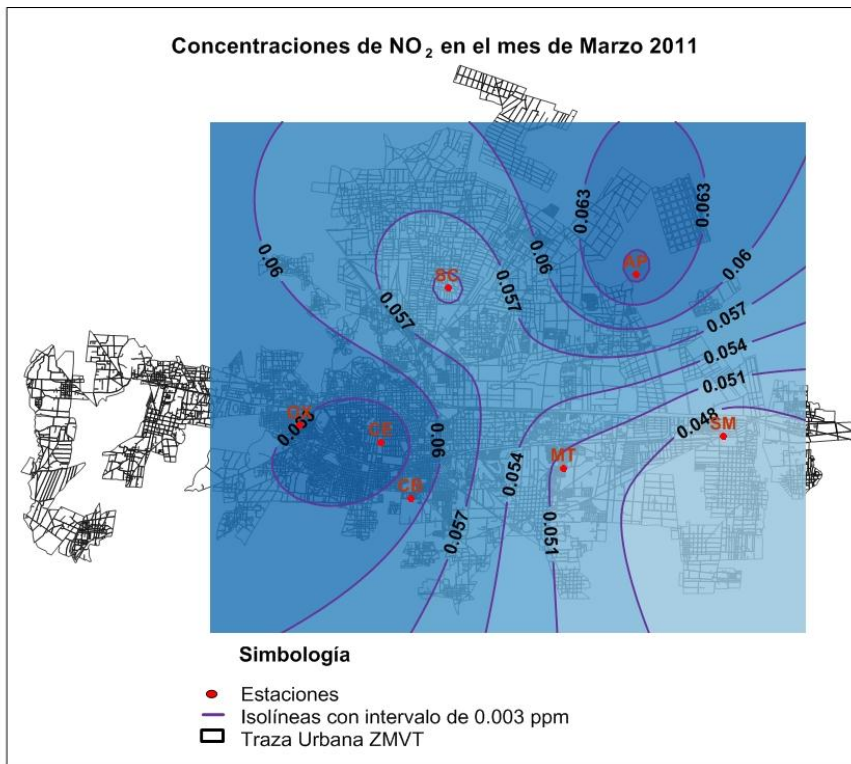
5.3 Distribución de NO₂ en la ZMVT en el año 2011

En general, las concentraciones de los NO_x son atribuibles a la actividad vehicular y, en menor medida, a la industria, por lo que su comportamiento horario refleja ambos patrones de actividad. El NO aparece cuando empieza el tránsito vehicular, y al comenzar la radiación solar se oxida, produciendo NO₂. Las concentraciones de NO₂ aumentan para alcanzar su valor máximo cuando se establece un equilibrio entre su velocidad de formación y su velocidad de eliminación, con la formación de ácido nítrico, nitratos orgánicos y O₃. Aproximadamente al mismo tiempo que el NO₂ alcanza su concentración máxima, comienza a formarse el O₃; que cuando éste, a su vez, alcanza su concentración máxima, permite la reconstitución del NO₂.

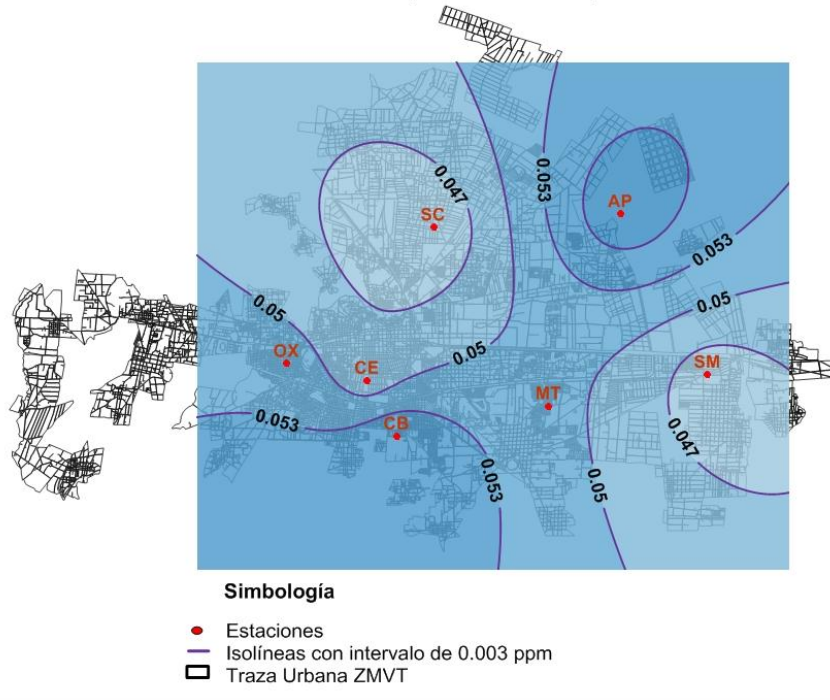
El comportamiento del contaminante es bimodal; las concentraciones más altas se aprecian por la mañana y por la noche en las horas de más tráfico vehicular. Con respecto al comportamiento anual, las concentraciones más altas ocurren en los meses fríos (noviembre, diciembre y enero). Este patrón pudiera ser resultado de las actividades propias de fin de año, que se traducen en un uso más intenso de los vehículos.

Las mayores concentraciones de NO₂ se presentan en la estación Aeropuerto, aunque Oxtotitlán también destaca concentraciones mayores que las demás estaciones. Ambas estaciones ubicadas cerca de vialidades de flujo vehicular que va de moderado a intenso.

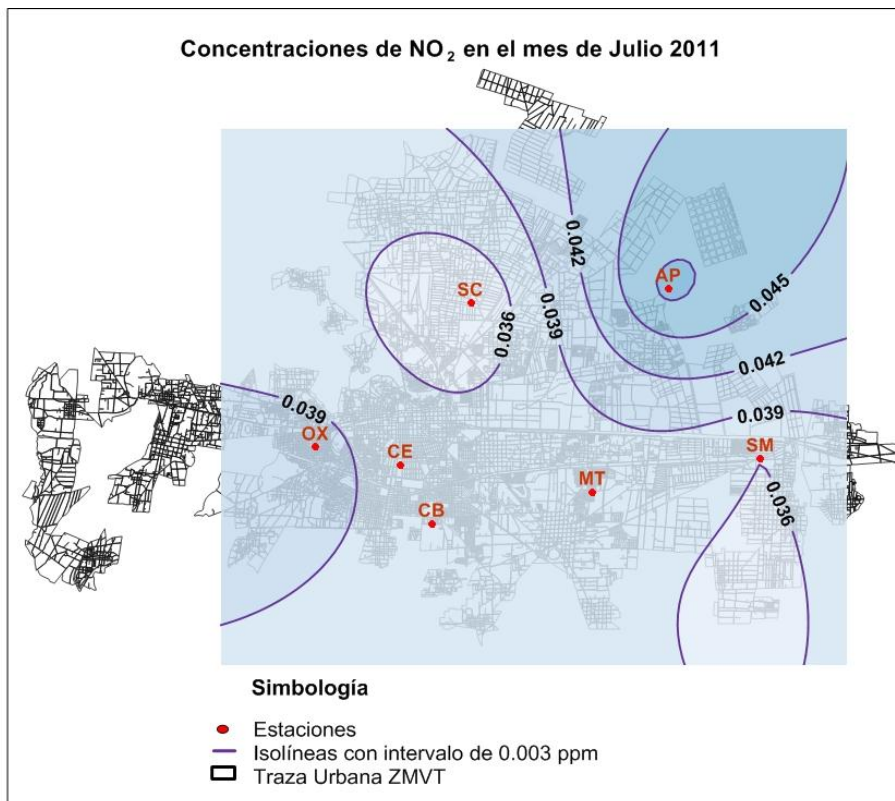
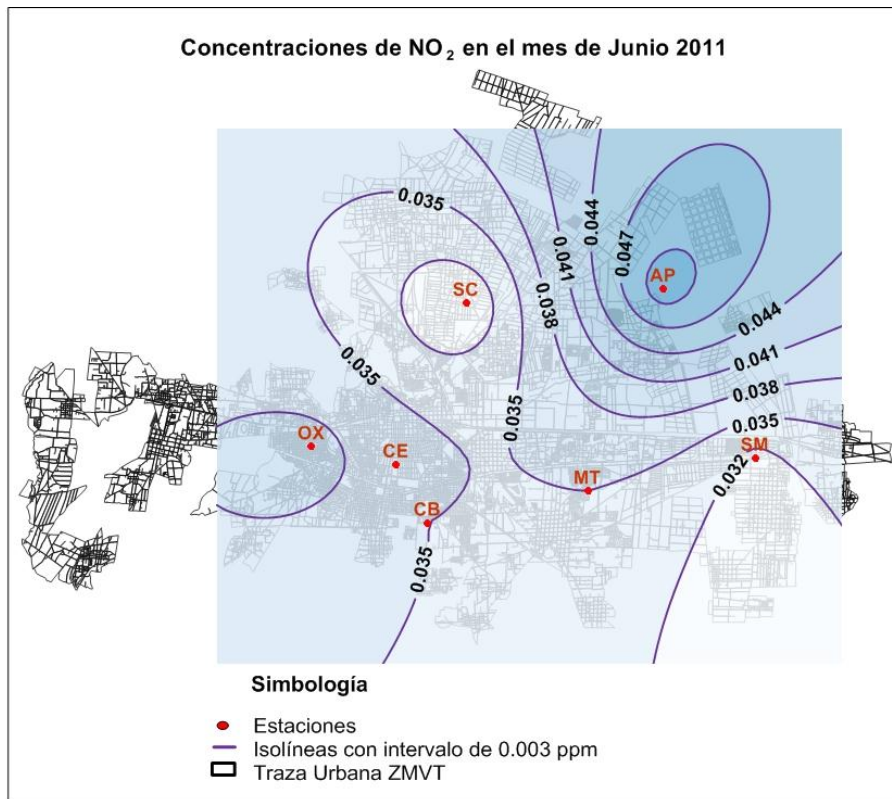
a. Primavera



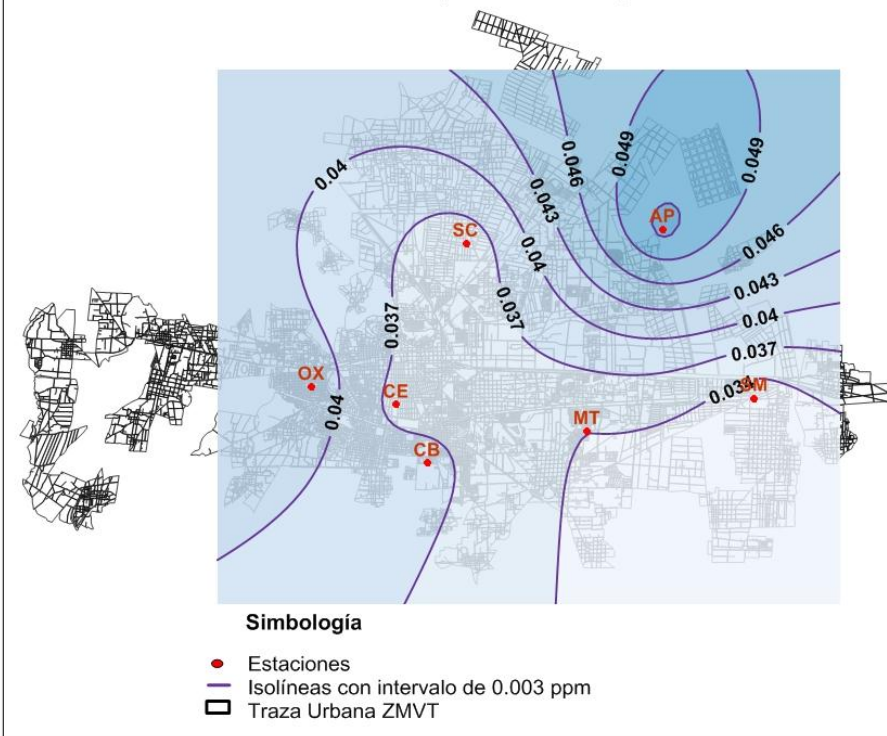
Concentraciones de NO₂ en el mes de Mayo 2011



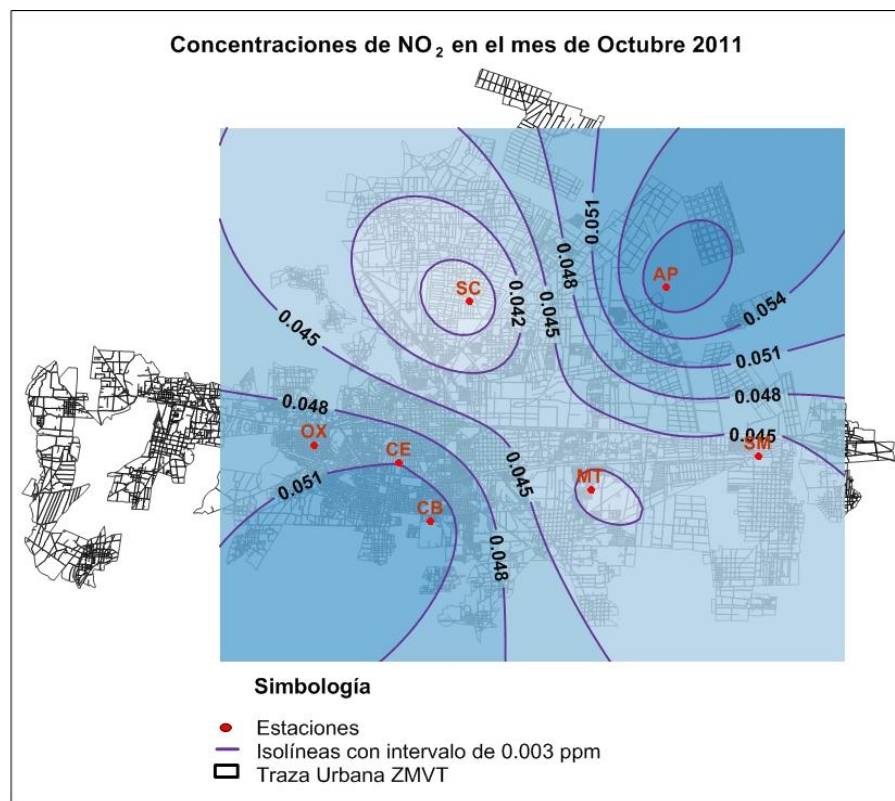
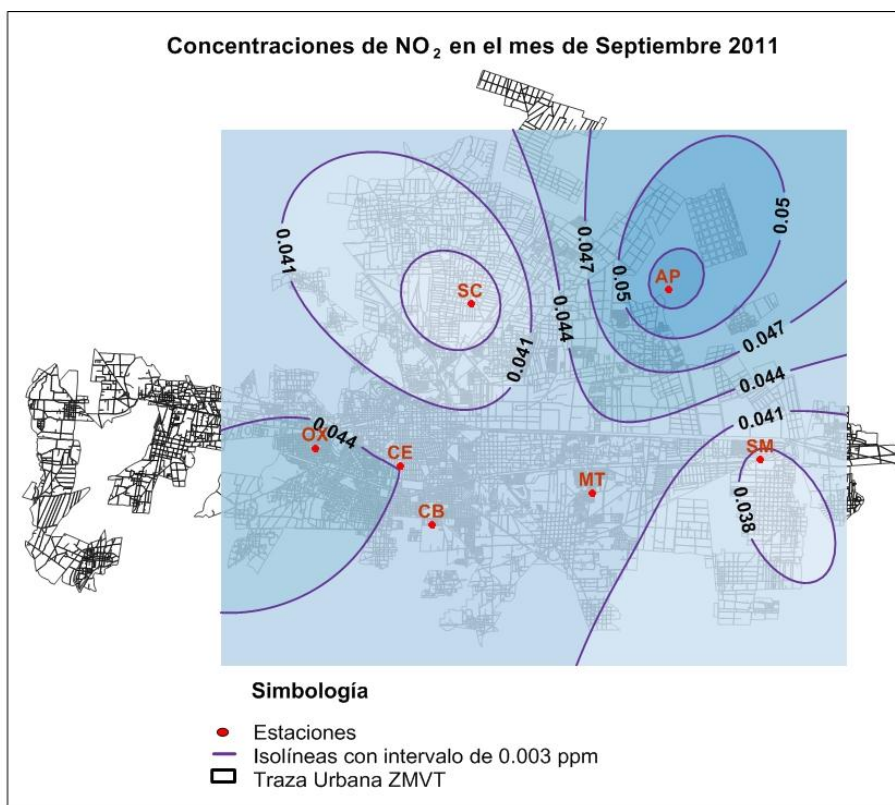
b. Verano



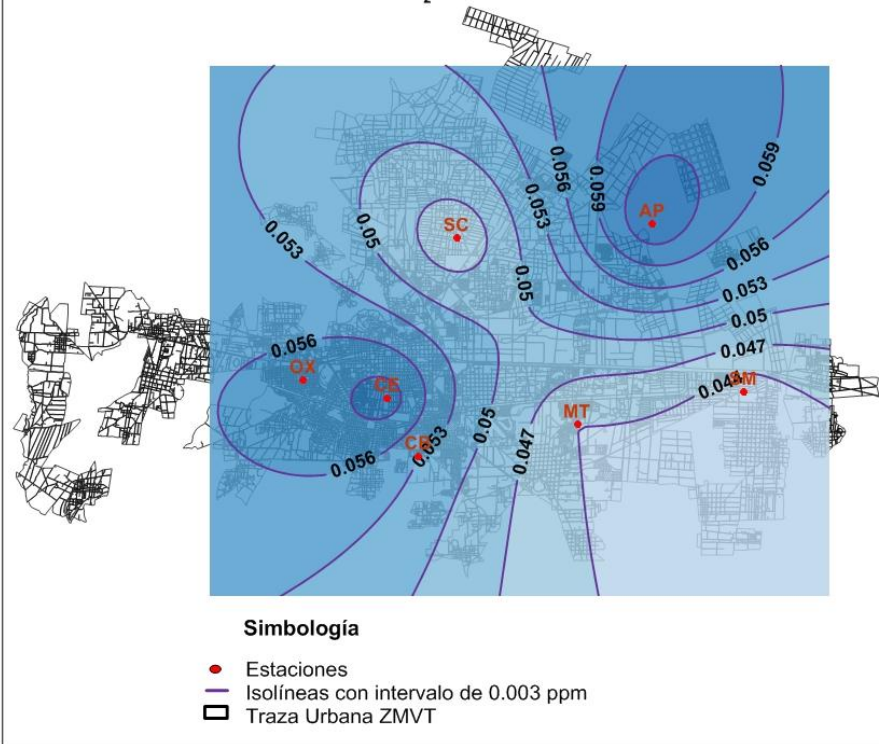
Concentraciones de NO₂ en el mes de Agosto 2011



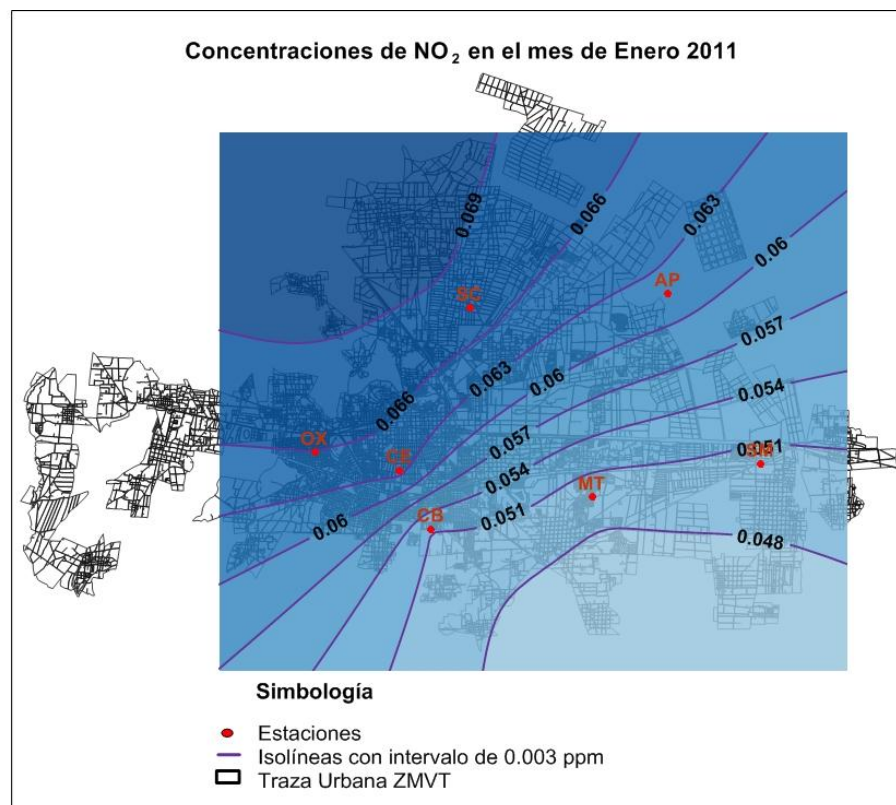
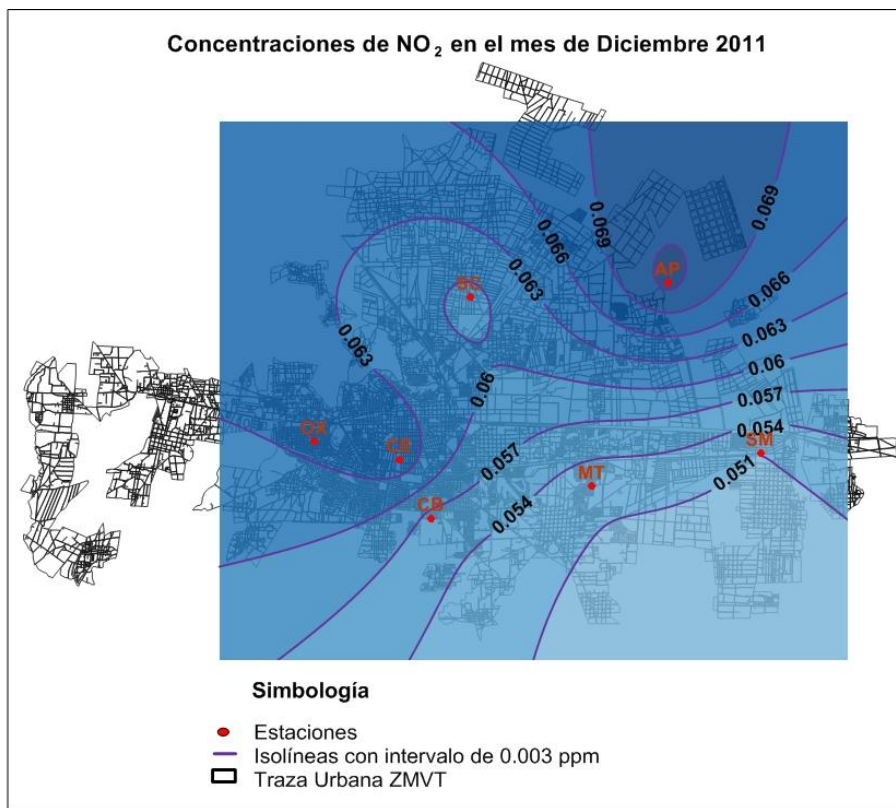
c. Otoño



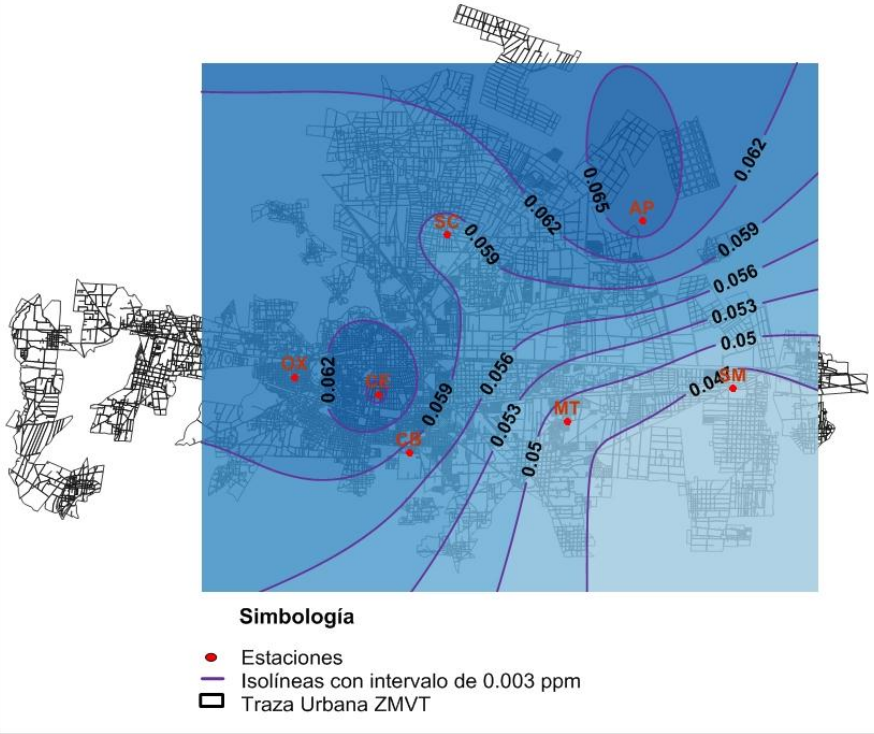
Concentraciones de NO₂ en el mes de Noviembre 2011



d. Invierno



Concentraciones de NO₂ en el mes de Febrero 2011



5.4 Distribución de O₃ en la ZMVT en el año 2011

Las concentraciones de O₃ se incrementan a partir de las 12:00, con un pico que se mantiene incluso hasta alrededor de las 19:00 horas; este patrón corresponde a los picos de temperatura e intensidad solar que ocurren después de los picos de emisiones por la actividad vehicular de las mañanas.

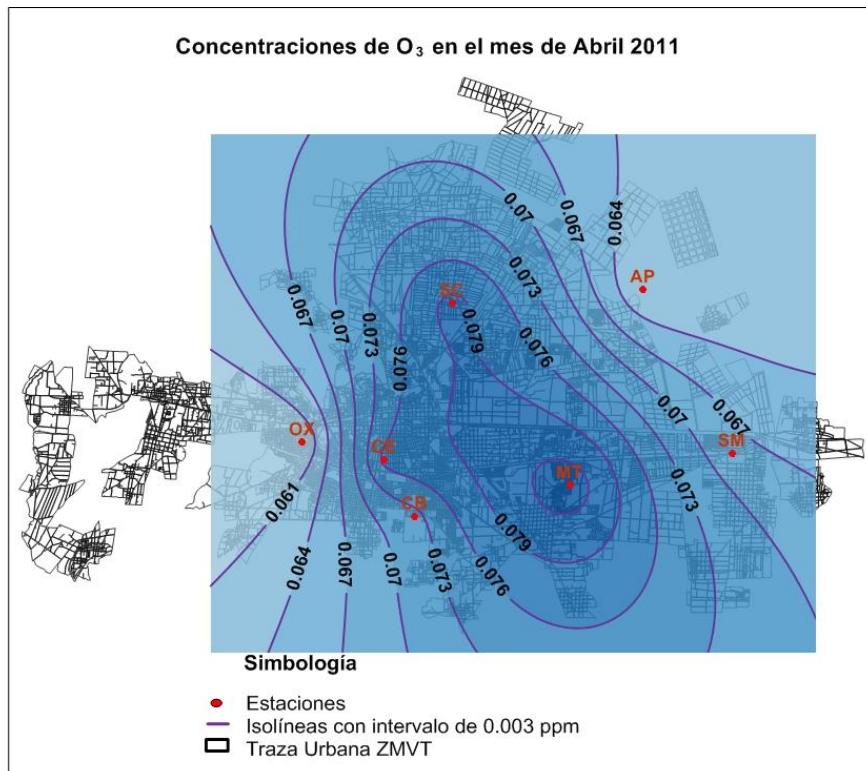
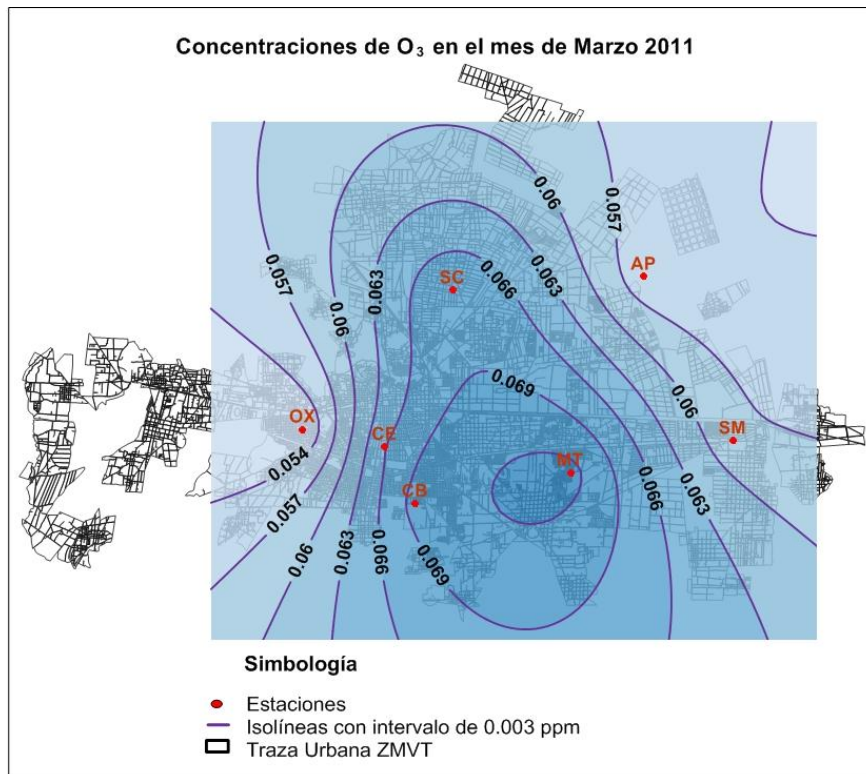
En relación con el comportamiento durante el año presenta concentraciones más altas en los meses de abril y mayo.

Los valores más altos se presentan en las estaciones de Metepec, Centro y Ceboruco e incluso San Cristóbal, ubicadas en el centro y norte de la ciudad disminuyendo gradualmente hacia el este y oeste. Cabe mencionar que este comportamiento se ve muy diferenciado del que se presentaba en años anteriores en donde los valores más altos se presentaban al este de la ciudad en Metepec y San Mateo Atenco disminuyendo gradualmente hacia el oeste.

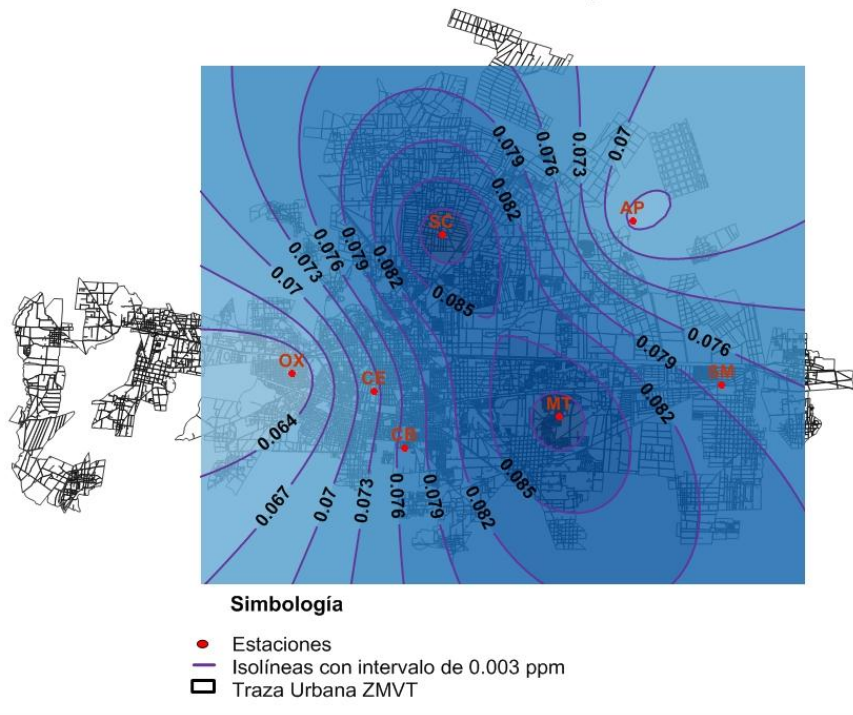
Este caso atípico no solo ocurre en la distribución de las estaciones también se observa la diferencia en el comportamiento durante los días de la semana en donde en años anteriores se observaba que los sábados y domingos disminuían las concentración y durante el año 2011 se observan valores altos durante todos los días de la semana rompiendo con la tendencia del comportamiento de este contaminante.

Aunado a esto el O₃ es uno de los contaminantes que presenta constantes valores por encima de la norma en 12 días durante el año, si bien no es una cifra relevante comparada con los 365 días del año que se analizan, el problema con este contaminante presenta un agravante en el año de estudio que debe ser tomado en cuenta para poner en marcha medidas precautorias y así evitar que siga aumentando su concentración y distribución en la ZMVT.

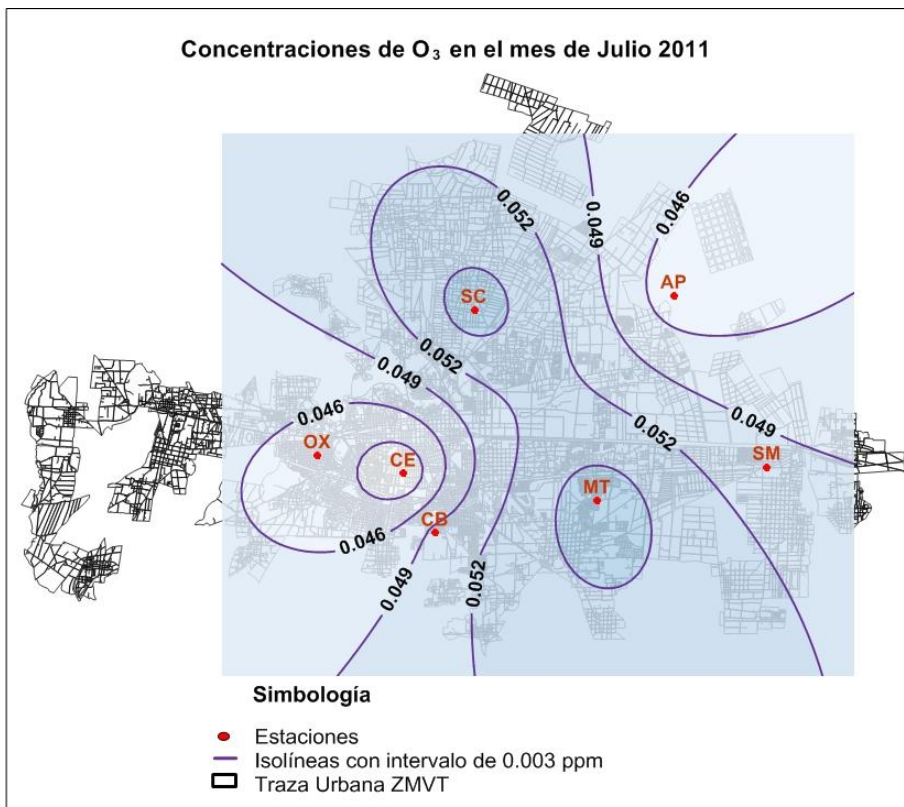
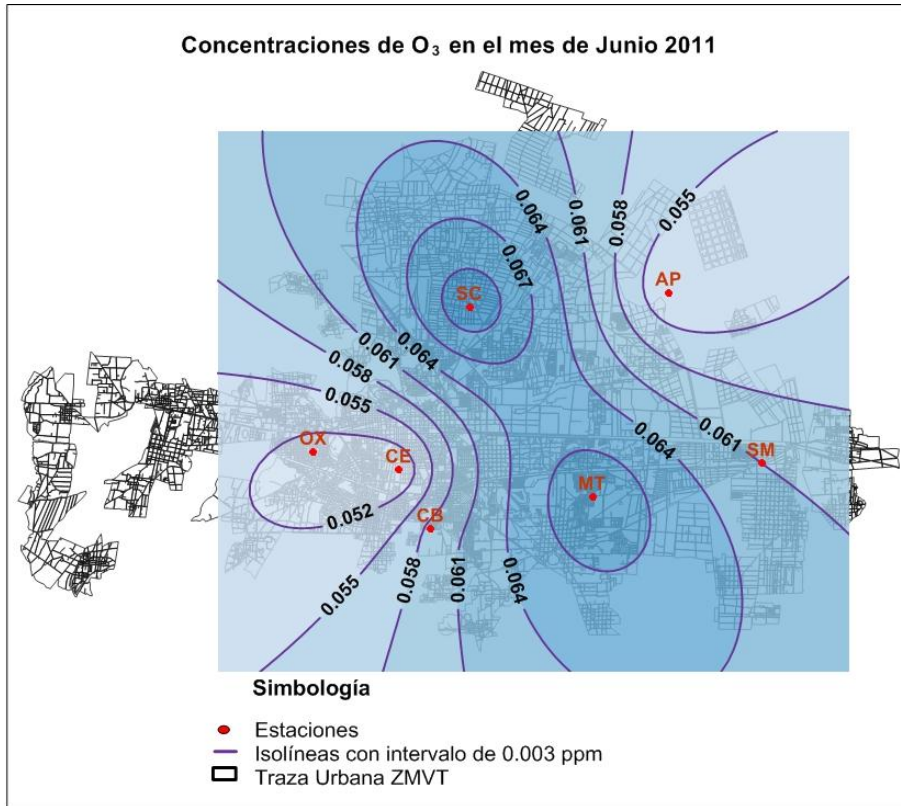
a. Primavera



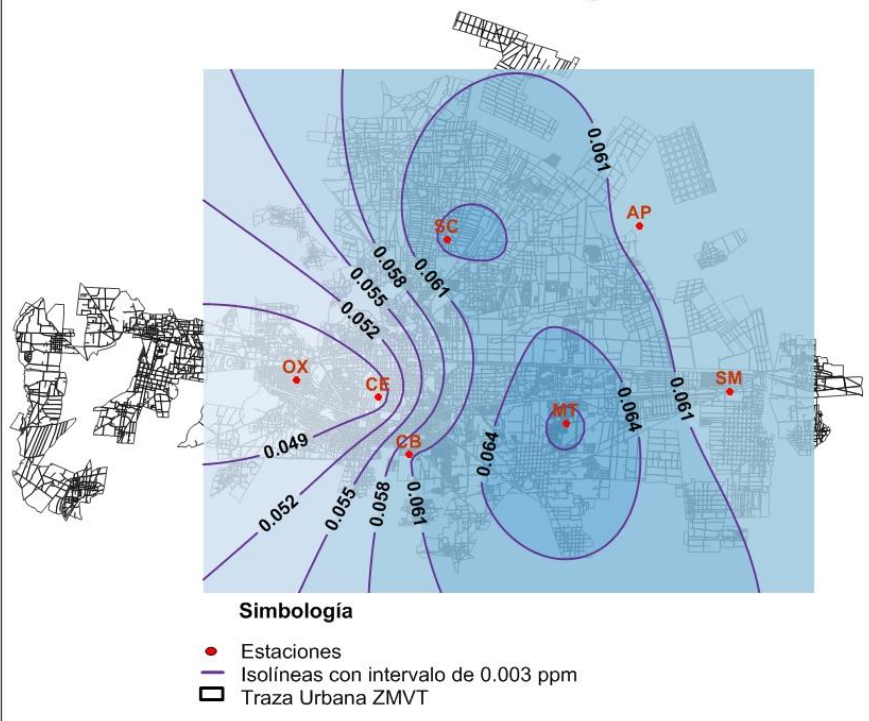
Concentraciones de O₃ en el mes de Mayo 2011



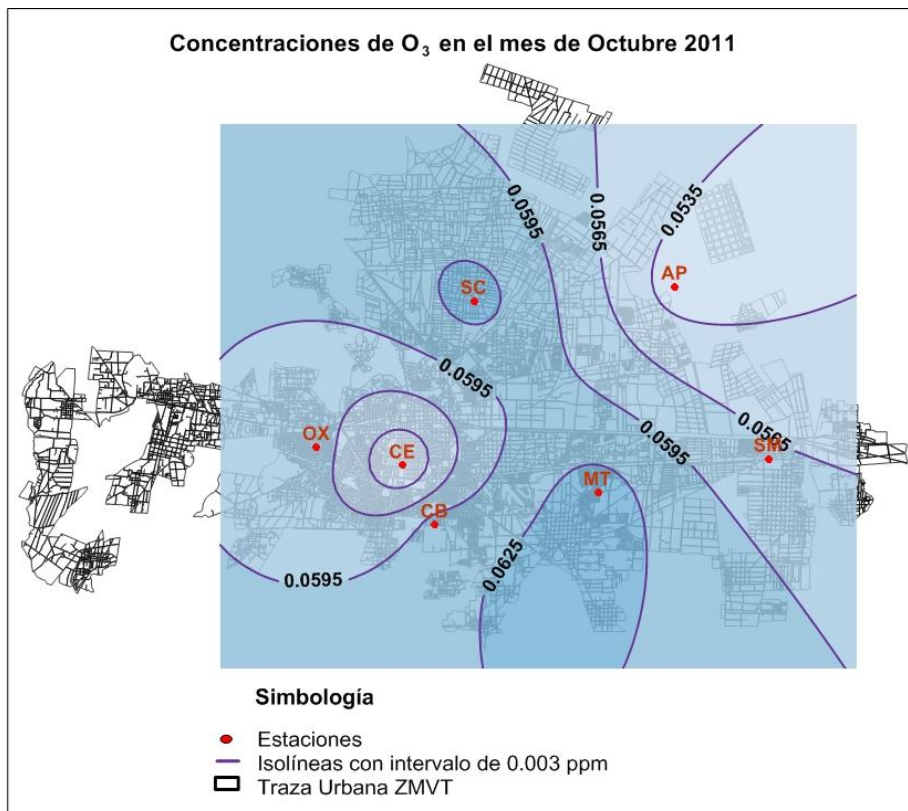
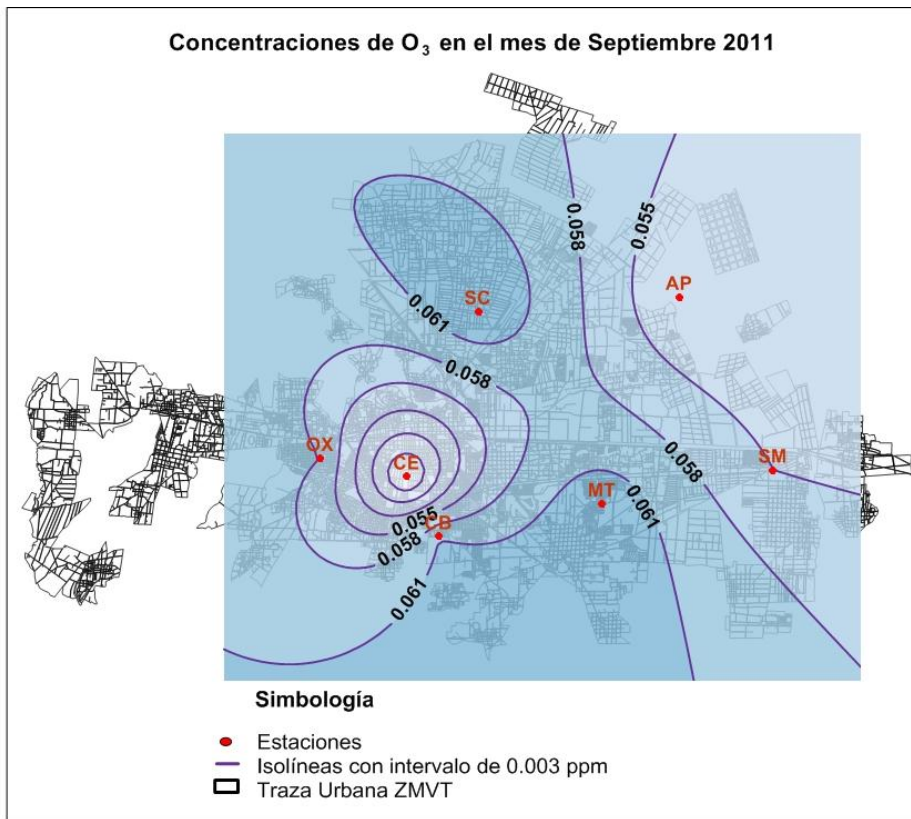
b. Verano



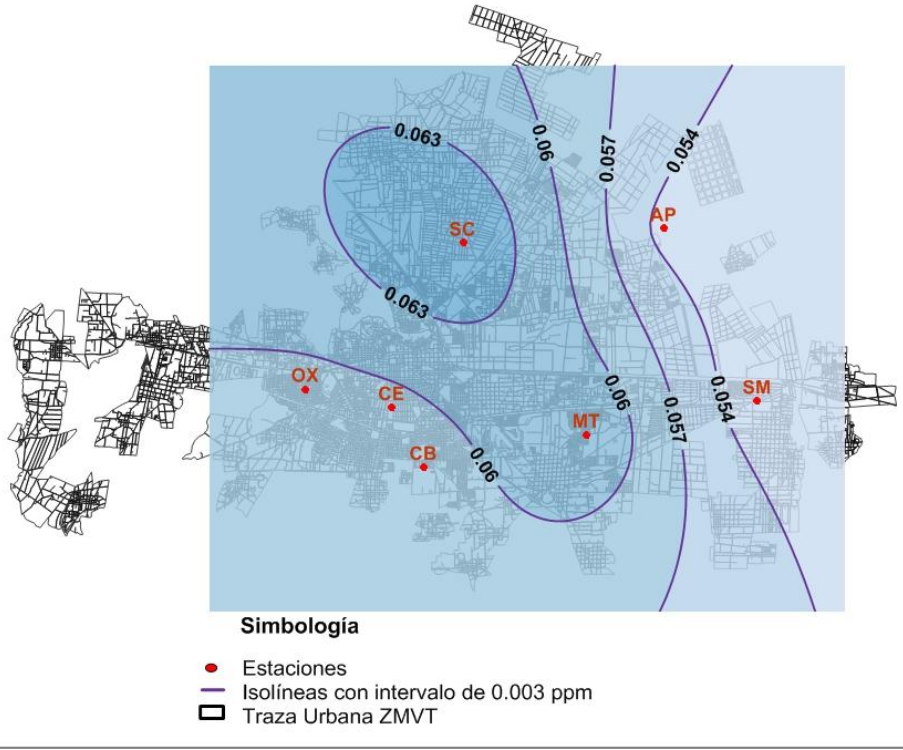
Concentraciones de O₃ en el mes de Agosto 2011



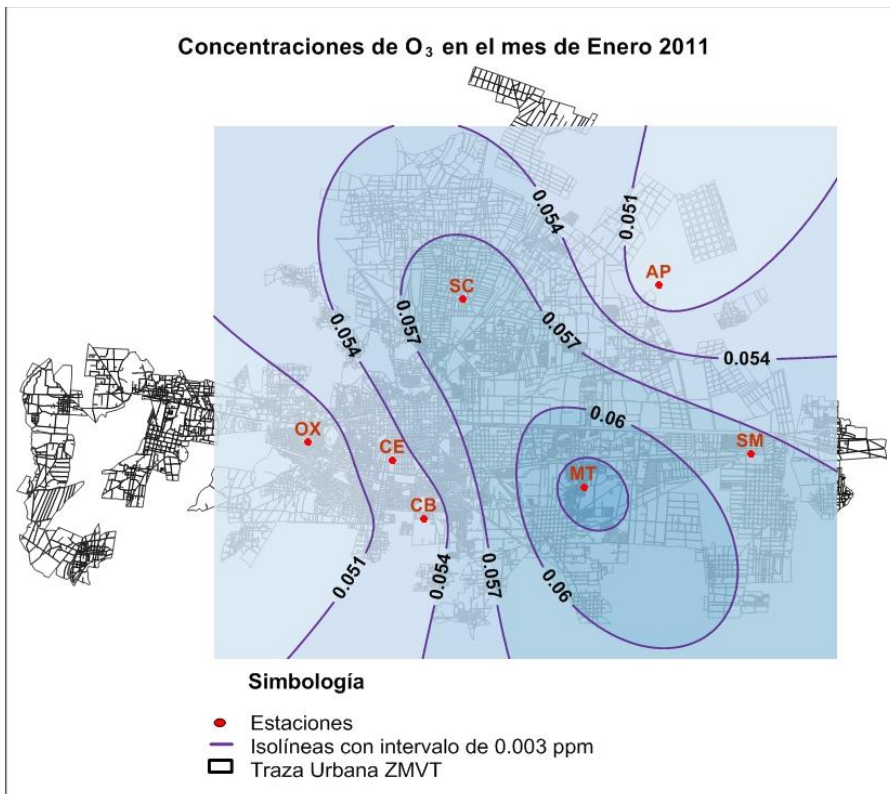
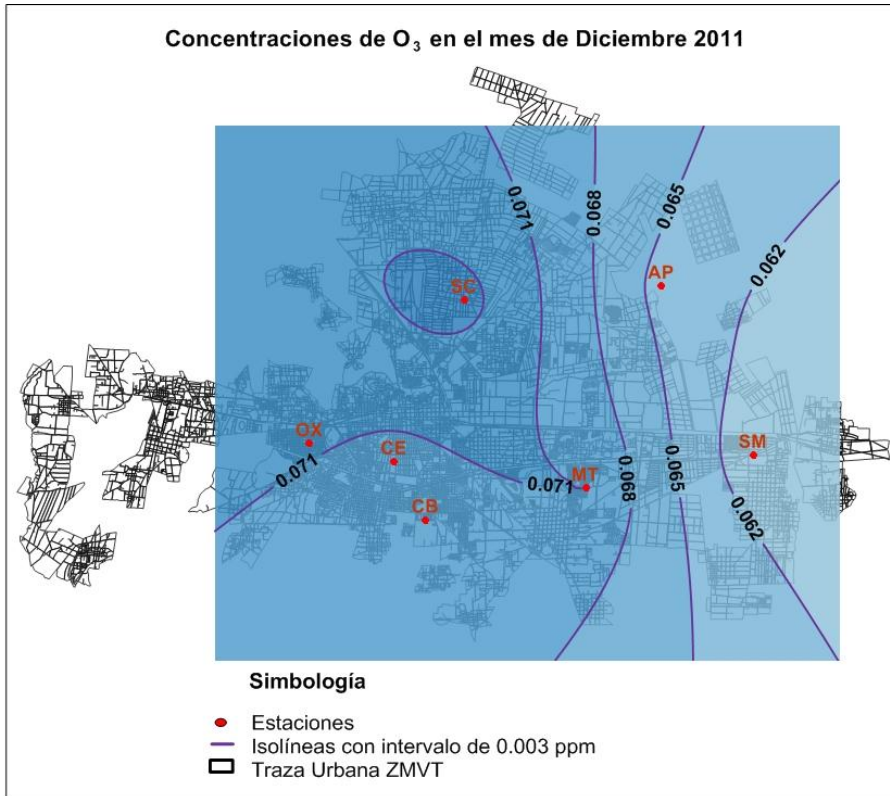
c. Otoño



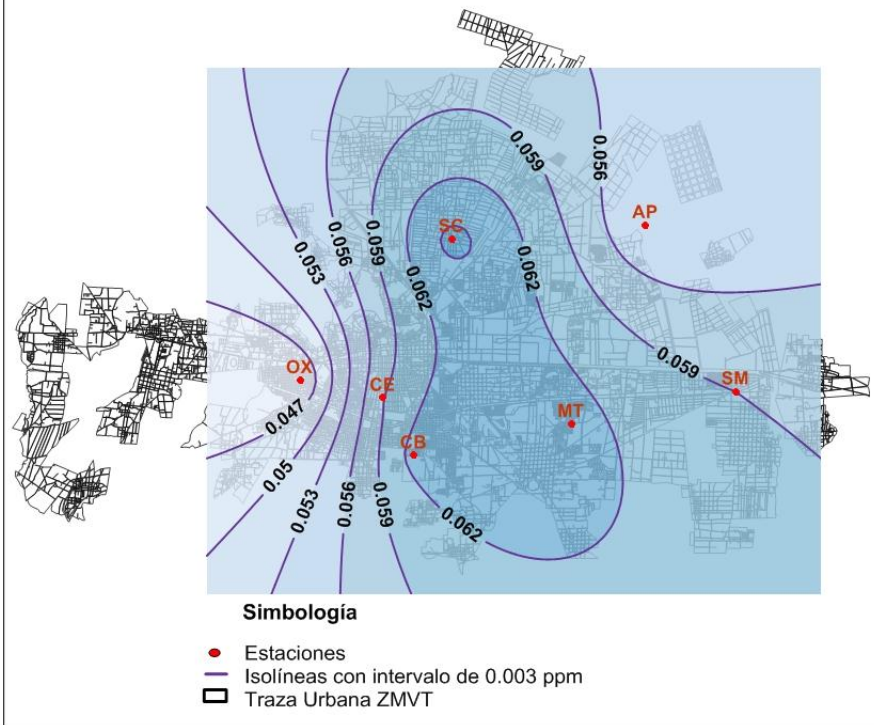
Concentraciones de O₃ en el mes de Noviembre 2011



d. Invierno



Concentraciones de O₃ en el mes de Febrero 2011



5.5 Distribución de PM_{2.5} en la ZMVT en el año 2011

Es necesario mencionar que solo a partir del 2011 se ha podido realizar un estudio de análisis de los datos ya que anteriormente no se realizaban mediciones en la ZMVT por lo cual no hay un antecedente para comparar su comportamiento.

Las concentraciones de PM_{2.5} se incrementan a partir de las 8:00, con un pico que se mantiene incluso hasta alrededor de las 13:00 horas y de nuevo un incremento menor de las 20:00 y hasta las 24:00 horas. Durante la semana se observan valores más altos durante los días hábiles de la semana e incluso el sábado y un poco disminuida el día domingo.

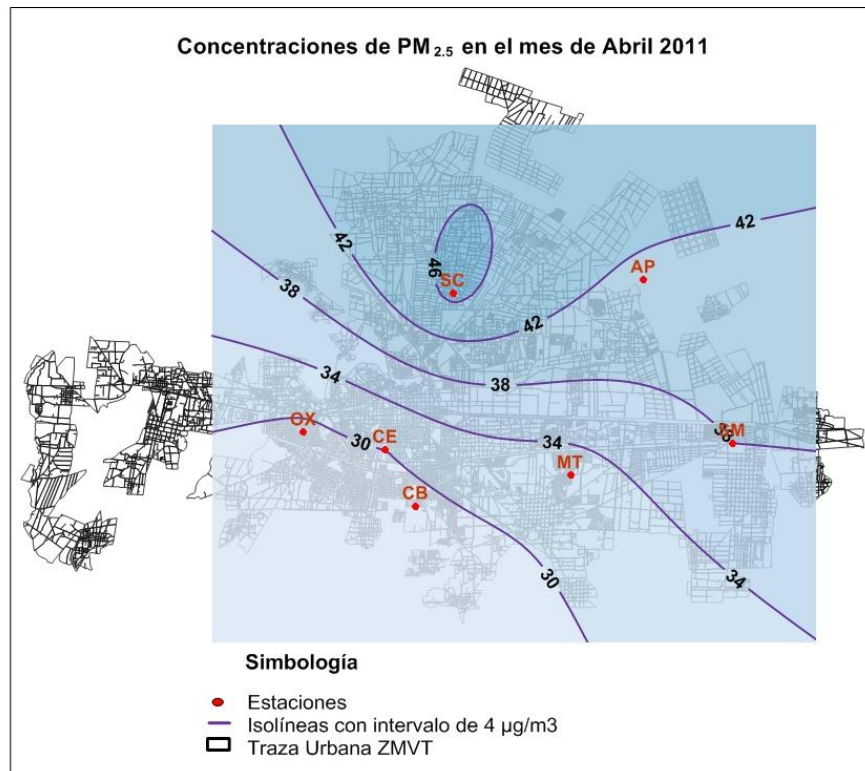
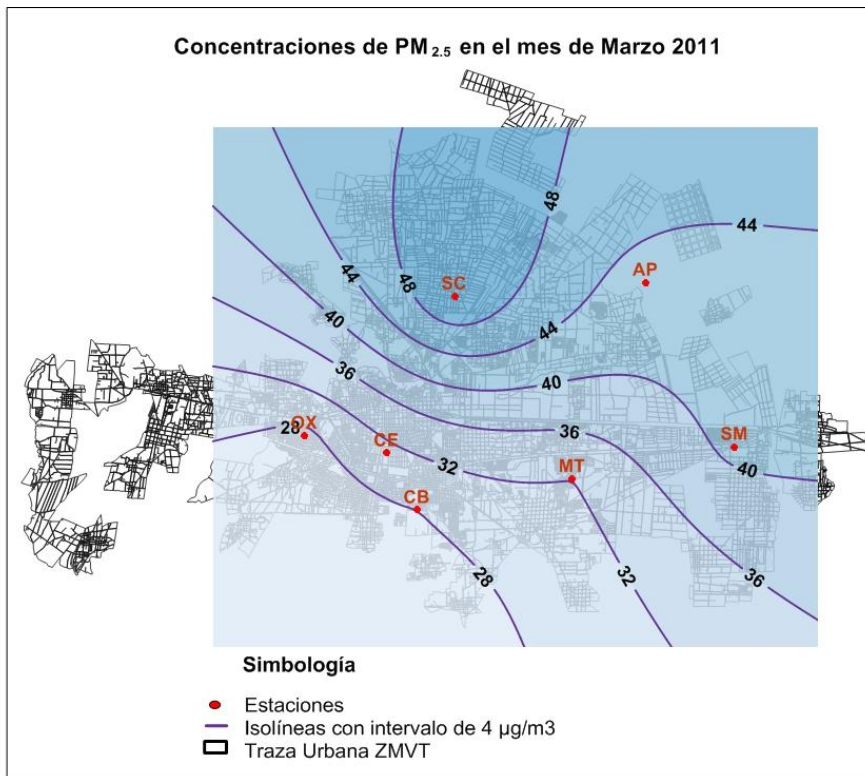
En relación con el comportamiento durante el año presenta concentraciones más altas en los meses de diciembre y enero.

Los valores más altos se presentan en la estación de San Cristóbal.

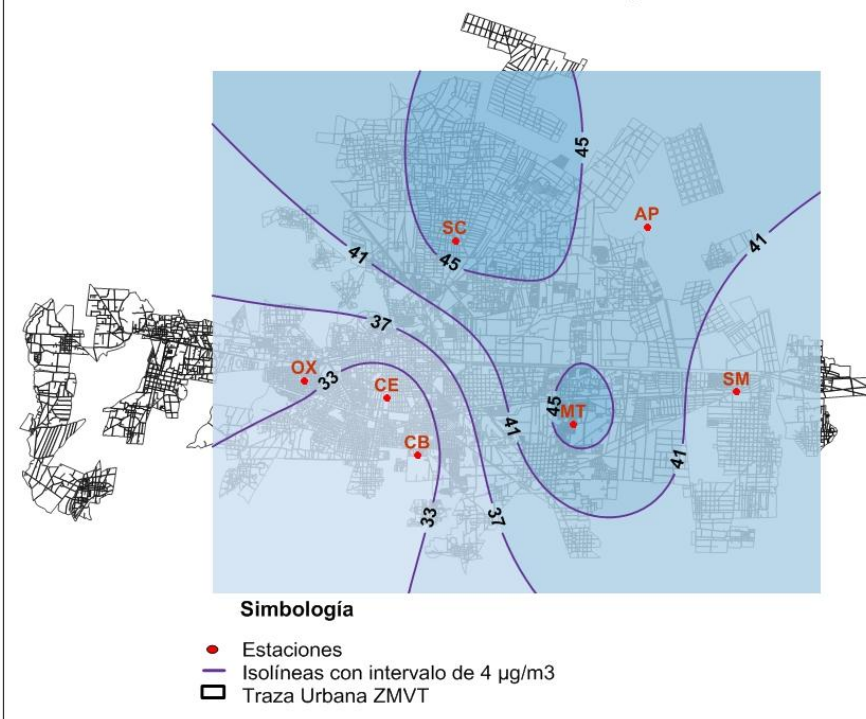
En cuestión de normatividad siendo muy estrictos con la NOM de PM_{2.5} la cual nos indica que para saber si se cumple o no con la norma se utiliza como indicador el promedio anual de 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de los promedio de 24 horas. Se cumple ya que el promedio es de 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A pesar de que la normatividad indica que está dentro de la norma, en las bases de datos diarias muestran valores por encima de los 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 39 días en la ZMVT lo cual es importante resaltar ya que esto trae consecuencias graves en la salud de la población.

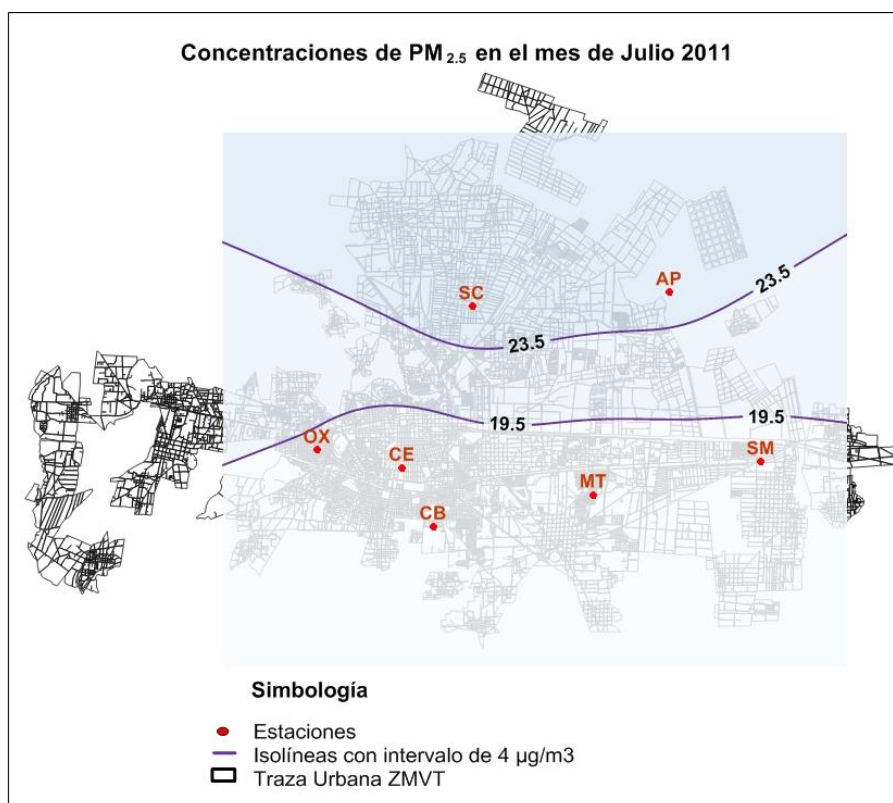
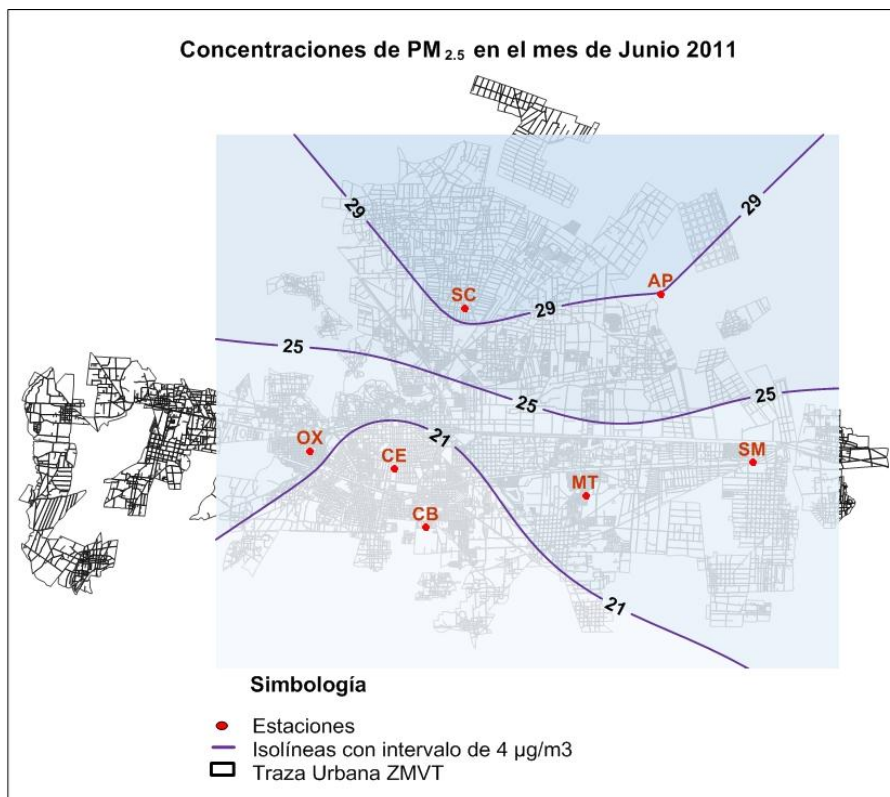
a. Primavera



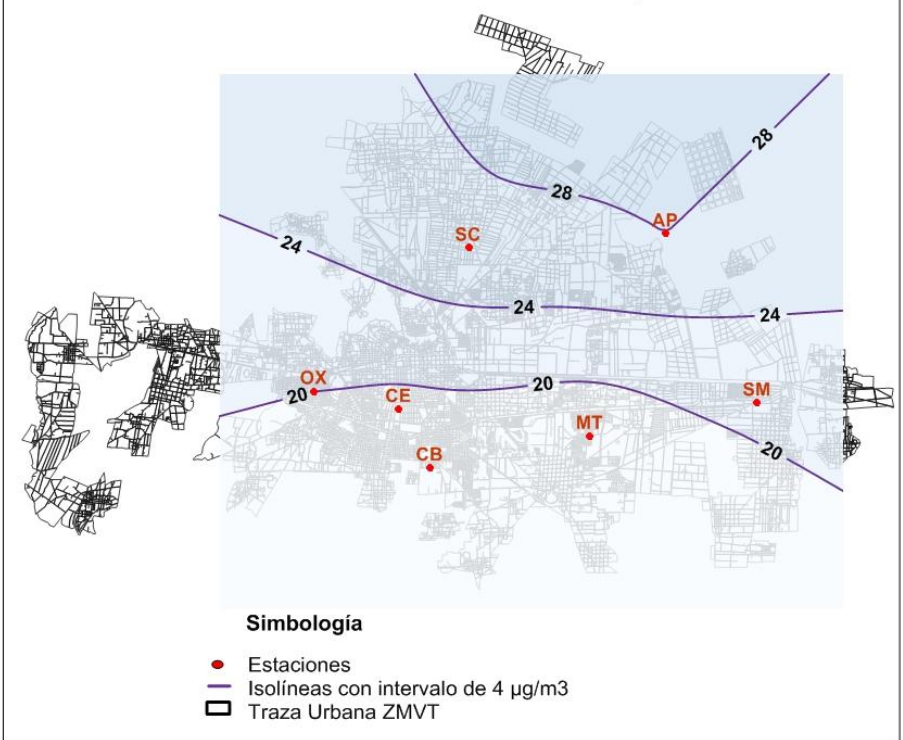
Concentraciones de PM_{2.5} en el mes de Mayo 2011



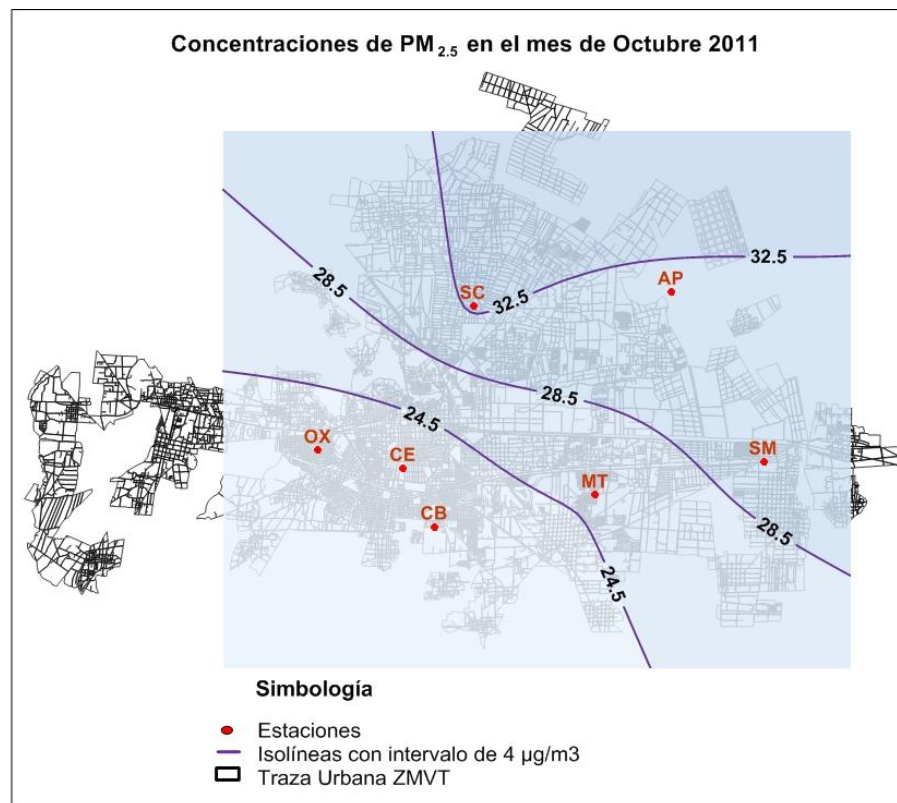
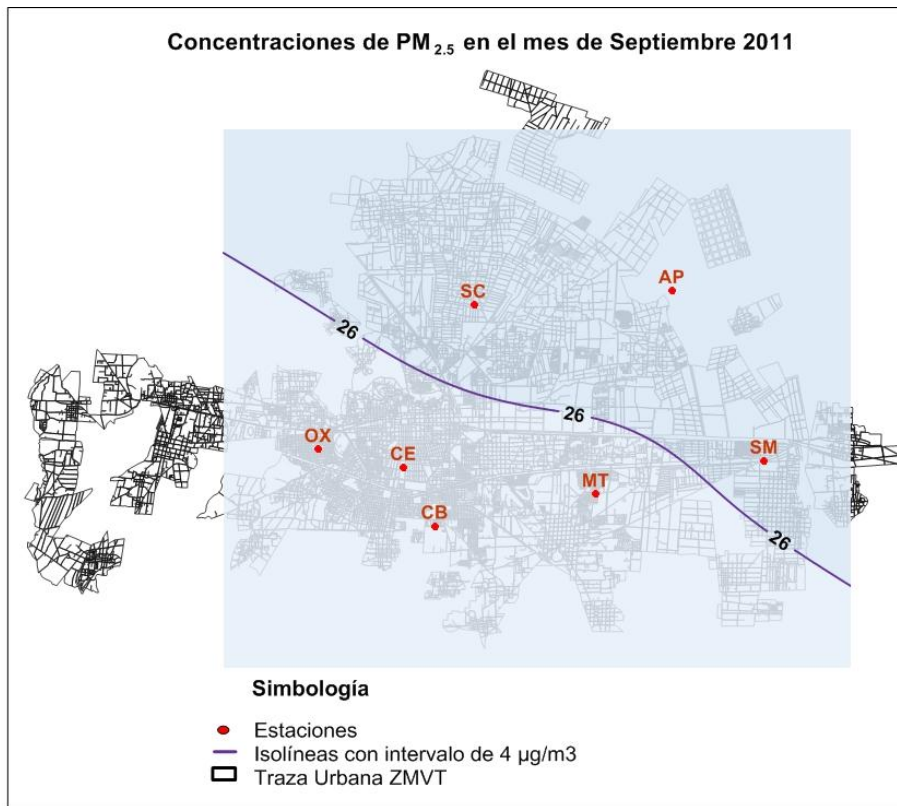
b. Verano



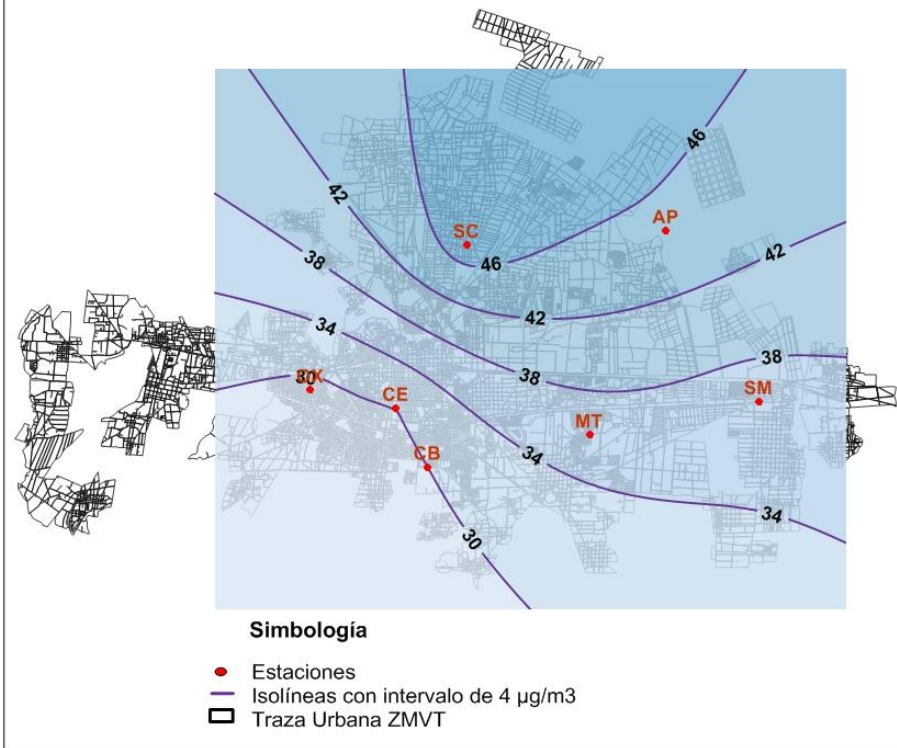
Concentraciones de PM_{2.5} en el mes de Agosto 2011



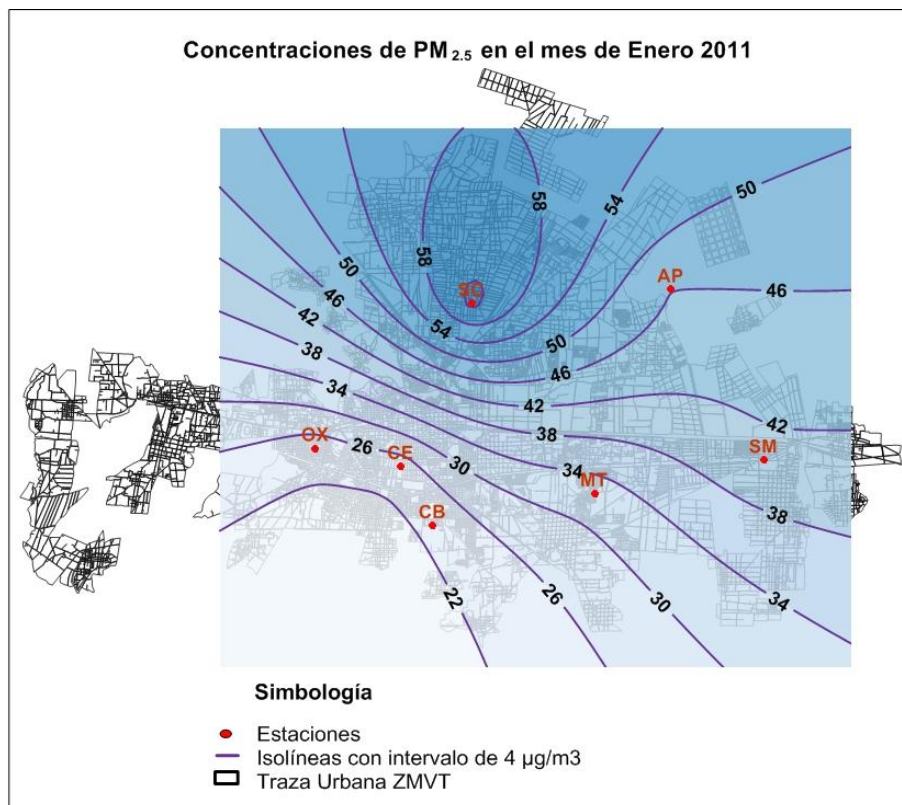
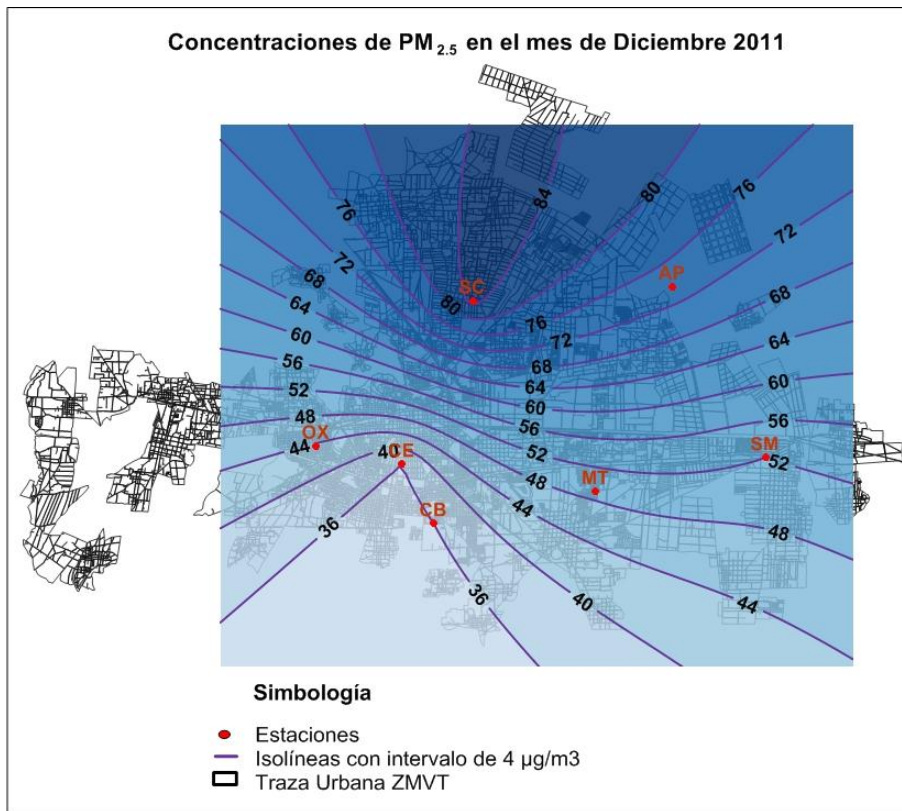
c. Otoño



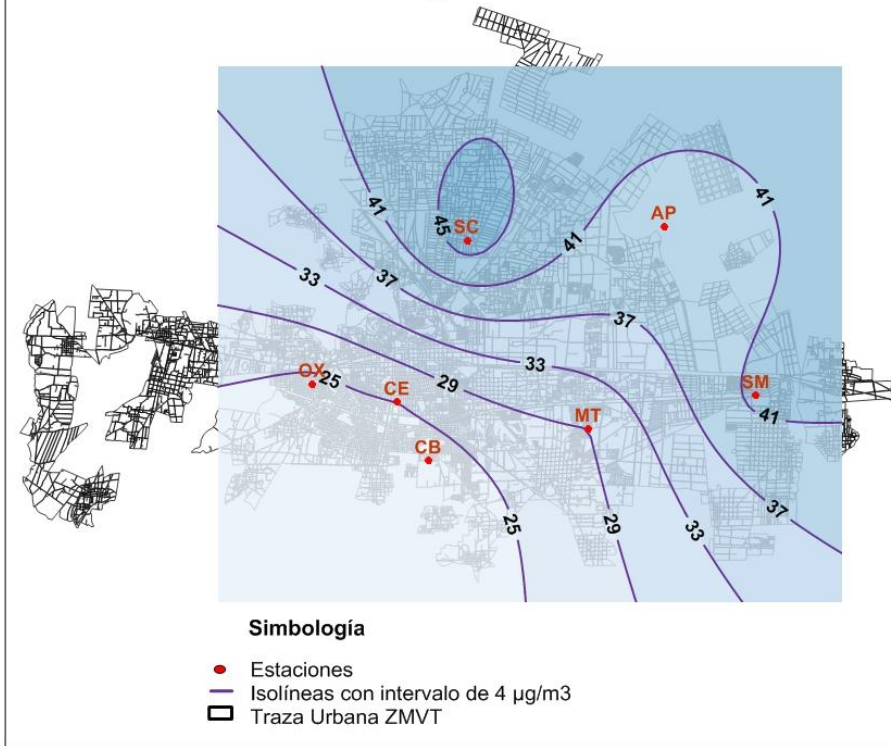
Concentraciones de PM_{2.5} en el mes de Noviembre 2011



d. Invierno



Concentraciones de PM_{2.5} en el mes de Febrero 2011



5.6 Distribución de PM₁₀ en la ZMVT en el año 2011

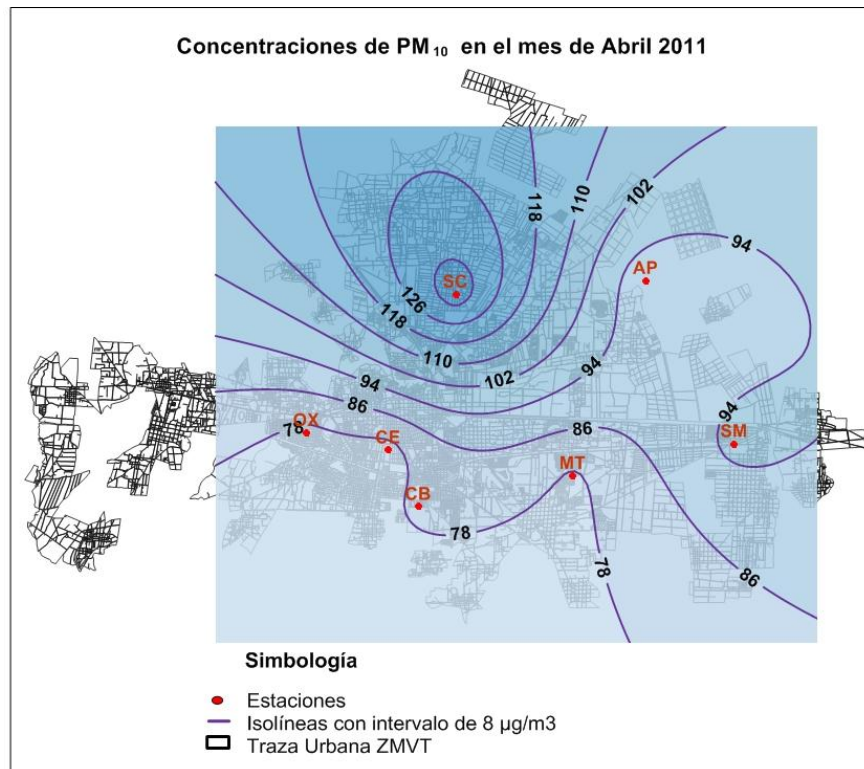
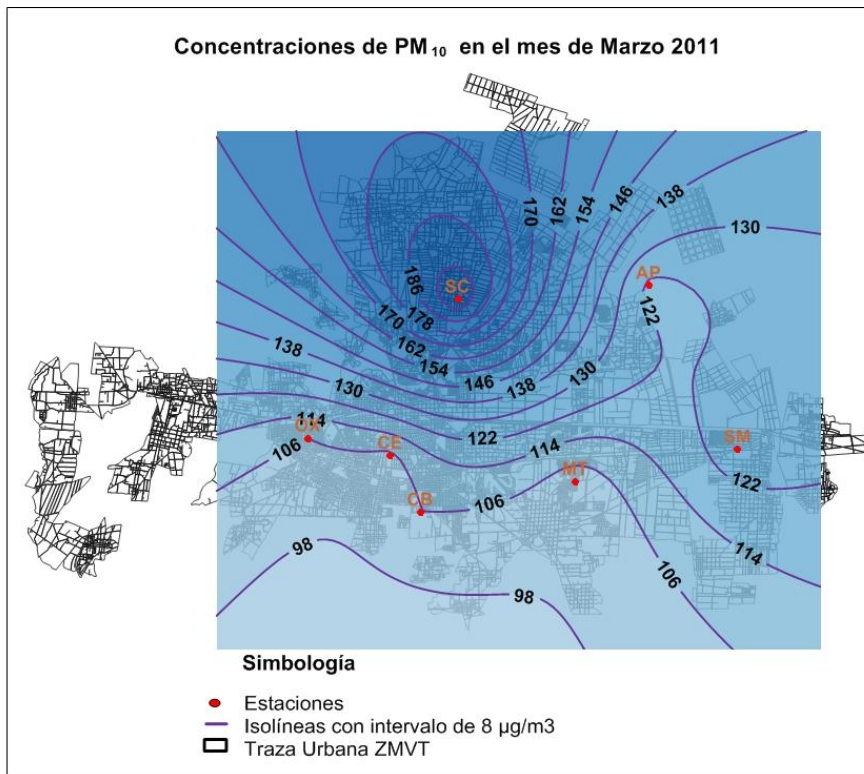
Las concentraciones más elevadas se presentan por la mañana entre las 9:00 y las 13:00 horas y por la tarde noche (aunque en menor grado) de las 17:00 a las 19:00 y de las 22:00 a las 24:00. Esto rompe el comportamiento bimodal que presentaba el contaminante en años anteriores en donde las concentraciones más elevadas se presentaban de las 7:00 a las 11:00 horas y de las 18:00 a las 22:00 horas.

Las concentraciones más bajas se presentan en los meses de junio a octubre y las más elevadas en los meses fríos de noviembre, diciembre, enero, febrero e inclusive marzo. El comportamiento de las concentraciones de las PM₁₀ a lo largo del año puede deberse a que en los meses fríos se tiene una menor capacidad dispersiva del contaminante en la atmosfera y se facilita la acumulación. Además, por tratarse de la época seca del año, ocurre una mayor resuspensión de partículas del suelo. En contraparte, en los meses de la época de lluvias son eliminadas por retención y arrastre en las gotas de lluvia, fenómenos que tienen un efecto de limpieza de las PM₁₀ de la atmosfera.

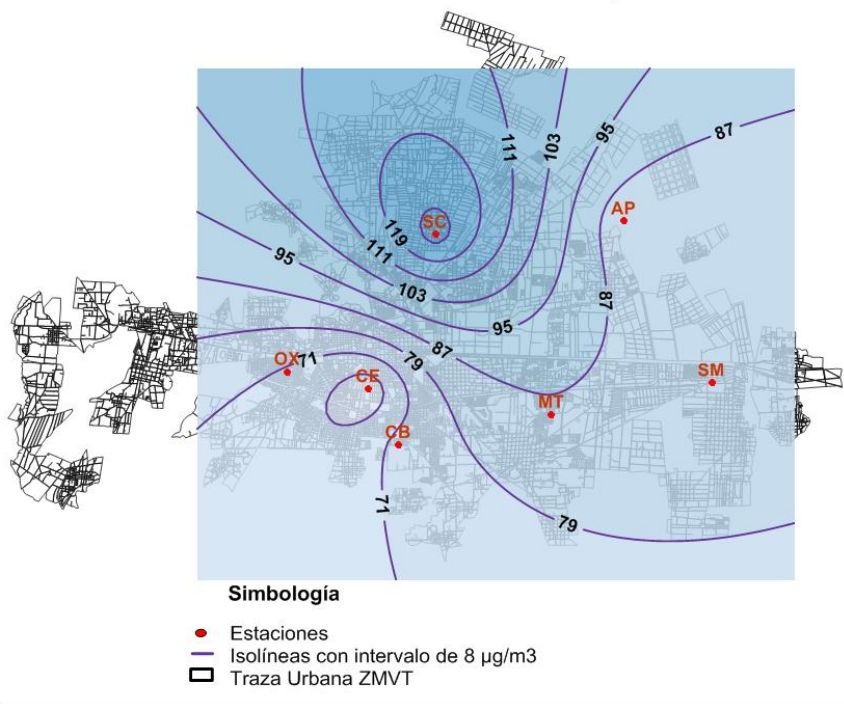
En la ZMVT las concentraciones más elevadas se ubican alrededor de la estación de monitoreo San Cristóbal, en el norte de la zona metropolitana. Dicha estación se encuentra en un área semi rural, a favor del viento de la zona industrial.

De manera general la ZMVT no cumple con la norma de calidad del aire con 177 días por encima de la norma.

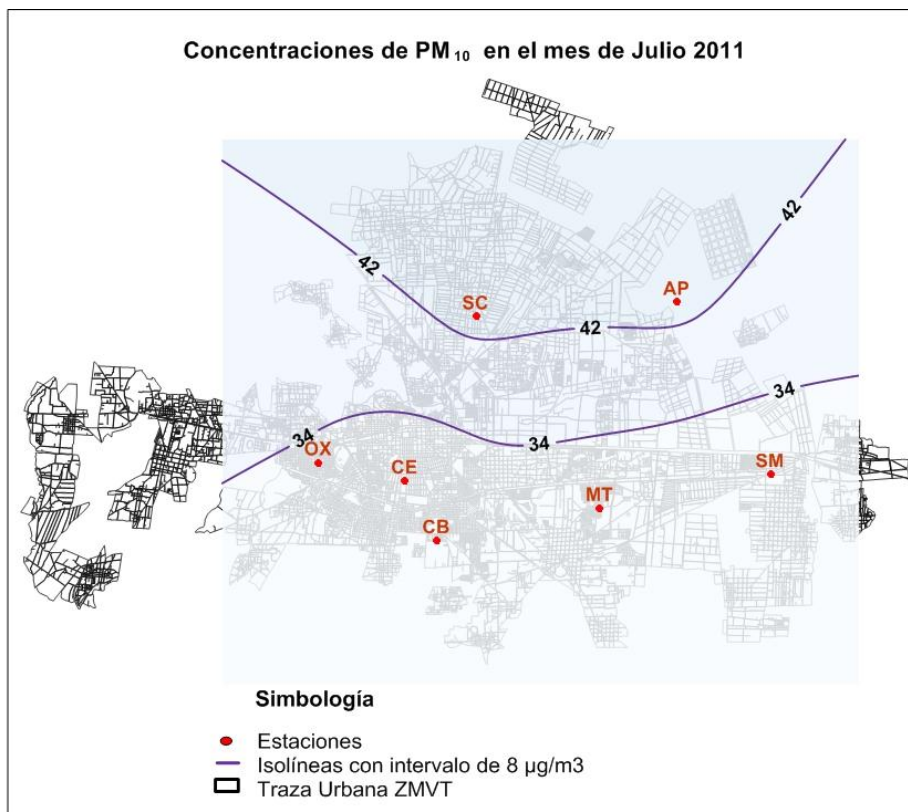
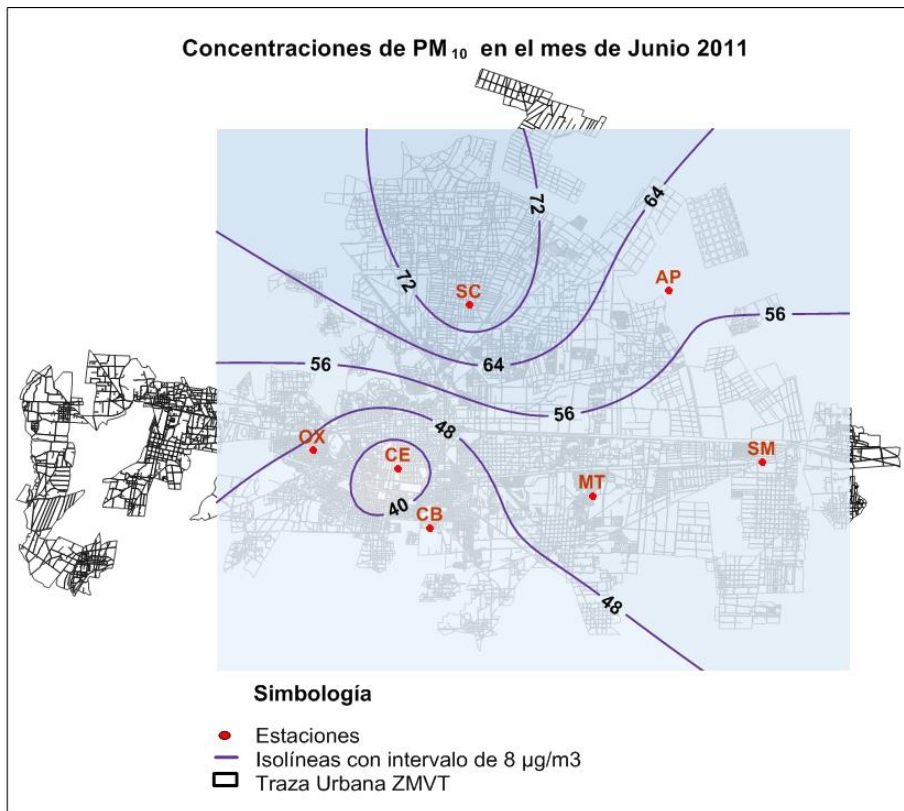
a. Primavera



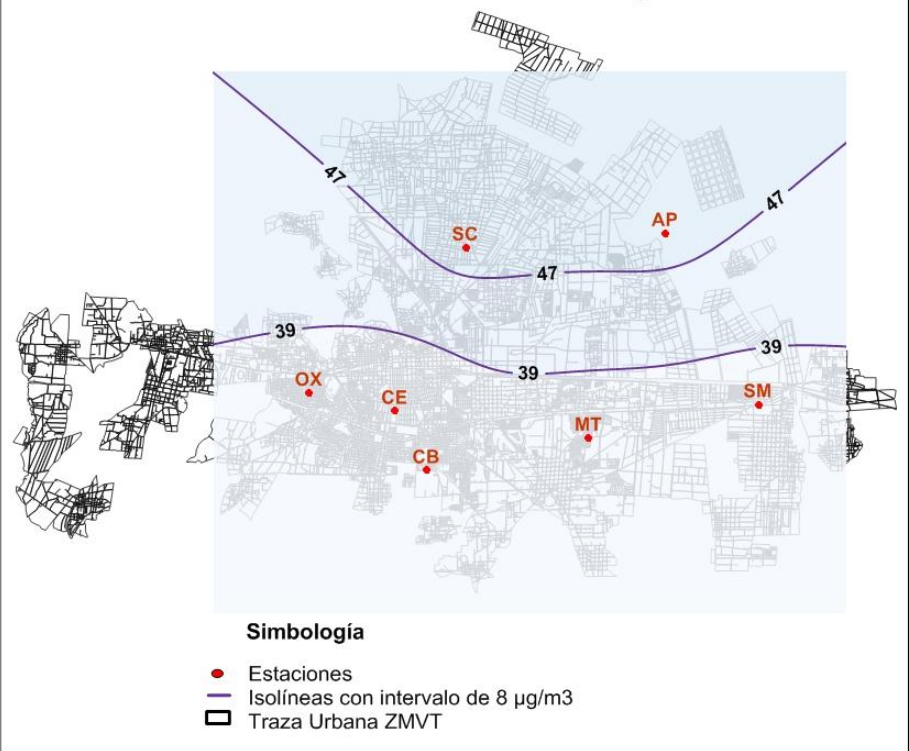
Concentraciones de PM₁₀ en el mes de Mayo 2011



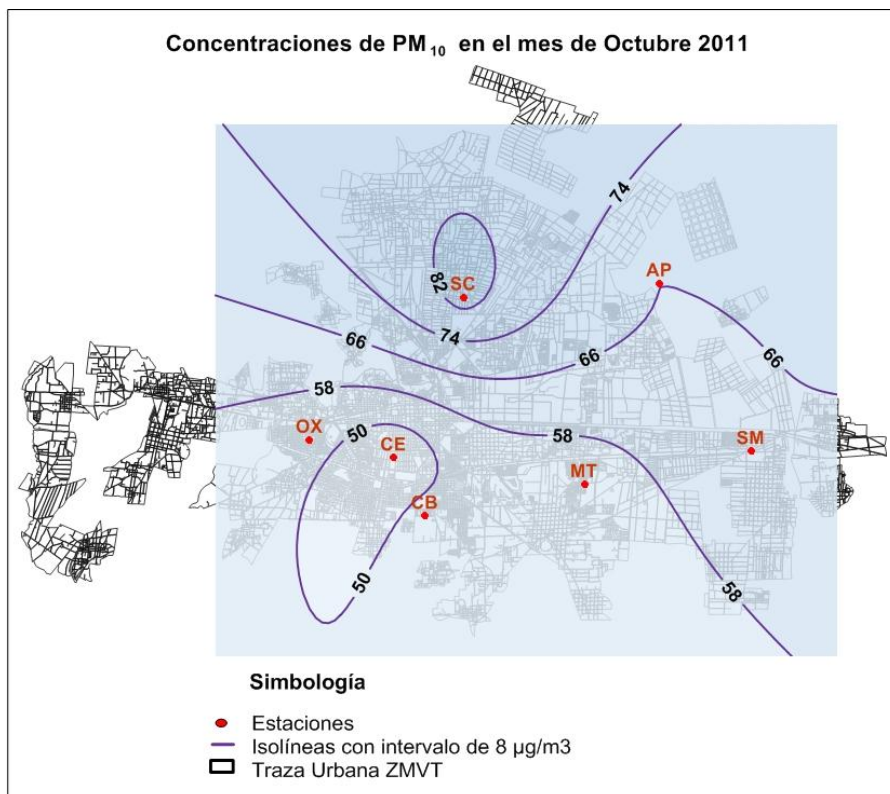
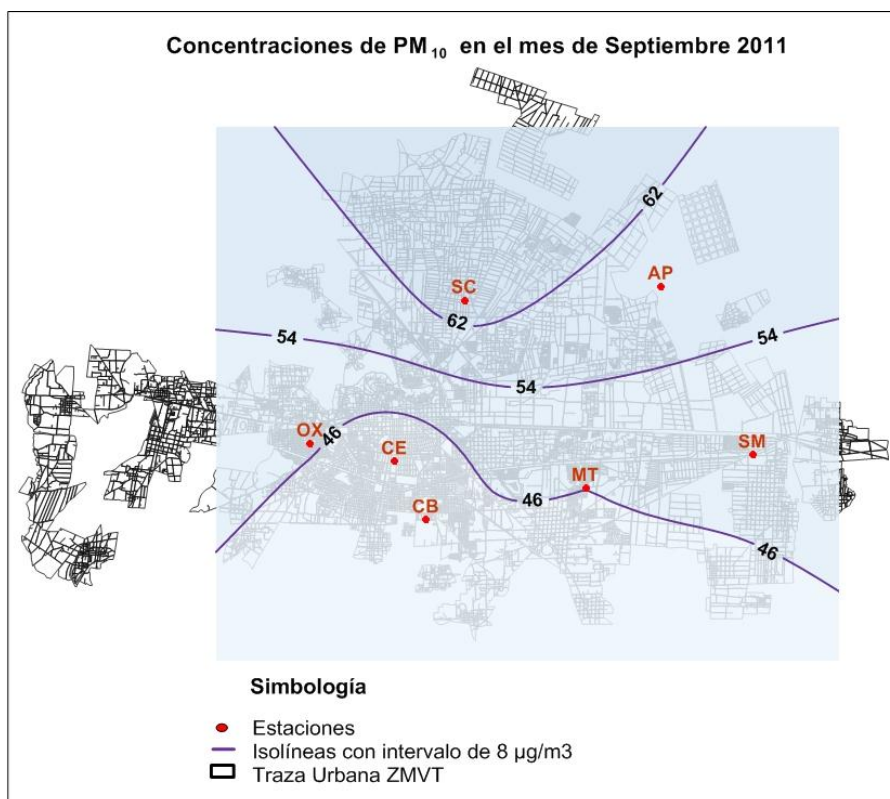
b. Verano



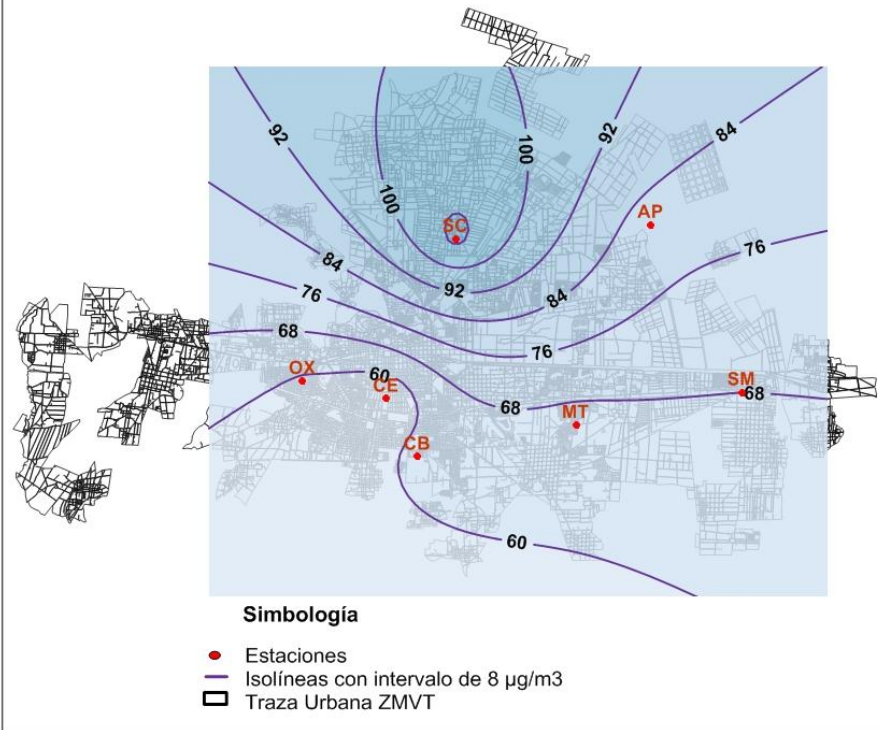
Concentraciones de PM₁₀ en el mes de Agosto 2011



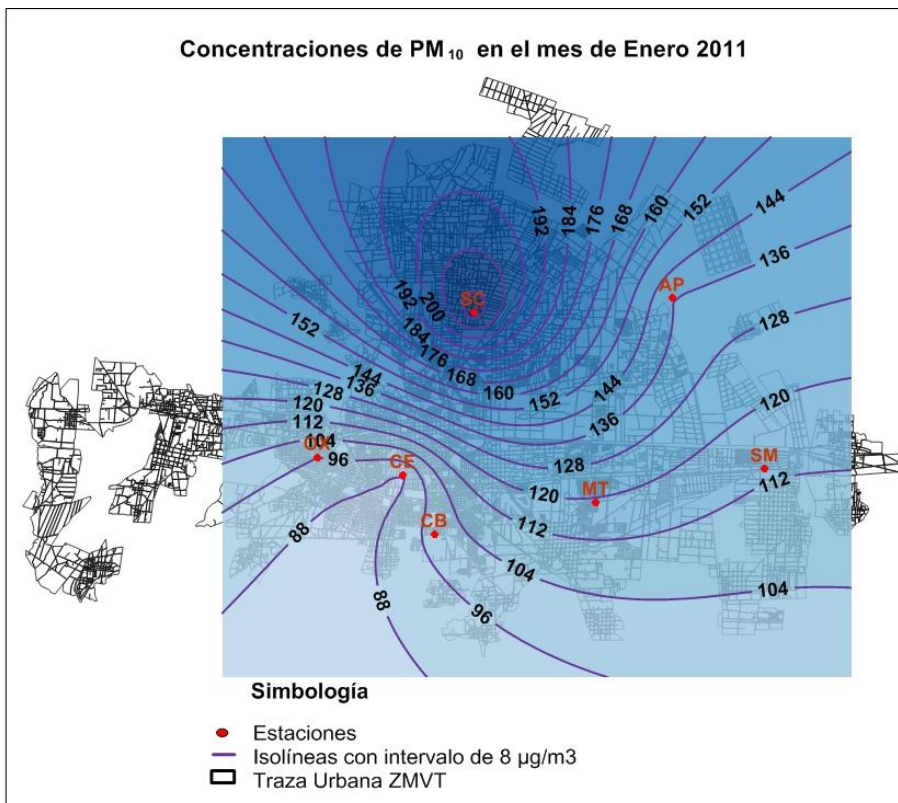
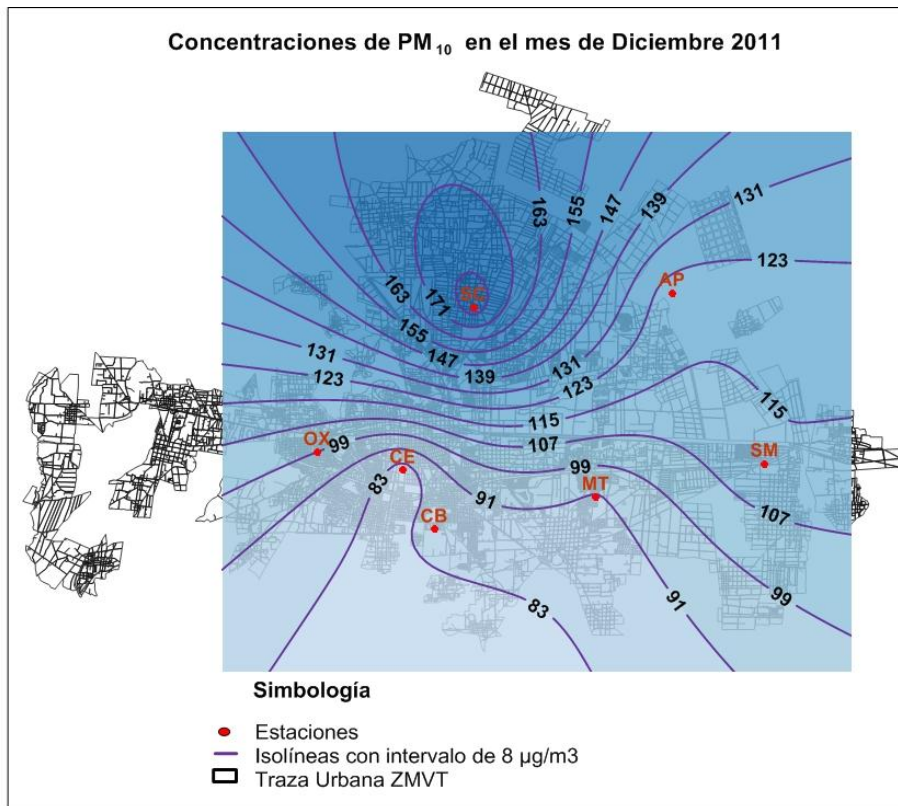
c. Otoño



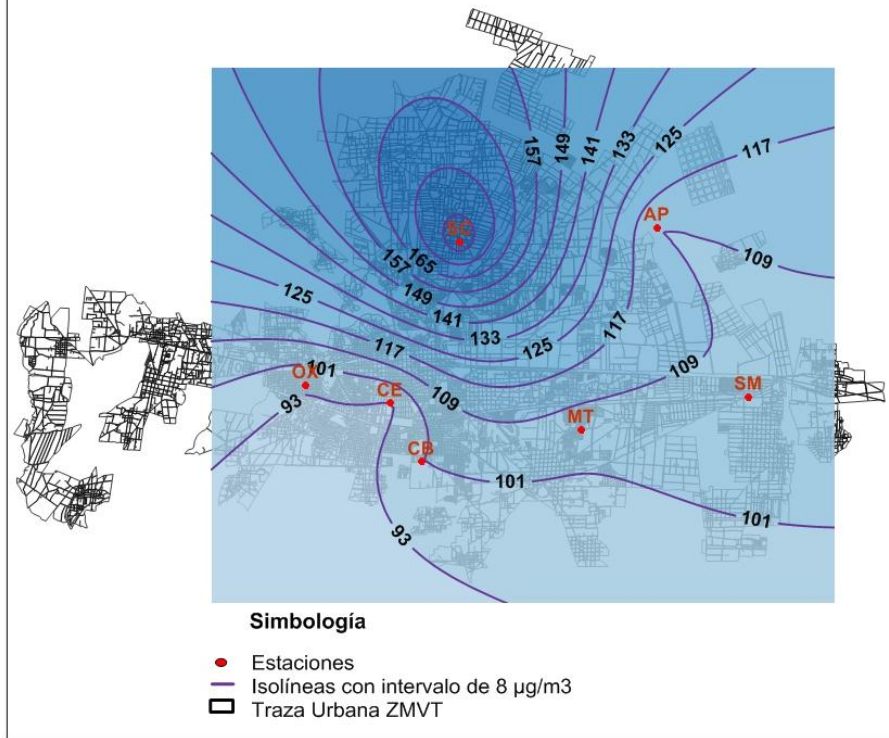
Concentraciones de PM₁₀ en el mes de Noviembre 2011



d. Invierno



Concentraciones de PM₁₀ en el mes de Febrero 2011



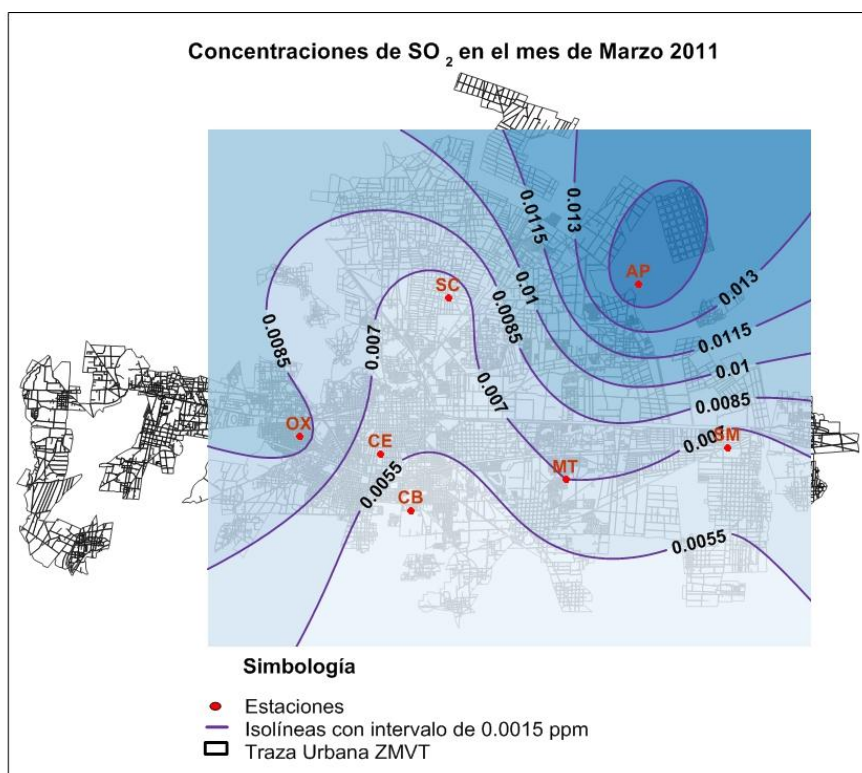
5.7 Distribución de SO₂ en la ZMVT en el año 2011

Los niveles más elevados de SO₂ por la mañana entre las 8:00 y las 11:00 horas. Durante el año las concentraciones más elevadas se aprecian de noviembre a marzo y más bajas de mayo a agosto donde las condiciones meteorológicas propician la depositación de este y otros contaminantes.

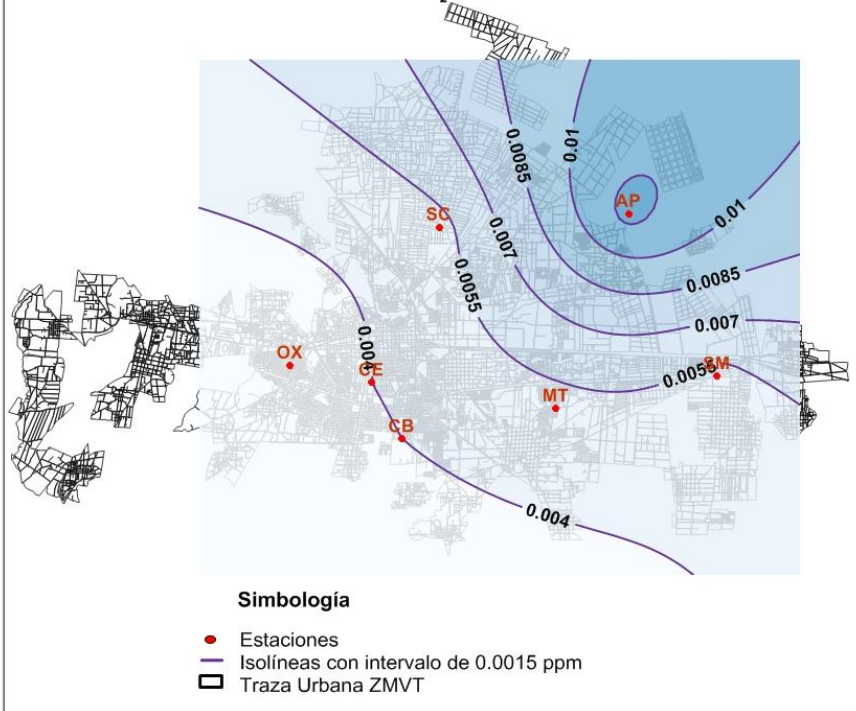
En la ZMVT los niveles más elevados se presentan en las inmediaciones de la estación de monitoreo Aeropuerto, disminuyendo gradualmente hacia el suroeste. Esta estación se localiza dentro de una zona industrial y colinda con varias instalaciones industriales, además de hay un intenso flujo vehicular.

Con respecto al límite de la norma se cumple en todas las estaciones y durante todos los años desde 1997.

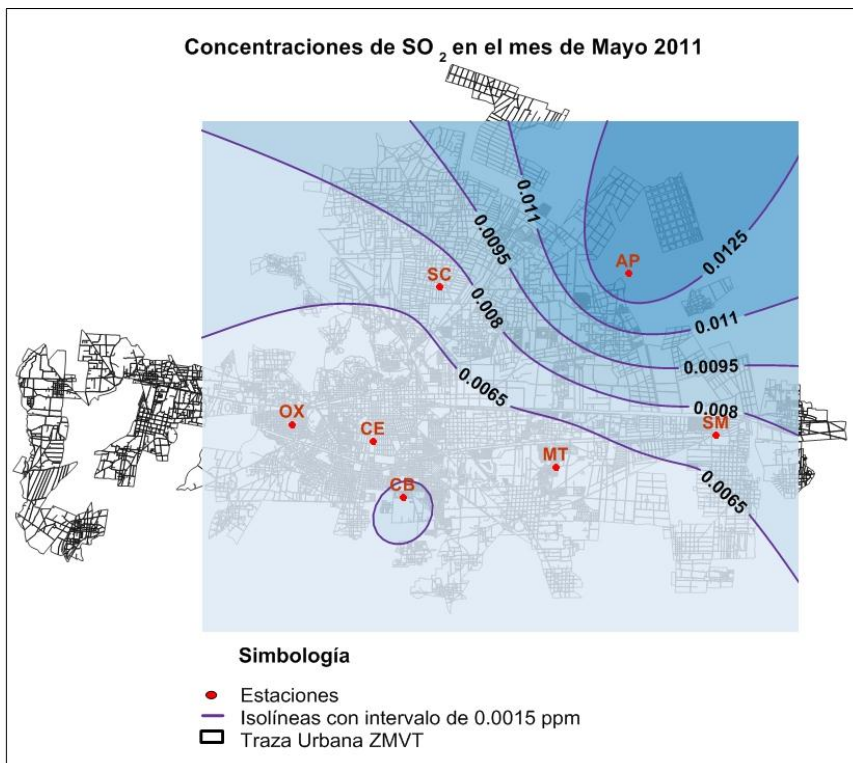
a. Primavera



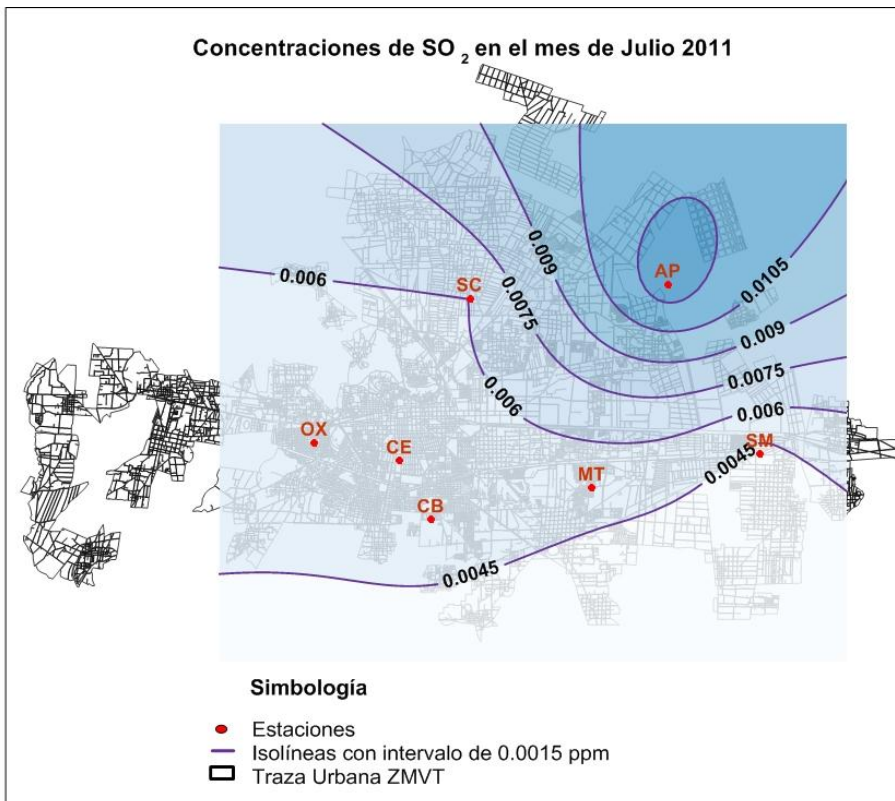
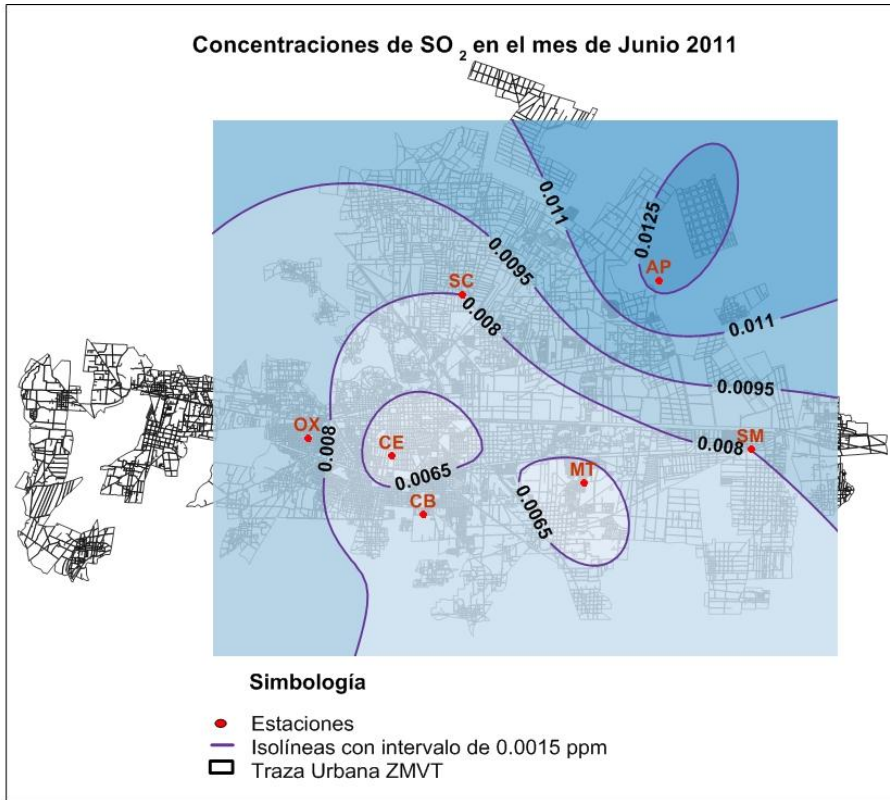
Concentraciones de SO₂ en el mes de Abril 2011



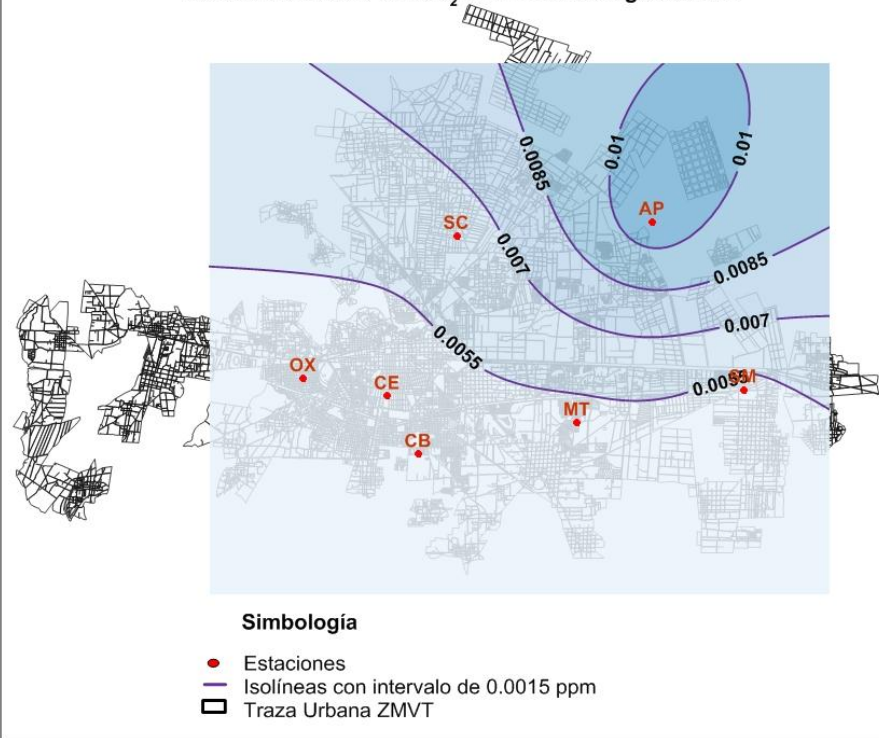
Concentraciones de SO₂ en el mes de Mayo 2011



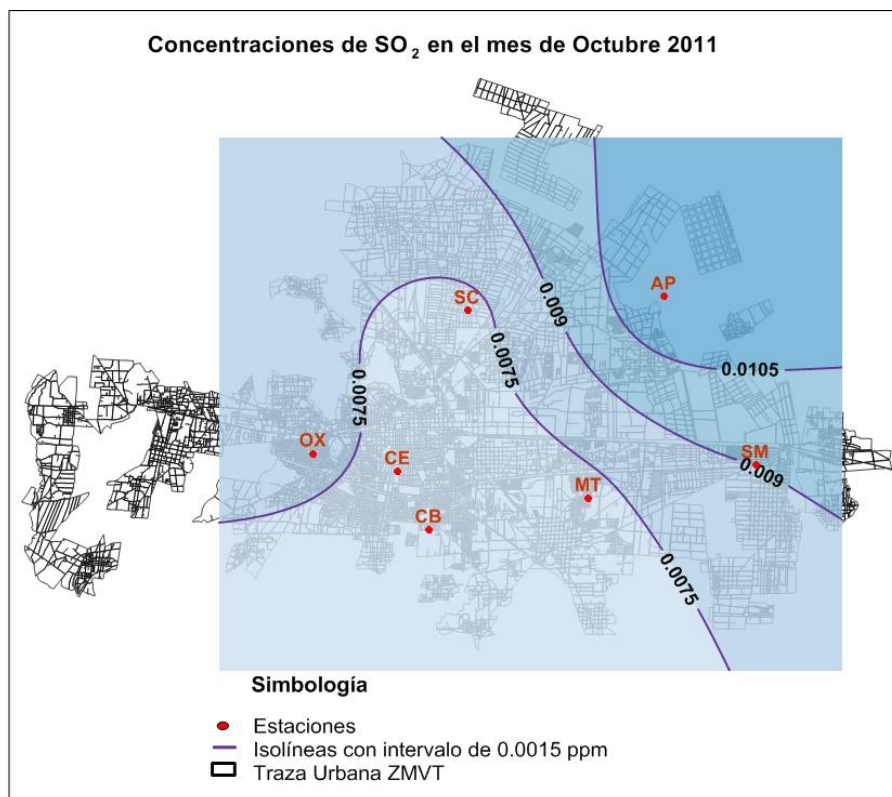
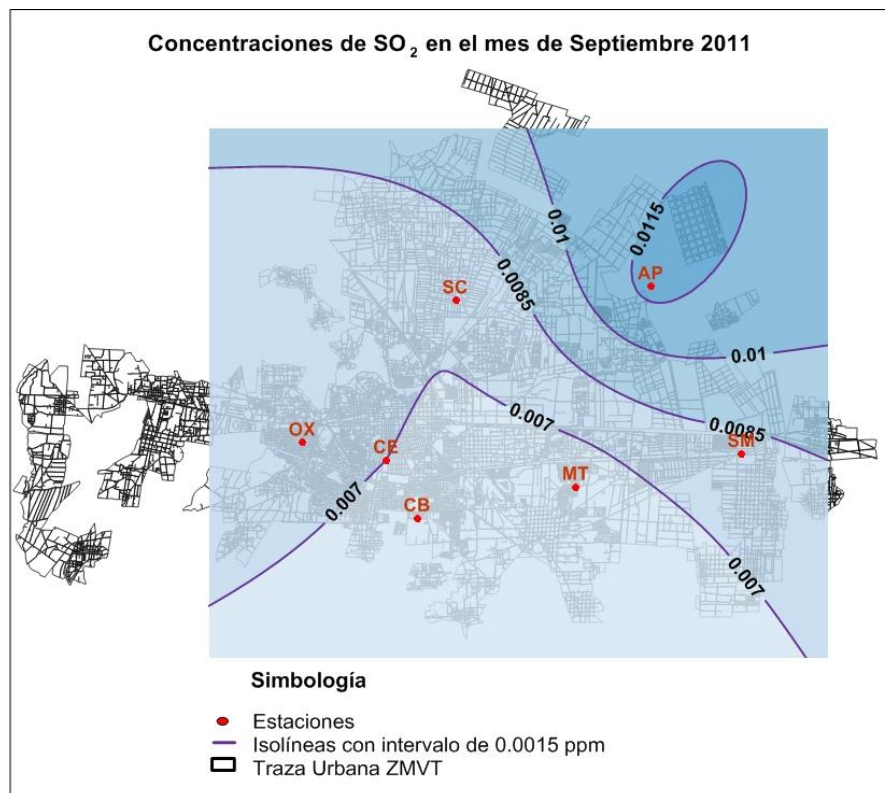
b. Verano



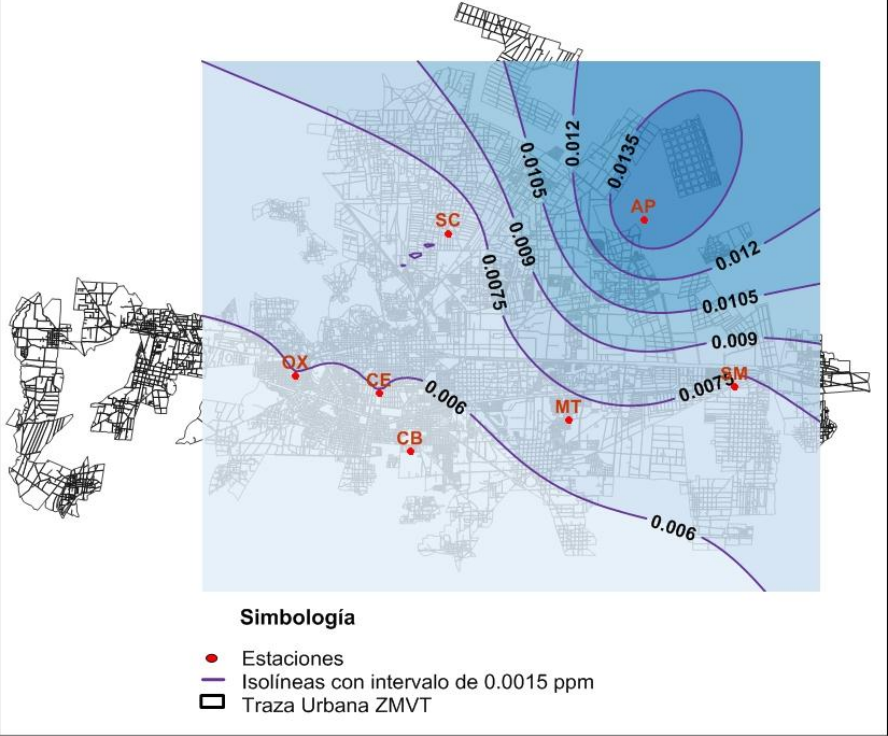
Concentraciones de SO₂ en el mes de Agosto 2011



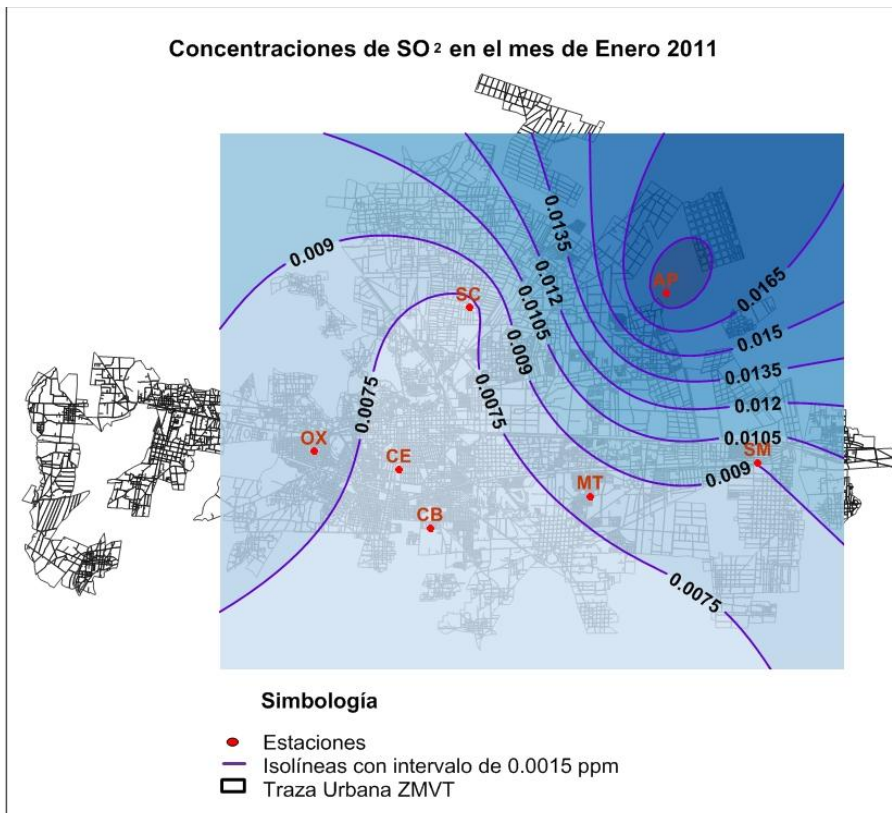
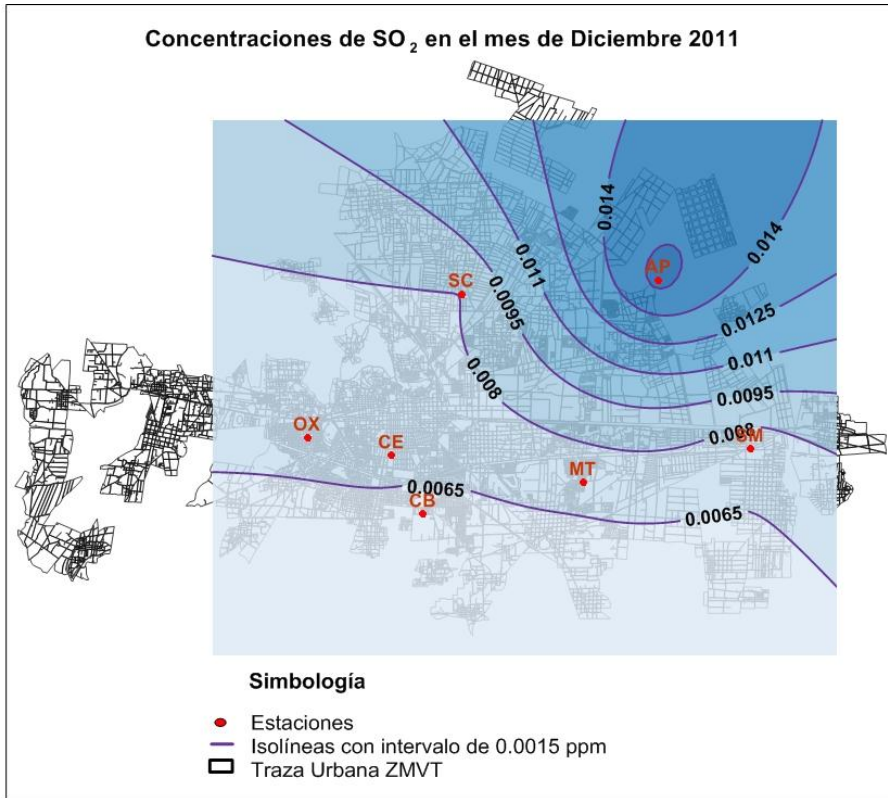
c. Otoño



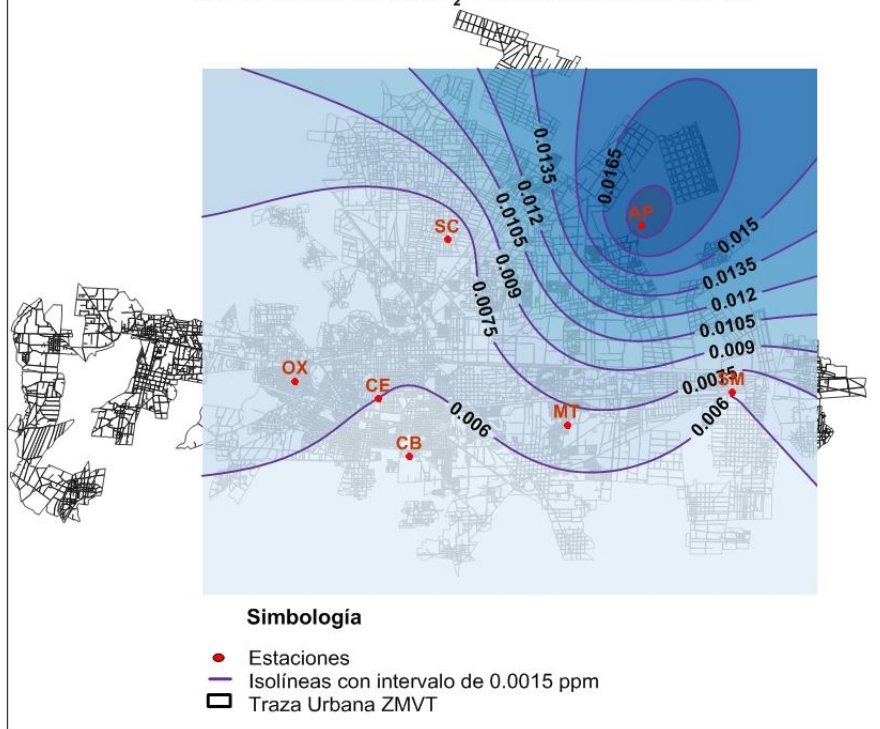
Concentraciones de SO₂ en el mes de Noviembre 2011



d. Invierno



Concentraciones de SO₂ en el mes de Febrero 2011



5.8 Principales problemas de contaminación atmosférica en la ZMVT en el año 2011.

Debido a que los principales problemas de contaminación están relacionados con las concentraciones de ozono y partículas tanto PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el cuadro 5.4 se presentan el número de días por encima de la norma. Se observa que los días que exceden la norma han aumentado en 2011 en comparación con los años anteriores de análisis del INE. En el caso de las $PM_{2.5}$ no se tiene una comparación y a pesar de cumplir con la norma anual, se incumple el límite diario en 39 días lo que indica una señal para poner atención en este contaminante.

Cuadro 5.4 Días por encima de la norma del ozono y partículas

Estaciones	O ₃	PM _{2.5}	PM ₁₀
OX	0	1	9
CE	2	1	9
MT	7	4	18
CB	2	1	19
SM	0	7	52
AP	0	13	56
SC	5	36	163
TOTAL ZMVT	12 días	39 días	177 días

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos diaria de los contaminantes.

En lo que respecta al comportamiento durante la semana (ver cuadro 5.5) y durante el día (ver cuadro 5.6) se rompen los patrones de los periodos de estudios de la INE en donde se observaba una mayor concentración de lunes a viernes en el O₃ y en las PM_{10} . En 2011 el O₃ tienen concentraciones elevadas durante toda la semana en la mayoría de las estaciones. Y en el caso de las $PM_{2.5}$ no se tienen datos anteriores pero se observan las concentraciones elevadas de lunes a sábado. Las PM_{10} mantienen el mismo comportamiento.

Cuadro 5.5 Comportamiento del ozono y partículas durante la semana

		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
O ₃	OX			+	+	+	-	-
	CE	+	+	+	+	+	-	-
	MT	+	+	+	+	+	+	+
	CB	+	+	+	+	+	+	+
	SM	+	+	+	+	+	+	+
	AP	+	+	+	+	+	+	+
	SC	+	+	+	+	+	+	+
PM _{2.5}	OX	+	+	+	+	+	+	-
	CE	+	+	+	+	+	+	-
	MT	+						-
	CB	+	+					-
	SM	+	+					-
	AP	+	+	+	+	+	+	-
	SC	+	+	+	+	+	+	-
PM ₁₀	OX					+	-	-
	CE		+	+		+	-	-
	MT	+	+	+	+	+	-	-
	CB	+	+	+	+	+	-	-
	SM	+	+	+	+	+	-	-
	AP				+	+	-	-
	SC	+	+	+	+	+	-	-

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos diaria de los contaminantes.

-	Menores concentraciones
+	Mayores concentraciones
	Celdas con valores estándares

En cuanto al comportamiento durante el día el O₃ mantiene concentraciones elevadas de las 12 a las 19 horas en casi todas las estaciones y anteriormente se mantenían concentraciones elevadas de 12 a 16 horas correspondientes a las horas con mayor temperatura y radiación. Las PM₁₀ presentan tres momentos de concentraciones altas de 8 a 12 (las más elevadas) de 17 a 19 y de 22 a 24 horas, estos valores rompen con las típicas concentraciones bimodales de los estudios del INE. Nuevamente en las PM_{2.5} no hay un punto de comparación y el comportamiento que presentan es bimodal con valores más elevados de 7 a 13 y menos elevados de 20 a 24 horas (ver cuadro 5.6).

Cuadro 5.6 Comportamiento del ozono y partículas durante el día

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
O ₃	OX	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-			
	CE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-		
	MT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-		
	CB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-		
	SM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-		
	AP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-		
	SC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-		
PM _{2.5}	OX	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+			
	CE	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+		
	MT	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+		
	CB	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+		
	SM	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+		
	AP	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+		
	SC	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+		
PM ₁₀	OX	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+		
	CE	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+	
	MT	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+	
	CB	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+
	SM	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+
	AP	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+
	SC	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos diaria de los contaminantes.

-	Menores concentraciones
+	Mayores concentraciones
+	Concentraciones elevadas

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

El objetivo general de este trabajo “Representar la distribución espacial de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la ZMVT en el año 2011” se cumplió. Para realizarlo se necesitó en primer lugar todas las bases de datos diarias y horarias de las mediciones de los 6 contaminantes criterios (PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , CO , NO_2 , SO_2) en el periodo 1994 a 2013. Se seleccionó el año 2011 por ser el año que mayor porcentaje de datos que al mismo tiempo coincidió con el año en que todos los contaminantes, incluido el $PM_{2.5}$, eran medidos. Como se explicó en la metodología interpolando el promedio anual de cada contaminante criterio en cada estación para crear los mapas de distribución y en los que se puede observar en toda el área de influencia (de 6 km de cada estación) la situación de la contaminación, la estación que presenta mayores concentraciones (San Cristóbal en casi todos los casos) y las diferencias en cada mes del año. Estos mapas nos permiten tener un panorama general de la ZMVT y no solo de los puntos de las estaciones.

Para lograr el objetivo general se desarrollaron los objetivos específicos de: 1) “Describir la situación histórica de la calidad del aire en la ZMVT de 1994 a 2009.” Este objetivo se cumplió con base en los estudios realizados por el INE y la SEMARNAT en varios periodos de estudios publicados en su respectivo almanaque descritos con anterioridad, esta información nos permite comparar la situación de la contaminación en el año 2011 con años anteriores, gracias a esto se observó el comportamiento atípico de los contaminantes con más problemas de la ZMVT (O_3 , PM_{10}) tanto en el comportamiento durante el año, días de la semana y horas del día.

2) “Recopilar, depurar y sintetizar las bases de datos históricas para seleccionar el año de estudio con base a la disponibilidad temporal y espacial de datos”. Este fue un paso esencial para desarrollar el trabajo de investigación ya que se concentró

en una tabla los porcentajes de datos disponibles en cada de año de estudio de 1994 al 2013, para esto se utilizaron las bases de datos horarias de cada contaminantes, las cuales contienen datos ya analizados por la RAMA (de los medidos cada minuto por cada contaminante). Con base en esta tabla se seleccionó el año 2011 por ser el año que cumple con la suficiencia de datos de al menos 75% de los datos para ser analizados.

3) “Delimitar el área de estudio a partir del radio de influencia de las estaciones de monitoreo y generar la interpolaciones por contaminante”. Como se ha mencionado el radio de influencia máximo de las estaciones de monitoreo es de 6km (de acuerdo con información proporcionada por la RAMA), se trazaron las circunferencias pertinentes alrededor de las estaciones y se tomaron los puntos límites máximos y mínimos de X y Y dentro del área, y sobreponiendo un mapa con el área urbana de los municipios correspondientes de la ZMVT, se obtuvo el área de estudio. Cabe destacar que solo 3 (Toluca, Metepec y San Mateo) de los 14 municipios que integran la ZMVT están incluidos en su totalidad de esta área de estudio lo que significa que el 80% de la extensión de la ZMVT no tiene monitoreo y se necesita rediseñar la distribución de las estaciones o aumentar el número de estas.

4) “Evaluar el cumplimiento de la norma por estación de monitoreo y de manera general a la ZMVT por contaminante”. Este punto es primordial para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la ZMVT ya que no es suficiente conocer su distribución, sino también saber si los datos proporcionados por la RAMA en cada estación y en cada contaminante cumplen con las normas que nos indican las concentraciones máximas diarias y anuales de cada contaminante, esta información se aborda más detalladamente en el capítulo de análisis de resultados pero de manera general se observa que se incumplen la normas del O_3 y PM_{10} anual y la norma diaria de las $PM_{2.5}$.

En cuanto a la hipótesis planteada: “La interpolación por el método geo estadístico Kriging de los valores de los contaminantes criterio permitirá conocer su concentración y distribución espacial en un área dentro de la zona de influencia de las estaciones de monitoreo de la ZMVT en el año 2011” fue validada. El kriging por medio del programa Surfer 10, me permitió generar los 72 mapas de cada contaminante por mes. Las interpolaciones nos permiten conocer el valor de los contaminantes en cada punto dentro del área de estudio, esta información es de gran interés para toda la población que realiza sus actividades diarias en esta zona. El programa nos permite realizar una edición en donde las tonalidades del azul nos permite interpretar fácilmente la situación del contaminante (los fuertes nos indican mayores concentraciones y los claros menores concentraciones) y además comparar los meses de estudio observando los meses con concentraciones elevadas y con bajas concentraciones.

Como ya se mencionó en la ZMVT los niveles de PM_{10} representan el problema más serio: los promedios anuales son los más elevados de la región centro del país, registrando una tendencia creciente en los últimos años y con 177 días por arriba del valor de norma horaria en 2011 aumentando en comparación con los 173 días en 2005. Sin estudios previos no puede haber una comparación para $PM_{2.5}$ que en 2011 tuvo 39 días por encima de la norma horaria. En esta zona metropolitana también se rebasaron las normas diaria y anual para O_3 con 12 días por encima de la norma durante el año de estudio. Según el inventario de emisiones de la ZMVT (SE-GEM, 2004), estas emisiones se originan en las fuentes erosivas (60%) y los campos agrícolas, aunque sabemos que las emisiones de vehículos automotores que utilizan diesel también pueden contribuir fuertemente, sobre todo a la fracción fina ($PM_{2.5}$) de las PM_{10} . En cuanto a las fuentes de emisión de los precursores de O_3 , los HC y NOX, los vehículos automotores aportaron un 69% y un 81%, respectivamente, siendo los autos particulares y las pick-up los vehículos que más contribuyen en el sector transporte (INE, 2011).

Como parte de la gestión de la calidad del aire, es primordial continuar midiendo, analizando y reportando los niveles de los contaminantes atmosféricos. Además se hace necesario lograr que la red de monitoreo genere información con la calidad y la cantidad necesarias, de acuerdo con los criterios de suficiencia para evaluar el cumplimiento con las normas de calidad del aire (75% de los días del año).

La red de monitoreo de la ZMVT tiene un desempeño considerado mínimo aceptable (INE, 2011) las áreas de oportunidad más importantes se detectaron con respecto a la baja frecuencia o la ausencia de las auditorías, el bajo porcentaje de aprobación de los equipos de medición (particularmente de PM_{10} y NO_2) en las auditorías que sí se realizaron, la baja trazabilidad de los equipos de calibración y el bajo porcentaje de datos válidos (particularmente de PM_{10} y ozono). En contraste, cuenta con buenos procedimientos de validación y la difusión de la información producida es adecuada.

De acuerdo con el INE es indispensable caracterizar, evaluar y reportar la representatividad de las estaciones de monitoreo, lo que permitiría una mejor y más adecuada interpretación de los indicadores de calidad del aire. En este sentido, con el objeto de obtener datos representativos de las condiciones urbanas, se debe cumplir con una serie de criterios de ubicación del sitio y de toma de muestras, tales como la altura y la distancia mínima de la estación a las carreteras o avenidas con flujo vehicular intenso, la vegetación y otras fuentes menores, que puedan causar interferencias o sesgar las mediciones de los contaminantes. Así, dado el dinamismo del crecimiento urbano e industrial, es necesario evaluar y adecuar los sistemas de monitoreo, llevando a cabo revisiones periódicas de la representatividad de las estaciones de acuerdo con su entorno y con los objetivos específicos de las redes de monitoreo atmosférico, definidos por las autoridades ambientales. En el caso de la ZMVT el diseño de las estaciones ha sido el mismo desde 1994 que se instalaron las estaciones de monitoreo, el único cambio reciente ocurrió en 2010 cuando la estación San Lorenzo se reubicó y se

colocó en Ceboruco justificado por el muestreo inadecuado a falta de espacio libre alrededor de la estación.

Durante el periodo de funcionamiento entre 1994 – 2014 no se han instalado más estaciones de monitoreo, a pesar de que en los últimos años la superficie de la ZMVT ha aumentado, en los primeros años de monitoreo estaba conformada por cinco municipios (Lerma, Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec) con una extensión territorial de 1 035.8 km² y en la actualidad son 14 municipios los que la integran con una extensión de 2 038 km² ; a pesar de que la extensión prácticamente se duplico no se han aumentado el número de estaciones de la red, la falta de estaciones se puede confirmar en los mapas de distribución realizados en el presente trabajo donde se observa que los municipios que abarca el radio de análisis de las estaciones solo incluye a los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco y Lerma.

El cumplimiento y el desarrollo de las actividades mencionadas en los párrafos anteriores se encuentran estrechamente relacionados con la disponibilidad de recursos económicos y humanos de la red de monitoreo atmosférico de la ZMVT. La falta de recursos económicos imposibilita la adquisición de refacciones, consumibles, equipo auxiliar, pago de servicios, contratación de personal técnico para las tareas de campo (por ejemplo, operación, mantenimiento y calibración de equipos), supervisión, control de calidad, manejo de la información y evaluación periódica de la representatividad de las estaciones que conforman la red de monitoreo. En este sentido es muy importante que el gobierno local y estatal asignen los recursos necesarios, tanto financieros como humanos.

Para varios de los contaminantes atmosféricos no se ha encontrado un umbral para algunos efectos finales en la salud. Por lo tanto, la tendencia internacional, e incluso de la Organización Mundial de la Salud, ha sido generar normas o guías de calidad del aire más estrictas para establecer niveles de riesgo sumamente bajos y tener mayor certidumbre de que se protege a la población (WHO, 2006). Aunque en México la Secretaría de Salud ha actualizado en años recientes las normas para O₃ y PM, es importante evaluar los riesgos que los niveles

establecidos en dichas normas representan para la población mexicana y tratar de homogeneizarlas con las normas y guías internacionales las cuales manejan valores más estrictos para todos los contaminantes.

La revisión de las normas vigentes de la calidad del aire reveló que, particularmente en lo que respecta al bióxido de nitrógeno y al bióxido de azufre, la normatividad mexicana establece límites de contaminantes en el aire que están muy por encima de lo que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS) como límites máximos permisibles, que corresponden a los valores que deberían estar vigentes. En los casos de las partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y el ozono, la normatividad mexicana está también rezagada, pero con respecto a los límites más estrictos recomendados por la OMS como valores guía para proteger la salud de la población, que representan objetivos a mediano y largo plazos (ver anexo 1).

Al mismo tiempo, sin embargo, se requiere evaluar las posibilidades reales que tienen las ciudades para cumplir con las normas de calidad del aire y, en caso necesario, establecer metas intermedias que permitan alcanzar paulatinamente las metas de mediano y largo plazo. La clave en la elaboración de normas de calidad del aire en muchos países es acompañarlas con programas que aseguren su cumplimiento, que incluyen incentivos y sanciones, así como esquemas de evaluación de desempeño.

La calidad del aire no tiene la atención necesaria por parte de los tomadores de decisiones ni de la población general. Una forma de recuperar y mantener el interés político y del público es mediante la educación y comunicando los niveles de contaminación y los riesgos asociados para la salud humana. Actualmente, pocas ciudades reportan de manera pública sus niveles de contaminación, a pesar de que la ZMVT tiene una página actualizada de los niveles de contaminación y la calidad del aire, tener una página interactiva donde se puedan encontrar imágenes actualizadas de la distribución de los contaminantes y los valores que tiene cada colonia despertaría el interés de la población e incluso la difusión podría incluir un espacio en las noticias locales y su publicación en periódicos e incluso innovar con aplicaciones y redes sociales.

El análisis realizado en esta investigación pone en evidencia la necesidad de continuar en la lucha para mejorar la calidad del aire en la ZMVT, mediante la inversión en programas y estrategias para asegurar el cumplimiento de las normas que tenemos en el país; el desarrollo de programas y estrategias de comunicación de riesgos de la contaminación atmosférica; así como, el establecimiento de mecanismos regulatorios para el control más estricto de las emisiones vehiculares y de fuentes fijas.

Los inventarios de emisiones desarrollados en las diferentes ciudades han identificado que la principal fuente de contaminación para la mayoría de las ciudades es el sector transporte (INE, 2011). Aunque se ha logrado actualizar las normas para regular las emisiones de vehículos ligeros a gasolina y diesel (NOM-042) y la calidad de los combustibles vehiculares (NOM-086), la estimación de que la flota vehicular en el país se duplicará en 15 años obliga a desarrollar e instrumentar una estrategia integral para reducir las emisiones vehiculares. En ésta se deberá contar con estándares más estrictos de emisiones para vehículos nuevos en planta; controlar más eficientemente las emisiones de los vehículos en circulación, para lo cual se pueden instrumentar programas de verificación vehicular; acelerar la renovación de la flota, y evitar la comercialización de vehículos importados con tecnologías caducas que no cuentan con sistemas para el control de emisiones y emiten grandes volúmenes de contaminantes a la atmósfera; y, también, desarrollar programas para proveer de un sistema de transporte público de alta capacidad, eficiente, poco contaminante, seguro y accesible, además de promover el uso de transporte no motorizado (como caminar y andar en bicicleta) para minimizar el uso de autos privados y reducir sus emisiones.

El control de las emisiones de fuentes fijas siempre ha sido una de las prioridades en la gestión de la calidad del aire, las emisiones de las plantas de generación de electricidad, industrias, refinerías, etcétera, han afectado significativamente la calidad del aire. La necesidad de controlar las emisiones de fuentes puntuales se ha exacerbado con las evidencias internacionales y nacionales sobre sus posibles

efectos en la salud de las poblaciones circunvecinas (Levy et al., 2002). La reducción de emisiones de fuentes fijas puede lograrse continuando con los esfuerzos para mejorar la calidad de los combustibles industriales, promover el uso de combustibles más limpios, así como optimizar los procesos de operación y el control de emisiones. Estas medidas deben ir a la par del desarrollo de herramientas para dar a conocer al público la calidad del aire en zonas industriales y su influencia en las ciudades aledañas, por constituir un avance para proteger la salud de la población.

El monitoreo atmosférico de los contaminantes del aire es, junto con los inventarios de emisiones, una herramienta fundamental para proteger a la población de los impactos negativos de la contaminación atmosférica. En la medida en que estos instrumentos estén actualizados y proporcionen información confiable, la gestión de la calidad del aire se hará de manera más costo-efectiva, y se aprovecharán mejor los recursos humanos, tecnológicos y económicos disponibles para mejorar la calidad del aire en el país.

En la medida en que la información sobre la calidad del aire se ponga a disposición del público, del sector privado y de las autoridades ambientales, la sociedad en su conjunto podrá, en principio, tomar conciencia sobre los problemas de contaminación atmosférica de su localidad y, por ende, proponer y participar activamente en las acciones para mejorarla. El primer paso para aspirar a reducir los miles de casos de mortalidad y morbilidad que ocasiona la contaminación atmosférica en nuestro país cada año es conocer y dar a conocer el estado que guarda el aire. La instrumentación de las recomendaciones que se plantean en los párrafos anteriores muy probablemente demandará incrementar los recursos humanos, tecnológicos y monetarios destinados a la gestión de la calidad del aire y a la operación de las redes de monitoreo. En el entorno económico actual, estos recursos serán inaccesibles a menos que esta información se comunique adecuadamente a la población, a los investigadores, a las autoridades ambientales y de salud de los tres órdenes de gobierno. Respirar una calidad del aire adecuada debe convertirse en una prioridad de salud pública nacional.

ANEXOS

Anexo 1 Normatividad

Anexo 1.1 Resumen de los valores límite permisibles de los contaminantes criterio en algunos países y organizaciones del mundo 2006.

Contaminante	Tiempo promedio	Unidades	OMS	UE	EUA	México
PM₁₀	1 año	µg/m ³	20	40	50	50
	24 horas	µg/m ³	50	50	150	120
PM_{2.5}	1 año	µg/m ³	10	25	15	15
	24 horas	µg/m ³	25	40	65	65
O₃	8 horas	µg/m ³	100	120	157	157
	1 hora	ppm µg/m ³	0.05	0.06	0.08	0.08 216
CO	8 horas	µg/m ³		10	10	13
		ppm		9	9	11
	1 hora	µg/m ³ ppm		40 35		
SO₂	1 año	µg/m ³			78	
		ppm			0.03	0.03
	24 horas	µg/m ³	20	125	366	341
	3 horas	ppm µg/m ³	0.007	0.047	0.14 1300	0.13
	10 minutos	ppm µg/m ³	500 0.19		0.5	
NO₂	1 año	µg/m ³	40	40	100	
		ppm	0.021	0.021	0.05	
	1 hora	µg/m ³ ppm	200 0.1	200 0.1		395 0.21

Fuente: INE (2007)

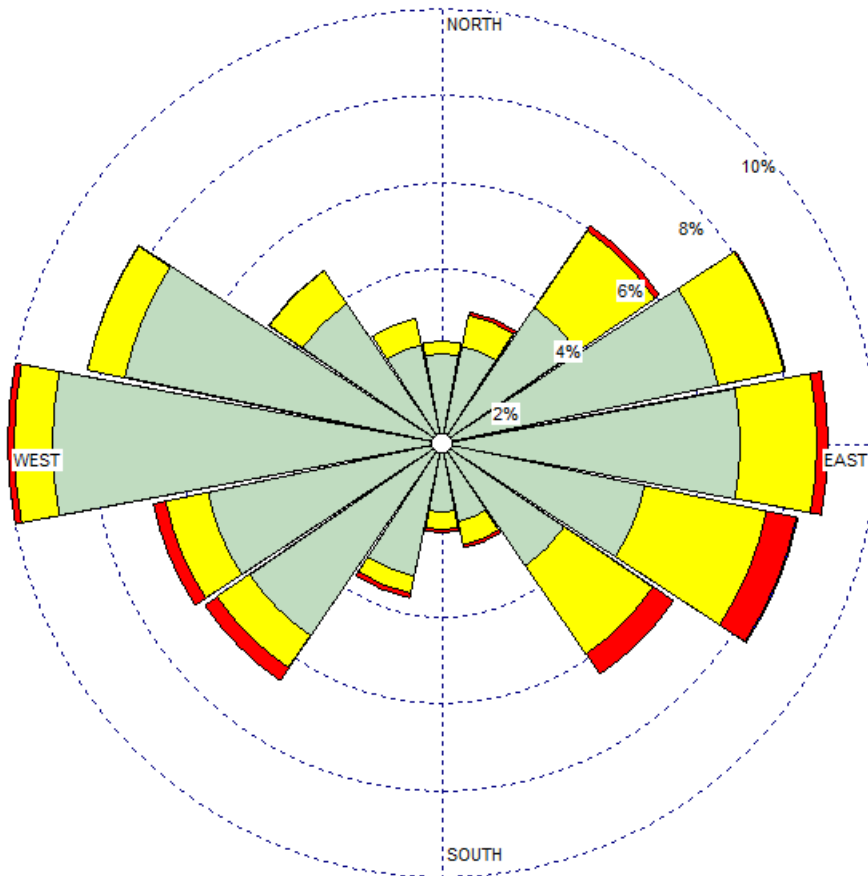
Anexo 1.2 Comparación de los Criterios de Calidad del Aire de México y la OMS (vigentes en el año 2011).

Contaminante	Norma	Año	Tiempo promedio	Criterio México	Criterio OMS
PM₁₀	NOM 025	2005	24 h	120 µg/m ³	50 µg/m ³
PM_{2.5}	NOM 025	2005	24 h	65 µg/m ³	25 µg/m ³
O₃	NOM 020	2002	8h	150 µg/m ³ 0.08 ppm	100 µg/m ³ 0.05 ppm
CO	NOM 021	1994	1 h 24 h	0.11 ppm 12.6 µg/m ³ 11 ppm	10 µg/m ³ 8.73 ppm
SO₂	NOM 022	1994	24 h	288 µg/m ³ 0.11 ppm	20 µg/m ³
NO₂	NOM 023	2010	1 h	395 µg/m ³ 0.21 ppm	200 µg/m ³

Fuente: IMCO (2012).

Anexo 2 Rosas de los vientos por estación de monitoreo para el año 2011

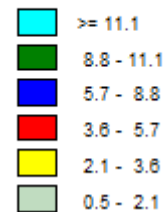
Anexo 2.1 Rosa de los vientos de la estación Oxtotitlán para el año 2011



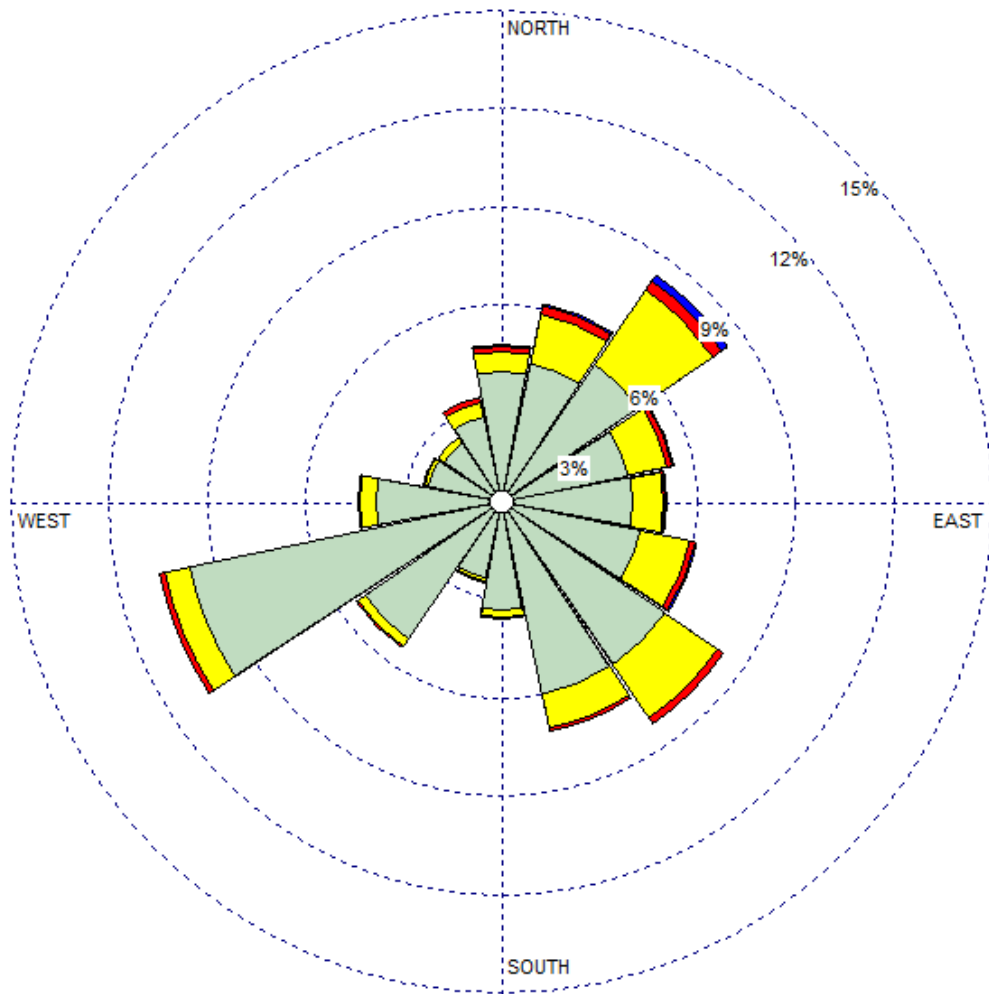
Número total de horas	7320
Velocidad promedio del viento	1.41 m/s
Registros de calma	652
Frecuencia de vientos calmos	8.91%
Disponibilidad de datos	97.10%
Registros incompletos o faltantes	212
Total de registros usados	7108

Velocidad del viento

(m/s)



Anexo 2.2 Rosa de los vientos de la estación Toluca centro para el año 2011

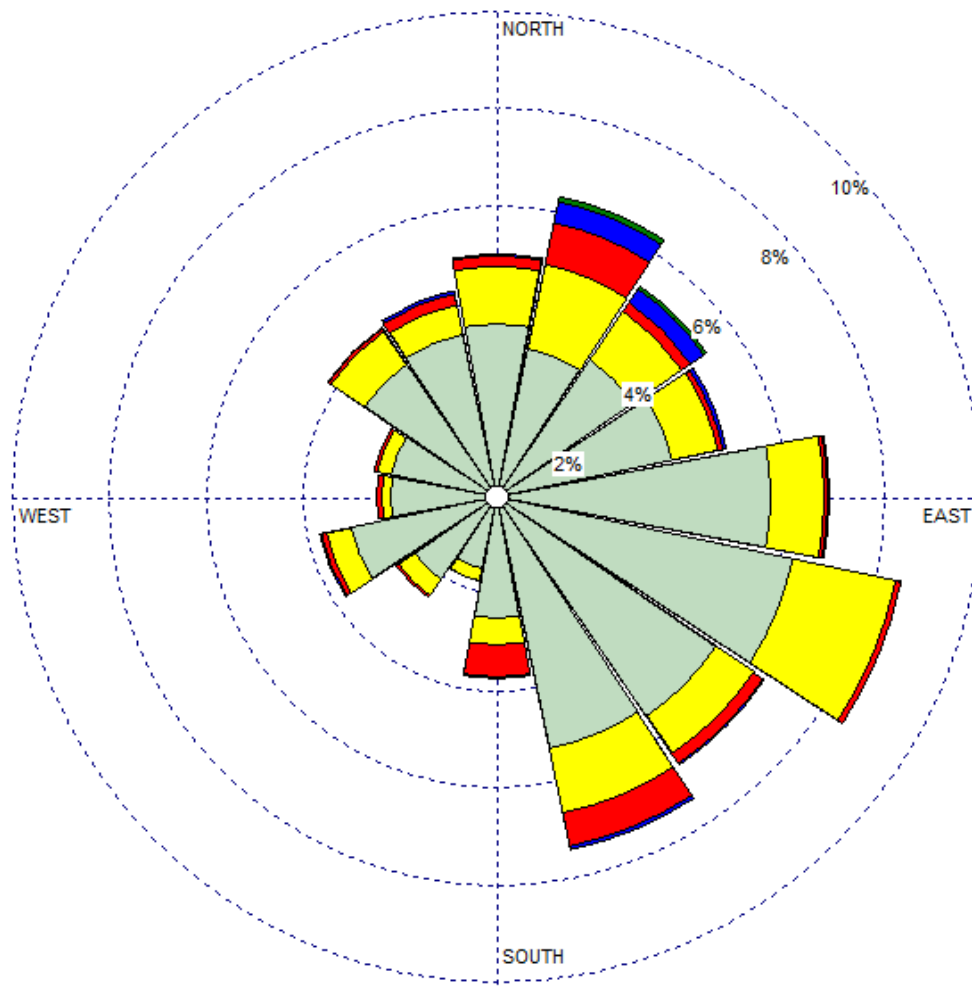


Número total de horas	7320
Velocidad promedio del viento	1.26 m/s
Registros de calma	943
Frecuencia de vientos calmos	12.88%
Disponibilidad de datos	91.35%
Registros incompletos o faltantes	633
Total de registros usados	6687

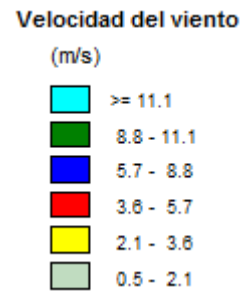
Velocidad del viento (m/s)

■	>= 11.1
■	8.8 - 11.1
■	5.7 - 8.8
■	3.6 - 5.7
■	2.1 - 3.6
■	0.5 - 2.1

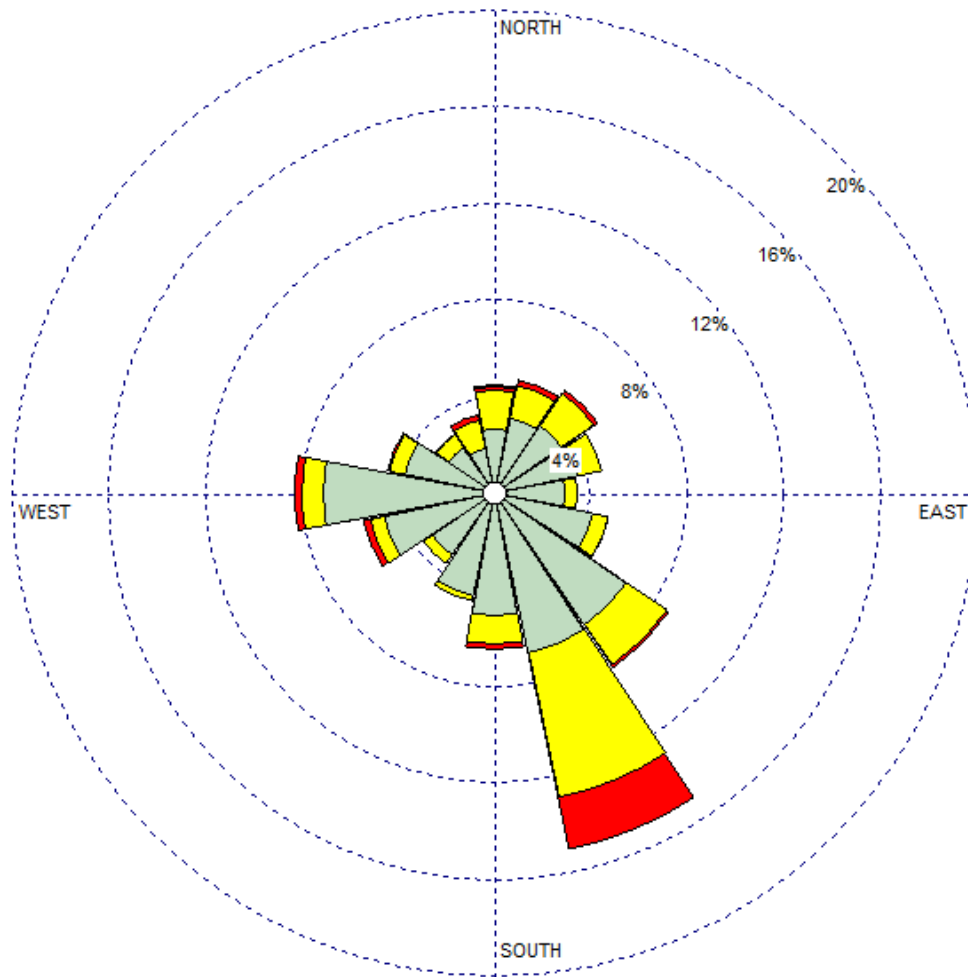
Anexo 2.3 Rosa de los vientos de la estación Metepec para el año 2011



Número total de horas	7320
Velocidad promedio del viento	1.28 m/s
Registros de calma	955
Frecuencia de vientos calmos	13.05%
Disponibilidad de datos	54.92%
Registros incompletos o faltantes	3300
Total de registros usados	4020



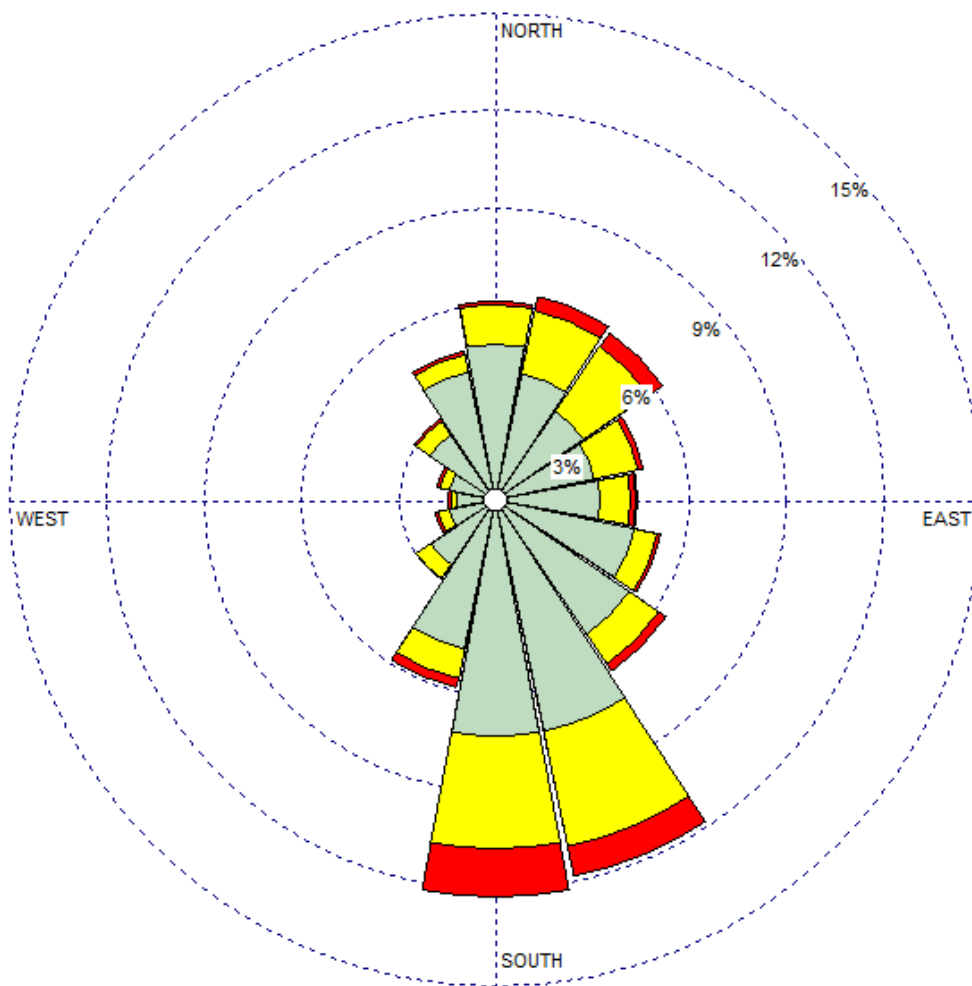
Anexo 2.4 Rosa de los vientos de la estación Ceboruco para el año 2011



Número total de horas	7320
Velocidad promedio del viento	1.45 m/s
Registros de calma	639
Frecuencia de vientos calmos	8.73%
Disponibilidad de datos	90.98%
Registros incompletos o faltantes	660
Total de registros usados	6660

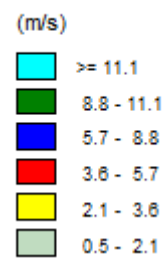


Anexo 2.5 Rosa de los vientos de la estación San Mateo Atenco para el año 2011

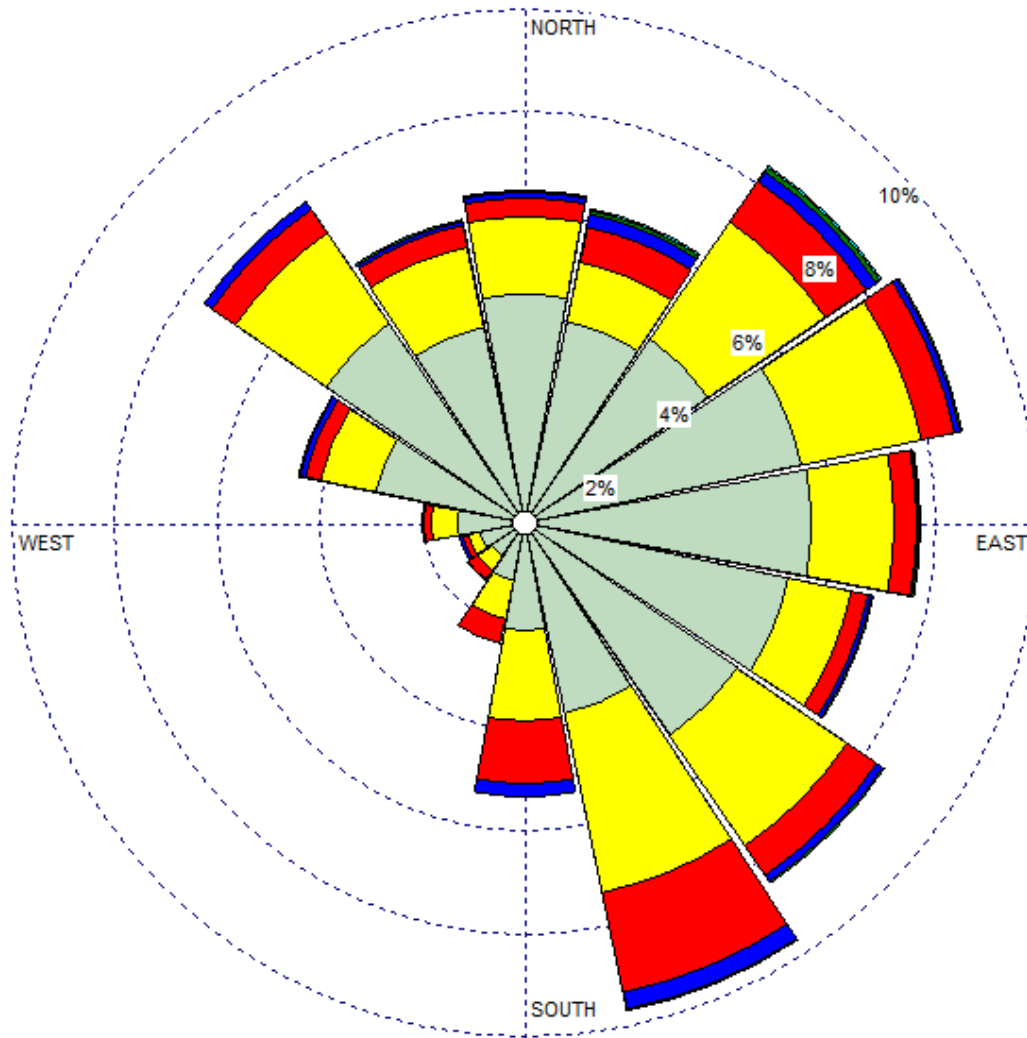


Número total de horas	7320
Velocidad promedio del viento	1.39 m/s
Registros de calma	851
Frecuencia de vientos calmos	11.63%
Disponibilidad de datos	78.57%
Registros incompletos o faltantes	1569
Total de registros usados	5751

Velocidad del viento

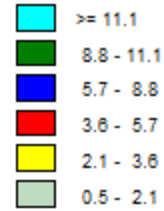


Anexo 2.6 Rosa de los vientos de la estación Aeropuerto para el año 2011

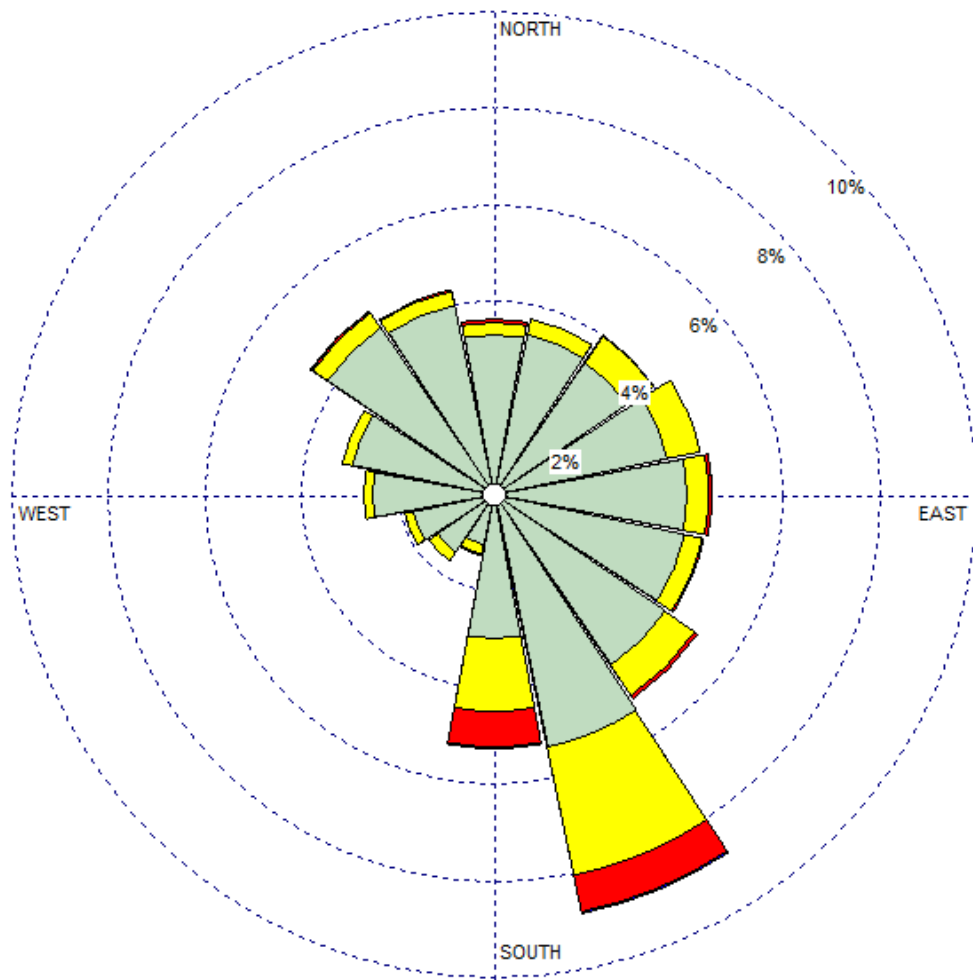


Número total de horas	7320
Velocidad promedio del viento	1.97 m/s
Registros de calma	509
Frecuencia de vientos calmos	6.95%
Disponibilidad de datos	98.74%
Registros incompletos o faltantes	92
Total de registros usados	7228

Velocidad del viento
(m/s)

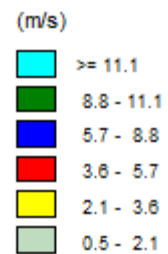


Anexo 2.7 Rosa de los vientos de la estación San Cristóbal Huichochitlán para el año 2011



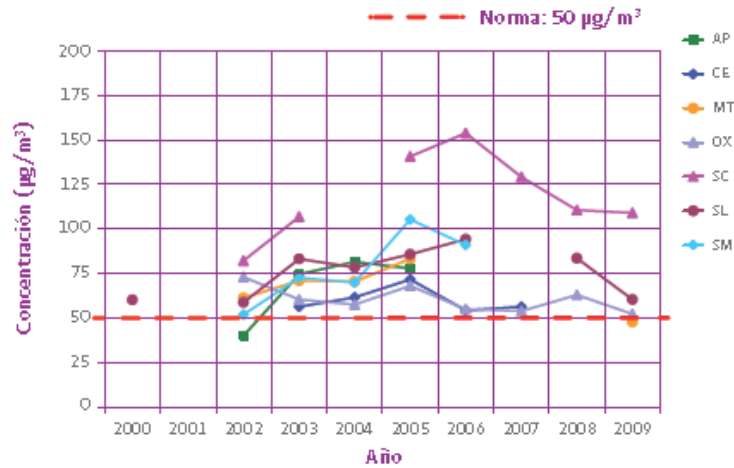
Número total de horas	7320
Velocidad promedio del viento	0.87 m/s
Registros de calma	2507
Frecuencia de vientos calmos	35.25%
Disponibilidad de datos	93.81%
Registros incompletos o faltantes	453
Total de registros usados	6867

Velocidad del viento



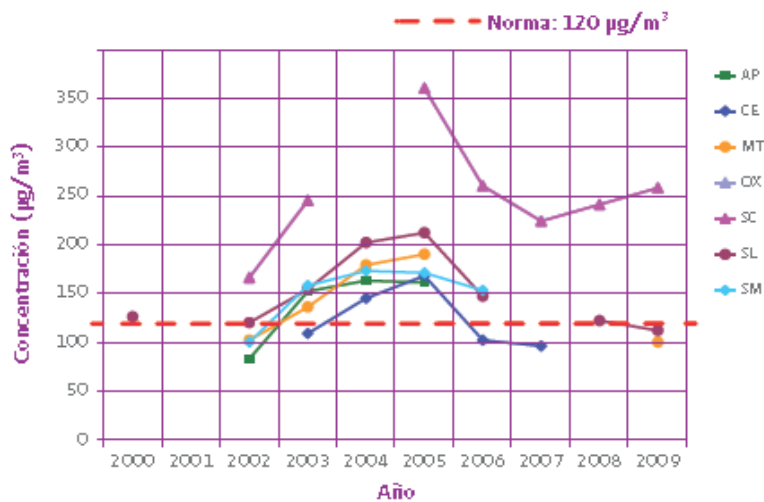
Anexo 3 Graficas de resultados de la evaluación realizada por el INE en el periodo 2000 – 2009 en la ZMVT

Anexo 3.1 Límite anual del promedio anual de los promedios de 24h de PM₁₀ por estación de la ZMVT 2000 – 2009.



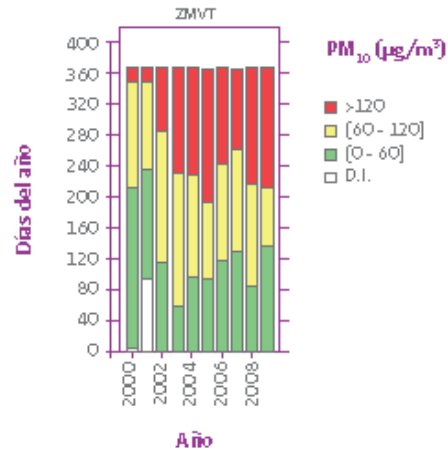
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.2 Límite de 24 horas utilizando el percentil 98 de los promedios de 24 h de PM₁₀ por estación en la ZMVT 2000 – 2009



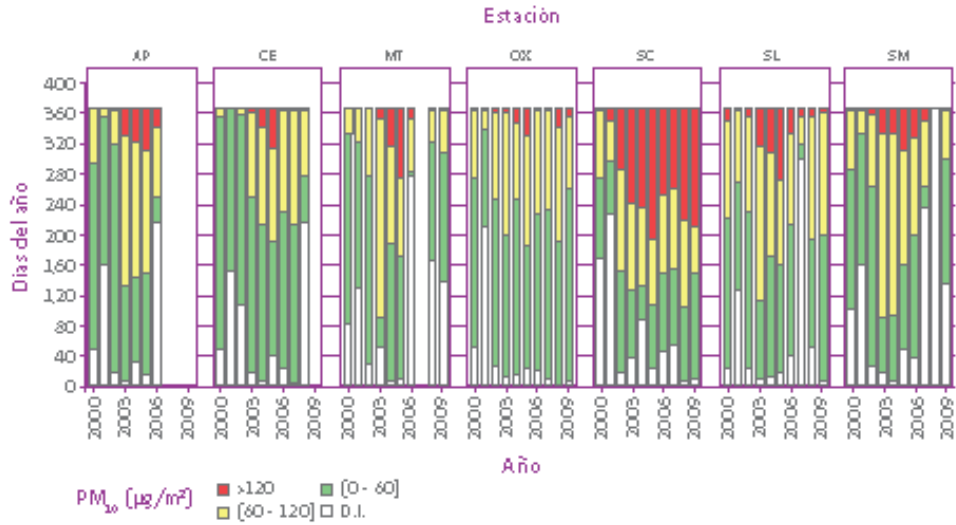
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.3 Calidad del aire buena, mala y regular de la ZMVT por PM₁₀ 2000 – 2009



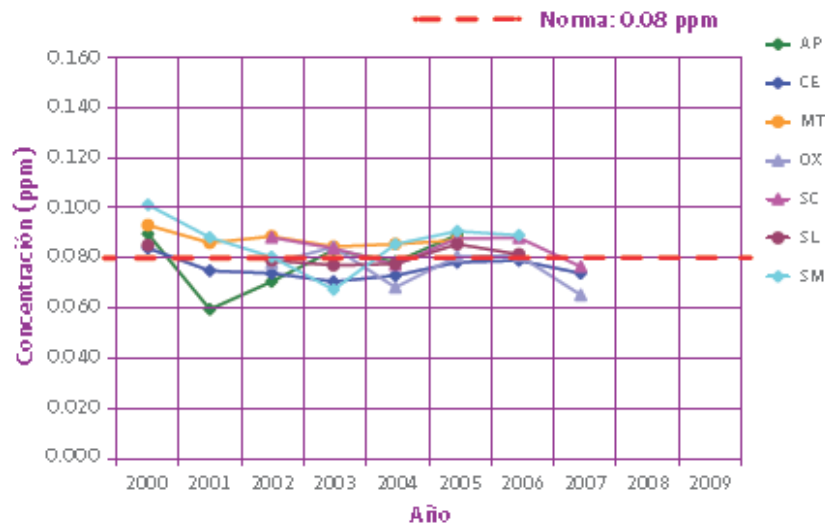
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.4 Calidad del aire buena, mala y regular por estación de la ZMVT de PM₁₀ 2000 - 2009



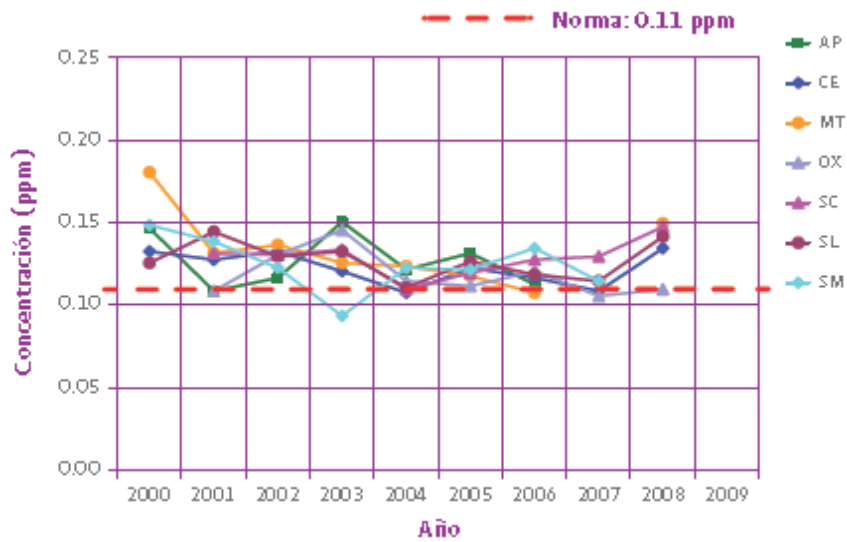
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.5 Límite anual utilizando el quinto máximo de las concentraciones diarias de los promedios móviles de 8 h de O₃ por estación en la ZMVT 2000 – 2009



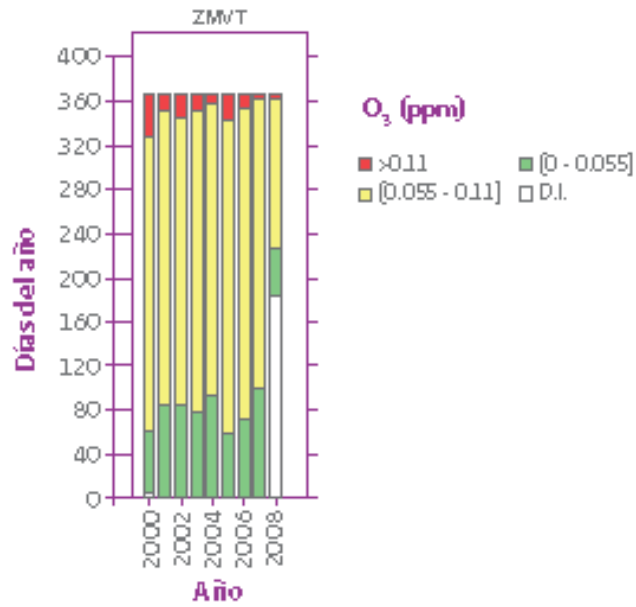
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.6 Límite horario utilizando el máximo horario de O₃ por estación en la ZMVT 2000 - 2009



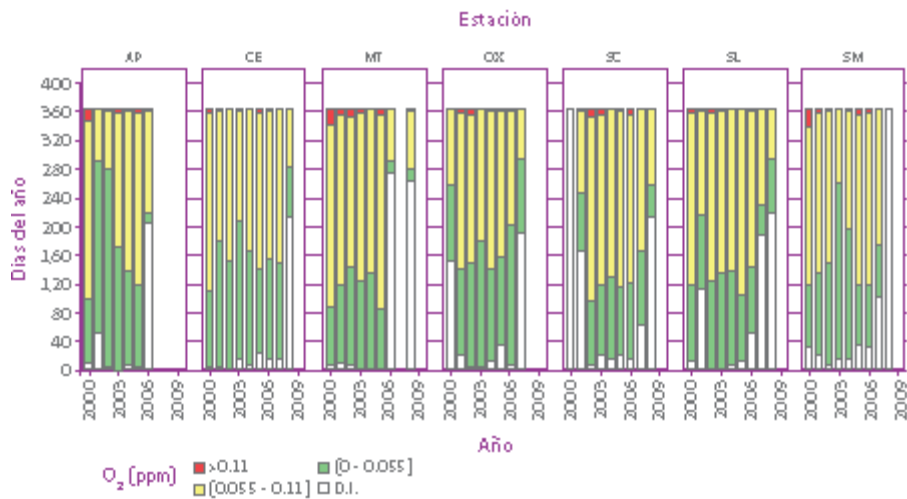
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.7 Calidad del aire buena, regular y mala de los máximos diarios de una hora de O3 en la ZMVT 2000 - 2009



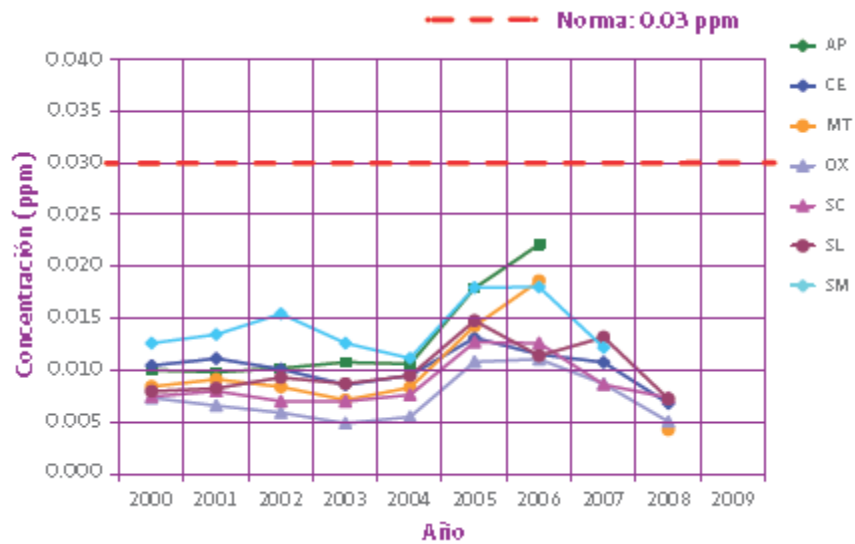
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.8 Calidad del aire buena, regular y mala de los máximos diarios de una hora de O3 por estación en la ZMVT 2000 - 2009



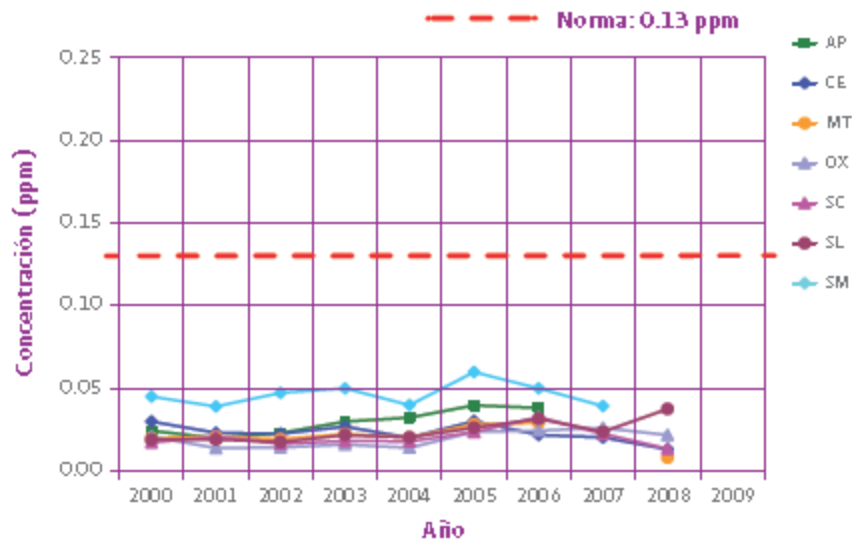
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.9 Límite anual utilizando el promedio anual de las concentraciones horarias de SO₂ por estación en la ZMVT 2000 – 2009



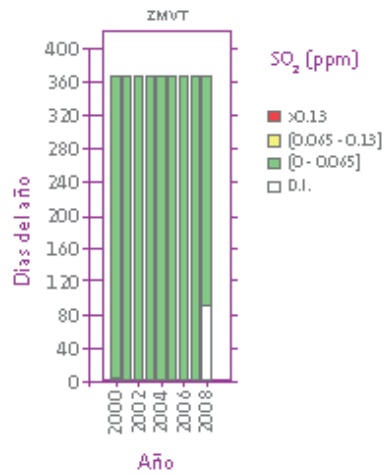
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.10 Límite 24 horas utilizando el segundo máximo de los promedios de 24 h de SO₂ por estación en la ZMVT 2000 – 2009



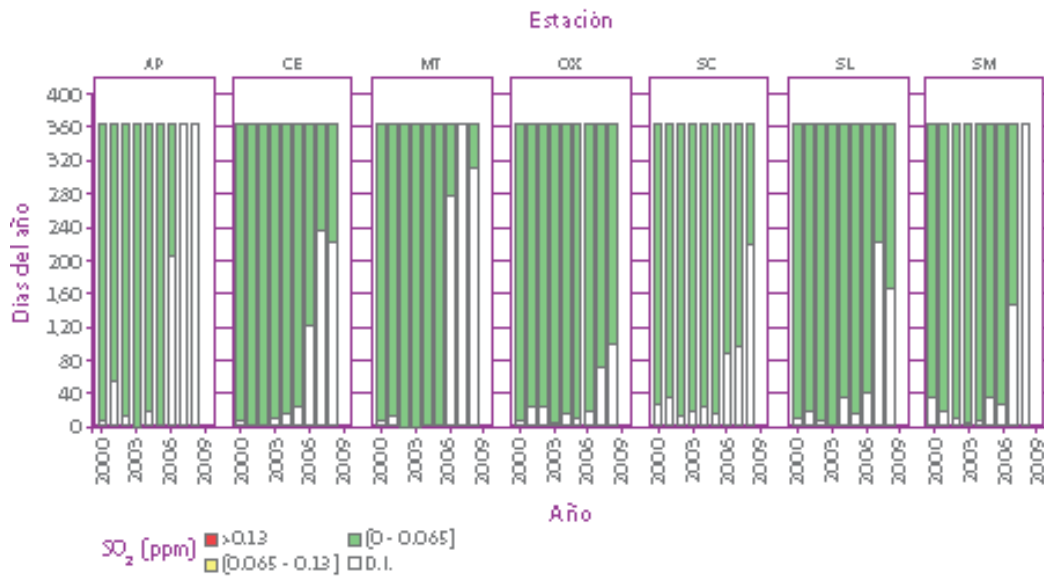
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.11 Calidad del aire buena, regular y mala de los promedios de 24 h de SO₂ de la ZMVT 2000 – 2009



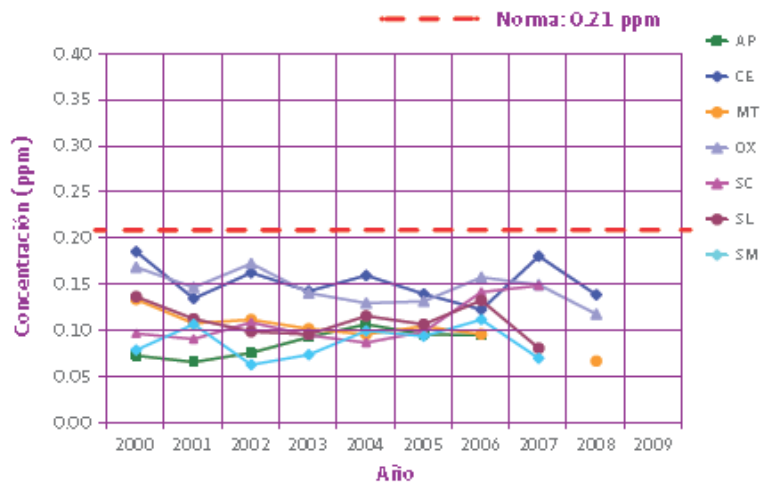
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.12 Calidad del aire buena, regular y mala de los promedios de 24 h de SO₂ por estación de la ZMVT 2000 – 2009



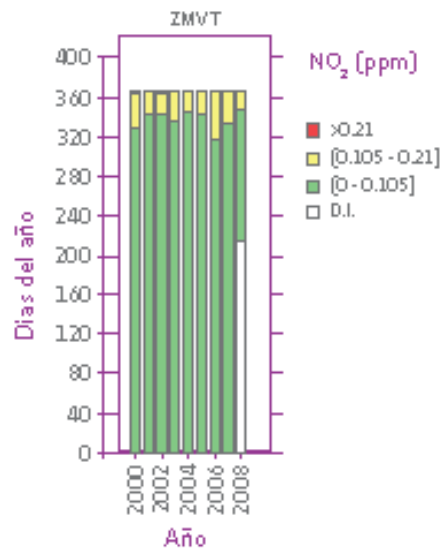
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.13 Limite horario utilizando el segundo máximo horario de NO₂ por estación en la ZMVT 2000 – 2009



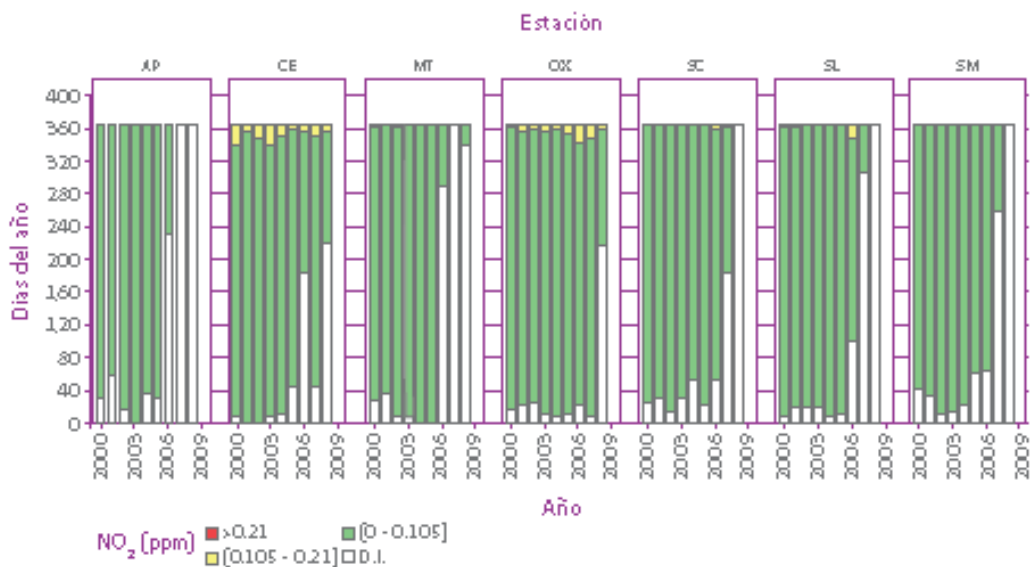
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.14 Calidad buena, regular y mala utilizando en los máximos diarios de NO₂ en la ZMVT 2000 – 2009



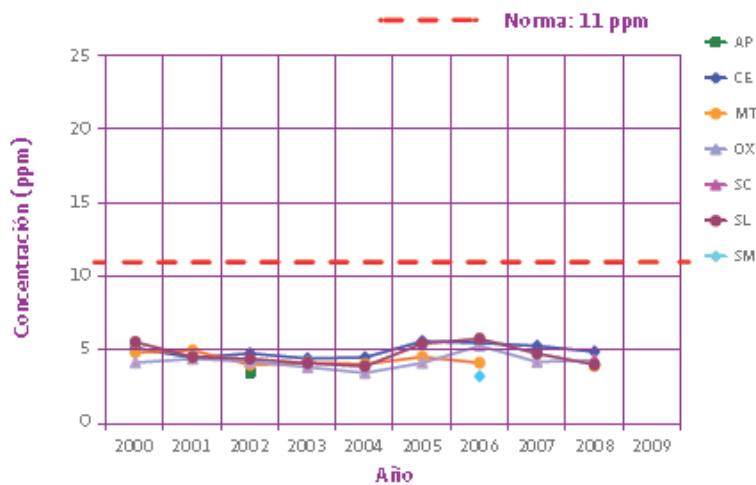
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.15 Calidad buena, regular y mala utilizando en los máximos diarios de NO₂ por estación en la ZMVT 2000 – 2009



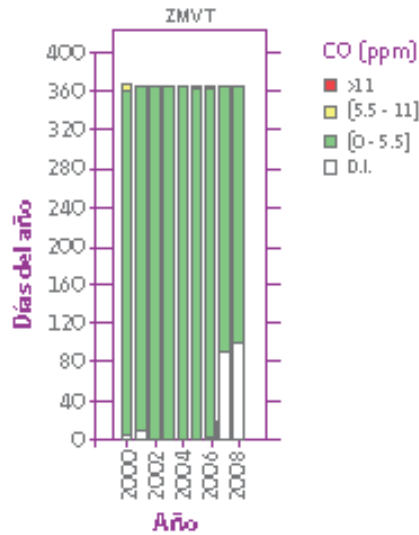
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.16 Limite horario utilizando el segundo máximo del promedio móvil de 8h de CO por estación en la ZMVT 2000 – 2009



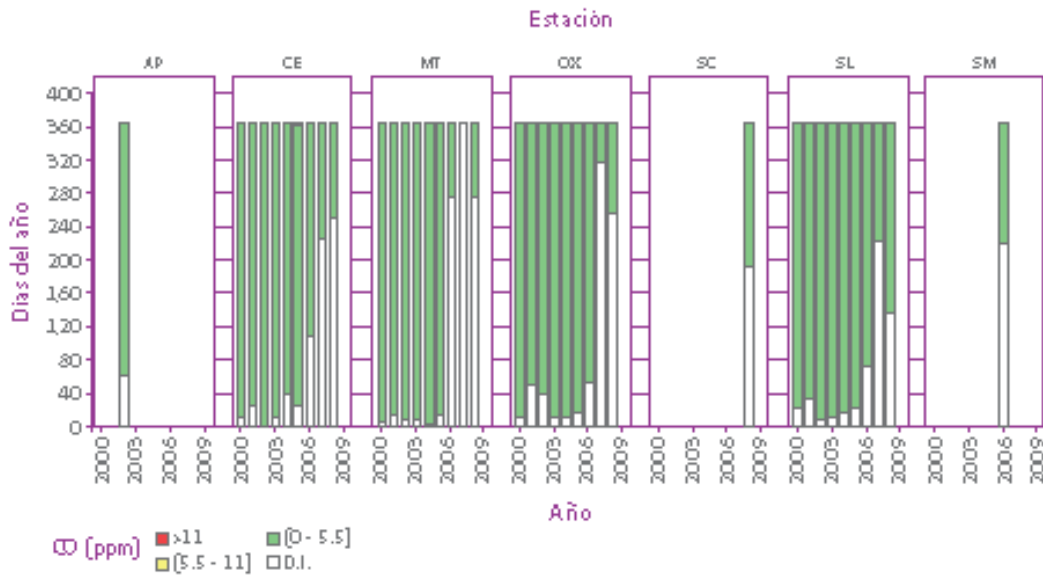
Fuente: INE (2011)

Anexo 3.17 Calidad del aire buena, regular y mala utilizando los máximos diarios de los promedios móviles de 8 h de CO en la ZMVT 2000 – 2009



Fuente: INE (2011)

Anexo 3.18 Calidad del aire buena, regular y mala utilizando los máximos diarios de los promedios móviles de 8 h de CO por estación en la ZMVT 2000 – 2009



Fuente: INE (2011)

Bibliografía

Adame, R. A. & Salín, P. D. A., 2000. *Contaminación Ambiental*. México: Trillas.

Armstrong, M. 1998. *Basic Linear Geostatistics*. Springer, Germany.

Ayers, M., 2001. Teoría básica de la contaminación del aire. En *Roberts Alley E. & Associates. Manual de control de la calidad del aire*. (Hidalgo Mondragon M.C., Trad). Mc Graw-Hill.

Ayuga, T. E., 2008. *Estimación e interpolación*. [En línea] Disponible en: http://ocw.upm.es/proyectos-de-ingenieria/sistemas-de-informacion-geografica-tecnicas-cuantitativas-para-gestion-de-datos/contenidos/WEB/TEORIA/08-estimacion_e_interpolacion.pdf [Accesado el 02 de diciembre de 2014].

Babak, O. y Deutsch, C., 2009. *Statistical approach to inverse distance interpolation*, *Stoch. Environ. Res and Risk Assess.* p. 543-553.

Camacho, B. R. et al., 2003. Antecedentes históricos de la contaminación ambiental. En López A. J. A. & Solís, S. L. M., *Principios básicos de la contaminación ambiental*. México: UAEM.

Cañada, T. R., 2007. Técnicas de interpolación geoestadísticas: Kriging ordinario. En Moreno, J. A. *Sistemas y análisis de la información geográfica*. Universidad Autónoma de Madrid.

Cañada, T. R., Vidal, D. M. J. & Moreno, J. A., 2011. *Interpolación espacial y visualización cartográfica para el análisis de la justicia ambiental: ensayo metodológico sobre la contaminación por partículas atmosféricas en Madrid*. [En línea], *GeoFocus* p. 118-154. Disponible en: http://geofocus.rediris.es/2011/Articulo6_2011.pdf [Accesado el 03 de marzo de 2015].

Cañada, T. R., González, L. H. & Moreno, J. A., 2012. *Modelado de la calidad del aire urbano. Un experimento metodológico con técnicas de interpolación espacial*. [En línea] Departamento de Geografía: Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en: http://www.boletinage.com/articulos/65/15_canada_65.pdf [Accesado el 03 de marzo de 2015].

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)., 1996-2000. [En línea]. Disponible en: <http://www.cepal.org/es/publicaciones> [Accesado el 24 de Agosto de 2014].

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)., 2009. *Efectos de los contaminantes en la Salud*. [En línea]. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacep/e/servi.html> [Accesado el 25 Junio de 2012].

De Mesnard, L. (2013). *Pollution models and inverse distance weighting: some critical remarks*. *Computers and Geosciences*, p. 459-469. [En línea] Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009830041200372X> [Accesado el 03 de marzo de 2015].

Diario Oficial de la Federación (DOF)., 1998. *Ley Federal de equilibrio ecológico y la protección del ambiente (LEGEEPA)*, 28 de enero de 1998.

Environmental Protection Agency (EPA)., 1999. *The Benefits and Cost of the Clean Air Act from 1990 to 2010*. Reporte EPA-410-R-99-001, p.114.

Environmental Protection Agency (EPA)., 2004. *Developing Spatially Interpolated Surfaces and Estimating Uncertainty*. Reporte 454/R-04-004, p. 59.

Environmental Protection Agency (EPA)., 2011. *The Benefits and Cost of the Clean Air Act from 1990 to 2020: Summary Report*. Reporte final, p.34.

Environmental Protection Agency (EPA)., 2011. *Effects of CO air pollution*. [En línea] Disponible en: www.epa.gov/airquality/carbonmonoxide/. [Accesado el 25 de junio de 2015].

Gobierno del Estado de México (GEM) & Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., 2000. *Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 1997 – 2000*.

Gobierno del Estado de México (GEM) & Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., 2007. *Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 2007 – 2011*.

Gobierno del Estado de México (GEM)., 2000. *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*.

Gobierno del Estado de México (GEM)., 2004. *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*.

Gobierno del Estado de México (GEM) & Secretaria de Salud., 2011. Normas de Calidad del Aire. En *Diario Oficial de la Federación*.

González, G. M. A. & Villafaña, E. L. V., 2003. Contaminación atmosférica. En López A. J. A. & Solís S.L. M., *Principios básicos de la contaminación ambiental*. México: UAEM.

Instituto Mexicano para la Competitividad AC (IMCO)., 2012. Séptimo Taller de Gestión Integral de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de contaminantes (VII GEICA). *Calidad del aire y competitividad en las ciudades mexicanas: retos y soluciones*. Querétaro.

Instituto Nacional Ecología (INE) & Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., 2000. *Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en ciudades mexicanas (1994 – 1999)*.

Instituto Nacional de Ecología (INE) & Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., 2000. *Gestión de Calidad del Aire en México*.

Instituto Nacional Ecología (INE) & Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., 2003. *Segundo almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en seis ciudades mexicanas (1994 - 2002)*.

Instituto Nacional Ecología (INE) & Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., 2007. *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas (1997 – 2005)*.

Instituto Nacional Ecología (INE) & Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., 2011. *Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000 – 2009)*.

Jiménez, C. B. E., 2001. *La Contaminación Ambiental en México. Causas, efectos y tecnología aplicada*. México: Limusa.

Kathryn, M. et al., 2004. *Atmospheric wet deposition of trace elements to a suburban environment, Reston, Virginia, USA*.

Künzli, N., Kiser, R. & Medina, S., 2000. *Public-Health Impact of Outdoor and Traffic-related Air Pollution: a European Assessment*. Lancet.

Levy, J. et al., 2002. *Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: model sensitivity and implications*. *Atmospheric Environment*.

Medina, S., Le Tertre, A. & Quénel, P., 1997. *Air Pollution and Doctors' House Calls: Results from the ERPURS System for Monitoring the Effects of Air Pollution on Public Health in Greater Paris, France. 1991-1995*.

Moreno, J. A., 2007. *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS*. Madrid: Ra-Ma.

Moreno, J. A., 2013. *Población y polución atmosférica intraurbana por dióxido de nitrógeno en Madrid: análisis desde la justicia ambiental basado en sistemas de información geográfica*. Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada.

Organización Mundial de la salud (OMS)., 2005. *Guías de la Calidad del Aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. [En línea]. Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf [Accesado el 25 de junio de 2012].

Organización Mundial de la salud (OMS)., 2008. *Informe sobre la salud en el mundo 2008. La atención primaria de salud*. [En línea]. Disponible en: http://www.who.int/whr/2008/08_report_es.pdf [Accesado el 30 de Junio de 2012].

Organización Mundial de la salud (OMS)., 2011. *Estadísticas Sanitarias Mundiales 2011*. [En línea]. Disponible en: http://www.who.int/whosis/whostat/ES_WHS2011_Full.pdf [Accesado el 30 de junio de 2012].

Racca, J. M., 1982. *Análisis de distribución geográfica utilizando superficies de tendencia, programas para su cálculo*. Argentina: Universidad Nacional del Rosario.

Roberts, A. E. & Associates., 2001. *Manual de control de la calidad del aire*. (Hidalgo, M. M.C., Trad). Mc Graw-Hill.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., 2000. *Contaminación*.

Seoánez, C. M., 2002. *Tratados de la contaminación atmosférica. Problemas, tratamiento y gestión*. Madrid. Barcelona. México: Mundi-Prensa.

Simioni, D., 2003. *Contaminación atmosférica y conciencia ciudadana*. CEPAL. Santiago de Chile. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2351/S02121026_es.pdf?sequence=1 [Accesado el 18 de Octubre de 2014].

Sommer, H. & Seethaler, R., 2000. *Economic Evaluation of Health Impacts Due to Road Traffic-related Air Pollution. Expert Workshop on Assessing the Ancillary Benefits and Costs of Greenhouse Gas Mitigation Strategies, del 27 al 29 de marzo de 2000*. Washington, D.C.

Stevens, G.A., Dias, R.H. & Ezzati, M., 2008. *The effects of 3 environmental risks on mortality disparities across Mexican communities*. National Academy of Sciences of the United States of America.

Turk, A., Turk, J. & Wittes, J.T., 2004. *Ecología- Contaminación- Medio Ambiente*. (Ottensmeyer F., Trad.):Mc Graw-Hill.

Universidade Estadual Paulista (UNESP)., 2011. *Análisis comparativo de métodos de interpolación espacial utilizando datos de evapotranspiración*. Brasil: Instituto Regional de Ciencias Ambientales (UNAS).

Villegas, P. F. A., 1999. *Evaluación y control de la contaminación*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Wark, K. & Warner, C.F. (2007). *Contaminación del aire origen y control*. (García, F. C. A., Trad.) Mexico: Limusa Noriega.

World Health Organization (WHO)., 2006. *Air quality guidelines global update 2005*. [En línea]. Disponible en: <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf> [Accesado el 30 de junio de 2012].

World Health Organization (WHO)., 2009. *Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks*. [En línea]. Disponible en: http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/GlobalHealthRisks_report_full.pdf [Accesado el 25 de junio de 2012].